Aix-Marseille Université Institut des Sciences du Mouvement

Habilitation à Diriger des Recherches

spécialité « Biorobotique » par Stéphane Viollet

Capteurs et stratégies de pilotage bio-inspirés pour la robotique

Soutenue le 1^{er} février 2013 devant le jury composé de:

- Pr. Eric BERTON
- Pr. Frédéric BOYER
- Dr. NICOLAS FRANCESCHINI
- Dr. Pascal MAMASSIAN
- Pr. MICHEL PAINDAVOINE
- Dr. SIMON THORPE
- Dr. JEAN-LOUIS VERCHER



(Président) (Rapporteur) (Examinateur) (Examinateur) (Rapporteur) (Rapporteur) (Examinateur)





Le livre de la nature est écrit en langage mathématique. G. Galilée (1564-1642), L'Essayeur.

REMERCIEMENTS

L'habilitation à diriger des recherches reflète un travail réalisé sur une période assez longue, comprenant ma thèse et s'étalant jusqu'à aujourd'hui. L'essentiel de ces travaux a été réalisé avec des étudiants que j'ai encadrés ou en collaboration avec des collègues sans qui tout cela n'aurait pas été possible. Ce travail est donc un travail collectif, plus que la contribution d'une personne isolée. Je m'estime très chanceux d'avoir pu bénéficier de collaborateurs à la fois motivés et efficaces.

Par conséquent, je tiens à remercier tous les membres (anciens et actuels) de l'équipe biorobotique que j'ai pu côtoyer depuis mon arrivée dans l'équipe en 1997 :

- les chercheurs : Nicolas Franceschini, Franck Ruffier, Julien Serres, Thibaut Raharijaona et Fabrice Aubépart,
- les techniciens et ingénieurs : Marc Boyron, Julien Diperi, Yannick Luparini, Fabien Paganucci et Roger Chagneux,
- les doctorants : Lubin Kerhuel, Raphaël Juston, Augustin Manecy, Frédéric Roubieu, Fabien Expert, Fabien Colonnier et Stefano Mafrica,
- et les nombreux stagiaires : Bruno Boisseau, Paul Mignon, Waël Njah, Lucas Baldo, Romain Vidovic, Antoine Bongard, Alice Julien-Laferrière, Thomas Ray, Charles Thurat, Ousmane Dieng, Stéphane Amic et Pascal Zunino,
- sans oublier les indispensables techniciens et administratifs du laboratoire : Bernadette Besson, Nathalie Fenouil, Sylvain Floucat et André Boyer,
- ainsi que que les deux directeurs successifs de l'Institut des Sciences du Mouvement : Jean-Louis Vercher et Eric Berton.

Marseille, le 30 Aout 2013.

RÉSUMÉ

Notre démarche Biorobotique vise à élucider le fonctionnement de mécanismes sensorimoteurs naturels, puis à les mettre en œuvre à bord de robots aériens qui, une fois confrontés à un environnement réel, sont aptes à confirmer ou à infirmer ce que nous prétendons avoir compris chez l'animal. Ainsi, par itération, nous faisons à la fois avancer notre compréhension de ces mécanismes sensorimoteurs et nous dotons nos robots de capacités de vol de plus en plus élaborées. Après un état de l'art de la connaissance des capteurs naturels de l'insecte ailé et de leurs pendants artificiels pour des applications robotiques, deux exemples de stratégies bio-inspirées sont décrits : la micro-vibration rétinienne conduisant à une hyperacuité et le contrôle du regard conduisant à une meilleure stabilisation d'un engin volant. Ces deux exemples sont emblématiques de la bio-inspiration qui, d'une manière générale, conduit souvent de façon non intuitive à la découverte de principes nouveaux très performants.

SUMMARY

TABLE DES MATIÈRES

1

1 INTRODUCTION

- 2 CAPTEURS CHEZ L'INSECTE AILÉ 3
 - 2.1 Les capteurs optiques 3
 - 2.2 Les capteurs inertiels : Les balanciers 38
 - 2.3 Les autres capteurs proprioceptifs 40
 - 2.4 Résumé 47
- 3 STRATÉGIE BIO-INSPIRÉE DE PILOTAGE PAR LE REGARD 49
 - 3.1 Stabilisation du regard chez le robot OSCAR 58
 - 3.2 Pilotage par le regard du robot OSCAR 59
 - 3.3 Résumé 64

4 HYPERACUITÉ ET MICRO-MOUVEMENTS RÉTINIENS

4.1 Quelques mots sur les micro-mouvements rétiniens naturels 69

69

- 4.2 Modélisation d'un oeil élémentaire à micro-balayage 71
- 4.3 Traitements des signaux temporels : Deux approches **76**
- 4.4 Résumé 87

5 DISCUSSION 89

- 5.1 Rôle des micro-mouvements rétiniens 89
- 5.2 Sensibilité angulaire gaussienne des photorécepteurs 90
- 5.3 Découplage oeil-tête 91

6 PROJET DE RECHERCHE 93

- 6.1 Capteurs optiques innovants 93
- 6.2 Pilotage par le regard de robots aériens autonomes 96
- 6.3 Réflexes oculomoteurs pour la stabilisation du système visuel chez l'insecte ailé 97

Bibliographie 101

- A SÉLECTION D'ARTICLES 113
- B CURRICULUM VITÆ 115
- C RAYONNEMENT ET RESPONSABILITÉS SCIENTIFIQUES 117
 - c.1 Responsabilités administratives et scientifiques 117
 - c.2 Jury de thèse 117
 - c.3 Participation à des projets 117
- D ENCADREMENT 121

- D.1 Doctorants 121
- D.2 Stagiaires 121
- E PUBLICATIONS 123
 - E.1 Journaux internationaux à comité de lecture 123
 - E.2 Journaux nationaux à comité de lecture 124
 - E.3 Conférences internationales à comité de lecture 124
 - E.4 Conférences internationales sur invitation et sans actes 126
 - E.5 Conférences nationales avec actes et sans comité de lecture 126
 - E.6 Chapitres de livre 127
 - E.7 Brevets 127
 - E.8 Édition de revues scientifiques 128
 - E.g Séminaires sur invitation et Journées 128

1 INTRODUCTION

Les techniques dites « bio-inspirées » pour le pilotage de robots n'en sont pour l'instant qu'à leurs balbutiements. Ce n'est pourtant pas faute de modèles que l'on pourrait fort bien suivre. Tous les problèmes « chauds » de la robotique aérienne autonome, tels que le contrôle d'attitude, le décollage automatique, l'atterrissage automatique, l'appontage automatique, le camouflage dynamique, ou encore la poursuite et la capture d'intrus, ont été résolus par la nature voici plusieurs centaines de millions d'années. Les nombreuses expériences d'éthologie menées depuis 80 ans notamment sur les insectes ailés, nous révèlent des solutions originales, largement éprouvées et optimisées en termes de choix de modalités sensorielles, de méthode de fusion et de complexité calculatoire adaptée aux ressources embarquées.

Mais il existe d'autres voies d'exploration que l'éthologie. Les analyses neuroanatomiques et électrophysiologiques chez l'insecte ont permis de :

- Commencer à explorer les structures fines du système nerveux de ces animaux.
- Modéliser le fonctionnement de certains neurones à partir de leurs réponses à des stimuli adéquats.

Un cas exemplaire en est fourni par les neurones détecteurs de mouvement dont l'analyse physiologique et la modélisation ont abouti, voici vingt sept ans, à la réalisation dans notre laboratoire de « neurones électroniques détecteurs de mouvement », véritable passerelle entre le vivant et l'artificiel. Par la suite, de nombreuses réalisations robotiques de notre laboratoire ont découlé directement de l'utilisation de ces neurones bio-inspirés. Les stratégies de contrôle s'appuyant aussi sur ces circuits sont caractérisées par une sorte de principe commun avec leurs homologues naturels : faire beaucoup avec peu. Peu de pixels, peu de neurones, peu de traitement, et un couplage perception/action assez direct, donc rapide et compatible avec les faibles constantes de temps mises en jeu à bord d'un insecte, d'un oiseau ou d'un drone. C'est précisément sur ce constat que s'appuie l'équipe biorobotique depuis vingt cinq ans, en proposant des systèmes originaux de guidage/pilotage de robots, qui créent une rupture avec les méthodes préconisées aujourd'hui pour le pilotage des drones.

Le chapitre 2 de ce document décrit divers capteurs des insectes ailés et leurs pendants artificiels. Le chapitre 3 décrit une stratégie bio-inspirée basée sur le contrôle et la stabilisation du regard. Enfin, le chapitre 4 décrit le rôle des micro-mouvements rétiniens pour la localisation d'objets contrastés avec hyperacuité. Un chapitre de discussion et de projet sont donnés dans les chapitres 5 et 6 respectivement.

2 CAPTEURS CHEZ L'INSECTE AILÉ

MATIÈRES

| 2.1 | Les capteurs optiques 3 | |
|-----|---------------------------------------|--------------------------------------|
| | 2.1.1 | L'oeil composé (oeil à facettes) 3 |
| | 2.1.2 | Les ocelles 35 |
| | 2.1.3 | Les capteurs infra-rouge 37 |
| 2.2 | Les ca | pteurs inertiels : Les balanciers 38 |
| 2.3 | Les autres capteurs proprioceptifs 40 | |
| | 2.3.1 | Les antennes 43 |
| 2.4 | Résum | 1é 47 |

2.1 LES CAPTEURS OPTIQUES

2.1.1 L'oeil composé (oeil à facettes)

CÔTÉ VIVANT L'oeil composé des insectes (et des crustacés) est une merveille de la nature (figure 1).



FIGURE 1.: Photo d'une libellule au réveil dont les yeux sont recouverts par la rosée.

Il est composé d'ommatidies distinctes (ommatidie = petit oeil élémentaire), dont le nombre va de quelques dizaines par oeil (chez les fourmis) jusqu'à 30.000 (chez les grosses libellules). Chaque ommatidie découpe dans l'espace un petit champ de vision de quelques degrés seulement. Le nombre d'ommatidies définit donc le nombre de pixels de l'image globale, qui couvre 4π [ster] et même parfois davantage par suite d'un recouvrement binoculaire. Les signaux électriques émis par chaque cellule d'une ommatidie sont analysés point par point, et pas à pas, dans le réseau de neurones du système nerveux sous-jacent, qui ne comporte qu'un million de neurones environ. Chaque ommatidie est composée d'une microlentille (« facette »), dont le diamètre est de l'ordre de 30µm, et qui focalise la lumière sur un petit groupe de cellules visuelles (8 ou 9 selon l'insecte), véritables neurones photorécepteurs responsables de la phototransduction. Une tension électrique est ainsi générée par chaque cellule et son amplitude (o à 60 millivolts) croît avec le logarithme de l'éclairement. La figure 2 montre une coupe schématique d'un oeil composé d'insecte qui illustre les principaux paramètre optiques de l'oeil que sont l'angle interommatidial $\Delta \varphi$ et l'ange d'acceptance $\Delta \rho$.



FIGURE 2.: Représentation schématique d'un œil composé, avec ses centaines ou milliers d'ommatidies. D'après Horridge [1977].

La figure <u>3</u> résume aussi les principaux paramètres optiques de l'oeil composé de la drosophile et illustre de manière détaillée le principe de superposition neuronale en rapport avec la disposition géométrique des photorécepteurs (voir aussi <u>4</u>c).

Il existe différents types d'oeil composé qui se différencient déjà au niveau de leurs optiques. La figure 4 montre les différences fondamentales existantes entre l'oeil camérulaire et deux types différents d'oeil composé : l'oeil dit à apposition et l'oeil dit à superposition.



FIGURE 3.: Système visuel de la mouche drosophile. (A) L'oeil est composé de cartouches identiques juxtaposées appelées ommatidies. L'angle interommatidial $\Delta \varphi$ détermine le nombre d'ommatidies, donc de champs visuels élémentaires. *R* est le diamètre de l'oeil et *L* l'épaisseur de la couche photoréceptrice. Chez la drosophile, L = 80µm et $\Delta \varphi$ = 5°. (B) Chaque ommatidie contient 8 photorécepteurs dont 6 périphériques, notés R1-6, et 2 centraux, notés R7-8, ayant leur rhadomères "en tandem". Les 6 photorécepteurs indiqués par un point noir regardent dans la même direction et envoient leurs axones au même ganglion optiquel (superposition neuronale). (C) La sensibilité d'un photorécepteur dépend de l'angle d'incidence de la lumière, noté ici θ . La sensibilité angulaire dépend des propriétés de l'optique et du rhabdomère. Elle correspond approximativement à une gaussienne dont l'angle à mi-hauteur, noté $\Delta \rho$, est appelé angle d'acceptance. D'après Stavenga [2006]



FIGURE 4.: Trois différents types d'yeux composés dits à apposition (A), à superposition (B) et à superposition neuronale (C). (A) Chaque photorécepteur reçoit de la lumière par sa propre lentille. (B) Chaque photorécepteur reçoit de la lumière provenant de son optique et des optiques voisines (amplification optique). (C) Une sommation neuronale permet d'additionner les signaux de sortie des photorécepteurs regardant dans la même direction de l'espace (amélioration du rapport signal-sur-bruit). D'après Borst [2009].

Il existe aussi des différences fondamentales au niveau de la fusion des signaux des photorécepteurs. Ainsi, il existe des yeux dits à superposition neuronale, dont le principe est illustré dans la figure 4.

Nous venons de voir qu'il existe plusieurs systèmes permettant d'améliorer le rapport signal-sur-bruit (S/B), donc la sensibilité absolue et la sensibilité au contraste de l'oeil. Pour résumer, il existe deux types de superposition, la superposition optique et la superposition neuronale que l'on rencontre respectivement :

- dans l'œil composé des papillons de nuit, un point lumineux dans l'espace est capable d'exciter une même cellule photoréceptrice par l'intermédiaire de plusieurs facettes (par exemple 400) qui font converger la lumière vers cette même cellule. C'est l'œil composé dit « à superposition optique ». Dans le cas cité ici le rapport S/B serait amélioré par un facteur √400 = 20.
- dans l'œil composé de la mouche et des Diptères en général, un même point lumineux de l'espace est « vu » simultanément par un petit lot de cellules (entre 6 et 9), appartenant à des ommatidies distinctes. Les signaux issus de certaines de ces mêmes cellules sont alors sommés électriquement sur des neurones sousjacents. Le rapport S/B est a ainsi amélioré par un facteur √6 ou √7 ou √8. C'est l'œil composé dit « à superposition neuronale » propre aux Diptères.

Un mécanisme d'adaptation remarquable a été découvert chez la mouche, sous la forme de fins granules pigmentaires absorbants, qui migrent à l'intérieur de chaque cellule au delà d'un seuil d'éclairement Kirschfeld and Franceschini [1969]. C'est une véritable « pupille intracellulaire » qui permet de combattre les surintensités lumineuses. Chaque cellule couvre une gamme spectrale particulière, par exemple avec un pic de sensibilité dans le vert, le bleu ou le proche UV (jusqu'à 300nm), et certaines d'entre elles ont même deux ou trois pigments visuels de rôles différents. Chaque cellule est sensible aussi à la direction de polarisation de la lumière, et c'est particulièrement le cas pour la région marginale de l'oeil, regardant vers l'avant

et vers le haut (Hardie [1984]). C'est cette zone qui sert, par exemple, à l'abeille (Labhart [1980]) à déterminer la position azimutale du soleil (« compas solaire »), même lorsque celui-ci et une large partie du ciel sont cachés par de la végétation ou par un nuage. C'est cette zone aussi qui permet à certains coléoptères aquatiques de détecter en vol une surface d'eau.

Pour mieux comprendre quels sont les fonctions d'un capteur aussi remarquable que l'oeil composé des insectes, il est important de se plonger dans les mécanismes liés à la physique de son optique.

Résolution de l'œil composé

La résolution d'un oeil est souvent définie par rapport à l'optique d'un oeil de type camérulaire, c'est-à-dire un oeil à lentille unique. La figure 5 illustre les similarités existantes entre un oeil composé à apposition et un œil camérulaire. Bien que n'étant pas à l'échelle, cette figure montre l'un des avantages majeurs d'un capteur optique de type oeil composé : une grande largeur de champ visuel pour un compacité extrême. Par exemple, la distance photorécepteur-lentille chez la mouche n'est que de quelques dizaines de microns, comparée au 17000µm chez l'homme.

La résolution d'un oeil, qu'il soit camérulaire ou composé, est caractérisée par la valeur de l'angle interrécepteur (œil camérulaire) ou de l'angle interommatidial (oeil composé), noté $\Delta \varphi$. A partir de la figure 5, on peut calculer l'angle $\Delta \varphi$ (rad) de la manière suivante :

$$\Delta \varphi = \frac{D}{R} = \frac{s}{f}$$
(2.1)

La figure 6 montre très clairement que la plus petite période spatiale qu'un oeil est capable de résoudre est égale à $2\Delta\varphi$ (cf. figure 6). On peut alors définir la fréquence maximale d'échantillonnage spatiale de la manière suivante :

$$\nu_{\rm s} = \frac{1}{2\Delta\phi} \tag{2.2}$$

La limitation imposée par la fréquence d'échantillonnage n'est valable que si l'optique de chaque ommatidie est capable de résoudre cette fréquence spatiale. Il faut donc s'intéresser aux propriétés optiques d'une ommatidie.

Propriétés optiques de l'œil composé

Lorsque les détails d'un objet deviennent de plus en plus petit (i.e., lorsque la fréquence spatiale augmente), le contraste perçu par une optique permettant de différencier ces détails devient de plus en plus faible voire nul. Ce phénomène est dû à la diffraction. La figure 7 illustre ce phénomène, et permet de définir deux nouveaux paramètres : le contraste et la fréquence de coupure spatiale.

La fréquence spatiale notée ici f_s (souvent notée v) s'exprime en cycle/° et correspond au nombre de cycles vus d'un oeil dont le champ visuel est égale à 1° (cf. figure 8).



FIGURE 5.: Similitudes entre l'oeil composé des insectes et l'oeil camérulaire. L'angle d'échantillonnage spatial $\Delta \varphi$ (appelé angle interommatidial ou interrécepteur) est égal à D/r dans le cas de l'oeil à apposition et à s/f dans le cas de l'oeil camérulaire. D est le diamètre d'une facette, r le rayon de courbure (centre C), f est la distance focale et s la séparation inter-récepteur. D'après Land [1997].



FIGURE 6.: Illustration de la plus grande fréquence spatiale (ou plus petite période spatiale) qui peut être reconstruite par un réseau d'ommatidies à section carrée. D'après Snyder et al. [1977].



FIGURE 7.: La fonction de transfert de modulation représente le contraste en fonction de la fréquence spatiale d'une mire périodique placée dans le champ visuel d'une optique. Plus la fréquence spatiale ν augmente, plus le contraste de la mire diminue pour atteindre une fréquence de coupure $\nu_{co} = D/\lambda$. D'après Land [1997].



FIGURE 8.: La fréquence spatiale correspond au nombre de cycles présents dans un champ visuel de 1°. Ici la fréquence de la mire périodique est deux fois plus élevée à droite qu'à gauche.

Si maintenant l'oeil tourne à une vitesse angulaire Ω (rad/s) alors la relation entre la fréquence temporelle f_t des signaux visuels et la fréquence spatiale f_s s'écrit de la manière suivante :

$$f_t = \Omega f_s \tag{2.3}$$

On définit classiquement le contraste c entre deux plages lumineuses contigües de la manière suivante (contraste de Michelson) :

$$C = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}, \text{ avec } I_1, I_2, l'éclairement \text{ des deux plages lumineuses.}$$
(2.4)

Le fait de diviser par $I_1 + I_2$ rend le contraste indépendant du niveau d'éclairement. Tout capteur optique a tendance à atténuer le contraste au fur et à mesure que la fréquence spatiale augmente (cf. figure 7). Ce phénomène est dû à la diffraction d'Airy. On peut alors définir la fréquence de coupure spatiale optique v_{co} de la manière suivante :

$$v_{co} = \frac{D}{\lambda}$$
, avec D le diamètre de la lentille et λ la longueur d'onde. (2.5)

L'équation 2.5 montre que plus le diamètre de la lentille est grand plus la fréquence de coupure spatiale est élevée. Mais la limite se situe au niveau de la taille de l'œil, notamment dans le cas d'un oeil à lentille unique. Le diamètre de la pupille de l'oeil de l'homme (D $\simeq 2000 \mu$ m) est environ 100 fois plus grand que le diamètre de la lentille d'une ommatidie d'abeille (D $\simeq 20 \mu$ m). Pourtant, ces deux yeux ont la même sensibilité optique S en nombre de photons par seconde qu'ils peuvent capturer, du moins pour une plage étendue. Pour comprendre ce phénomène, il faut revenir à la notion d'angle d'acceptance $\Delta \rho$ qui, dans le cas d'un oeil camérulaire, est défini par :

$$\Delta \rho = \frac{d}{f}$$
, avec d le diamètre d'un photorécepteur et f la distance focale. (2.6)

Dans le cas d'un oeil composé dont la lentille d'une ommatidie a un diamètre D_l et le rhabdomère un diamètre D_r , une expression (simplifiée) de l'angle $\Delta \rho$ est donnée par Snyder et al. [1977] :

$$\Delta \rho^{2} = \Delta \rho_{\rm diff}^{2} + \Delta \rho_{\rm opt}^{2} = \left(\frac{\lambda}{D_{\rm l}}\right)^{2} + \left(\frac{D_{\rm r}}{f}\right)^{2}$$
(2.7)

La figure 10 illustre l'équation 2.7. Pour une ommatidie, on peut donc définir une nouvelle fréquence de coupure spatiale v_{opt} qui tient compte à fois de la diffraction et du diamètre des rhabdomères à l'origine de l'angle d'acceptance $\Delta \rho_{opt} = D_r/f$. La figure 9 décrit l'optique d'une facette de Drosophile où le rhabdomère, dont l'embouchure est située dans le plan focal de la lentille, capture des rayons lumineux (provenant d'une source ponctuelle) ayant une incidence $|\theta| < 0.5D_r/f$. Par conséquent, l'angle d'acceptance $\Delta \rho_{opt} = D_r/f$.



FIGURE 9.: Optique géométrique d'une facette de drosophile. Le diamètre de la lentille est noté D_L et celui du rhabdomère D_R. L'extrémité du rhabdomère coïncide avec le point focal F'. D'après Stavenga [2006].

Pour un oeil composé, on définit la fréquence de coupure spatiale v_{opt} par :

$$\nu_{\rm opt} = \frac{1}{\Delta \rho} \tag{2.8}$$

Dans le cas de l'oeil de l'homme, en plein jour, les valeurs des fréquences spatiales v_{co} et v_s sont quasiment identiques et égales à environ $60c/^{\circ}$ (pour $\lambda = 500$ nm et $\Delta \varphi = 0, 5/^{\circ}$). Chez l'insecte, c'est plutôt un rapport 2 qui existe entre v_{opt} et v_s , ce qui veut dire que le rapport moyen $\Delta \varphi / \Delta \rho$ est très proche de 1 (Land [1997]) et ce qui implique donc un sous-échantillonnage privilégiant les forts contrastes puisque c'est la fréquence d'échantillonnage v_s qui semble l'emporter sur la fréquence de coupure v_{opt} . En d'autres termes, l'oeil composé, contrairement à l'oeil camérulaire, ne permet pas de percevoir de très faible contraste pour des fréquences spatiales relativement élevées. Cette propriété a du sens car l'oeil composé est un capteur de flux optique très performant filtrant énormément d'informations liées aux fréquences spatiales élevées souvent à l'origine d'erreur de correspondance lors de la mesure des vitesses de défilement des objets contrastés.

La sensibilité optique S est définie par l'équation suivante (Land [1981]) :

$$S = 0.62 D^2 \Delta \rho^2 P_{abs}$$
, avec P_{abs} la proportion de photons absorbés. (2.9)

Il est à noter que cette équation peut être exprimée aussi sous une forme plus précise (Frederiksen and Warrant [2008]) :

$$S = \left(\frac{\Pi}{4}\right)^2 D^2 \left(\frac{d}{f}\right)^2 \left(\frac{kl}{2,3+kl}\right)$$
(2.10)

avec d le diamètre d'un rhabdomère, l la longeur d'un rhabdomère, f la distance focale et k le coefficient d'absorption des pigment visuels.

D'après l'équation 2.9, on comprend mieux pourquoi l'oeil de l'homme et l'abeille ont la même sensibilité S car même si le diamètre de l'optique est 100 fois plus grand chez l'homme, l'angle d'acceptance est 100 plus grand chez l'abeille. La sensibilité de l'oeil de l'homme (D $\simeq 2000 \mu m, \Delta \rho = 1.2.10^{-4} rad, P_{abs} = 0.31$ est égale à 0.01 μ m².sr tandis que la sensibilité du *Cirolana* (crustacé vivant dans les eaux profondes, D $\simeq 150 \mu m, \Delta \rho = 0.78 rad, P_{abs} = 0.51$) est égale à 4200 μ m².sr. Ce qui



FIGURE 10.: L'angle d'acceptance Δρ résulte d'une combinaison entre la figure de diffraction liée à l'optique et le diamètre d'ouverture du rhabdomère. D'après Land [1969]

signifie que si le crustacé et l'homme regardait la même scène avec des conditions d'éclairage identiques, l'oeil du crustacé capturerait 420000 fois plus de photons par seconde que l'oeil de l'homme.

Les équations 2.9 et 2.10 nous montrent que le paramètre d'ajustement pour améliorer la sensibilité est le diamètre d'ouverture D. Mais le diamètre d'ouverture optique ne peut évidemment pas être plus grand que le diamètre de l'oeil. Il est, bien sûr possible d'augmenter l'angle d'acceptance $\Delta \rho$ mais au prix d'une dégradation de la résolution de l'oeil (diamètre des photorécepteurs plus gros) car dans un oeil camérulaire les angles $\Delta \phi$ et $\Delta \rho$ sont quasiment les mêmes et ne peuvent pas être ajustés indépendamment l'un de l'autre contrairement à l'oeil composé.

L'optique des yeux est adaptée au mode de vie de l'animal. D'une manière générale, les vertébrés bénéficient d'une bien meilleure résolution que les invertébrés. En terme de sensibilité, l'oeil de l'homme est loin d'avoir la meilleure sensibilité si on la compare à celles des animaux comme certains crustacés vivants dans des eaux très profondes. L'homme a une pupille lui permettant de moduler son ouverture relative, c'est-à-dire le rapport f/D (F-number), dans une gamme allant de 8 (plein jour) à 2 (nuit). Les insectes diurnes comme l'abeille ont un F-number proche de 2 tandis que certains vertébrés nocturnes ou certains poissons ont des F-number voisins de 1 et certains homards ont même un F-number de 0,5. Pour que pour que toute la lumière pénétrant dans une ommatidie se focalise à l'entrée du rahbdomère, il faut que le F-number soit supérieur à 2 (Stavenga [2003]). La plupart des mouches ont un F-number de 2 mais la drosophile a un F-number de 1,25 traduisant une perte d'une partie de la lumière focalisée (cf. figure 11).



FIGURE 11.: Capture de la lumière par un rhabdomère. La lumière incidente est focalisée par la lentille de diamètre D_1 et pénètre dans le rhabdomère avec un angle θ_a . Le guidage de la lumière dans le rhabdomère est limité par l'angle φ_c . Sa valeur est donnée par la loi de Snell-Descartes et les indices de réfraction n_1 et n_2 ont pour valeur respective 1,363 et 1,340 (chez la drosophile). Le F-number *F* donné par le rapport f'/D a pour valeur F = 1.25, traduisant une perte partielle de l'absorption de lumière. D'après Stavenga [2003].

Pour améliorer la sensibilité, nous avons vu qu'il existe une stratégie élégante consistant à additionner les sorties des photorécepteurs regardant dans la même direction de l'espace (superposition neuronale, cf. figures 3B,C et 4C). Cette stratégie permet d'améliorer la sensibilité de l'oeil sans avoir à modifier le diamètre D ou l'angle d'acceptance $\Delta \rho$. Chez la mouche, la distance focale f est de l'ordre de 70µm, ce qui implique que l'espace entre deux rhabdomères, noté *s*, doit être inférieur à 2,4µm de manière à ce que $s/f = \Delta \phi$. Chez la mouche, les rhabdomères ont un diamètre de seulement 1µm pour un espace d'environ 1µm aussi entre deux rhab-

domères adjacents. La figure <u>3</u> explique le mécanisme de superposition neuronale associé aux sensibilités angulaires gaussiennes de chaque photorécepteur.

Sensibilité au contraste

A partir de l'équation 2.9, on peut se demander combien de photons sont nécessaires pour détecter un contraste donné? A des niveaux d'éclairement très faibles, les débits des photons sont très faibles, par exemple en moyenne 1 photon toutes les 40 minutes au seuil de détection de l'oeil humain. Par conséquent, il est assez intuitif de comprendre que la détection de faibles contrastes implique un très grand nombre de photons. Il a été montré notamment par Rose (Rose [1973]) que le nombre moyen \overline{N} de photons reçus par un photorécepteur pour détecter un contraste C (cf. 2.4) est donné par l'équation suivante (Land [1981]) :

$$\bar{N} = \frac{1}{C^2} \tag{2.11}$$

Si le contraste à détecter est égal à 0,5, le nombre de photons requis est 1/0, 25 = 4. Pour un contraste égal à 0,1, le nombre de photons est égal à 100 et pour un contraste de 0,01, il faut 10 000 photons. Sachant que le temps d'intégration des photorécepteurs d'insecte est bien inférieur à 0,1s, il faut donc environ un million de photons, ce qui est possible en pleine journée. Par contre, un faible nombre de photons a aussi pour effet de diminuer la fréquence de coupure spatiale. Il est donc important de connaître le nombre de photons qui peuvent être absorbés par un photorécepteur pour un niveau d'éclairage donné. Ce nombre N peut être approximé par la relation suivante :

$$N = O,62ID_{l}^{2}\left(\frac{D_{r}^{2}}{f^{2}}\right)$$
, avec I la luminance de la source imagée. (2.12)

Pour obtenir des ordres de grandeur, considérons un carton blanc de luminance telle qu'il émet 10^{20} photons m⁻2sr⁻1s⁻1, environ 10^{17} en éclairage intérieur, 10^{14} sous un clair de lune et 10^{10} lors d'une nuit étoilée. Si l'on considère maintenant un oeil composé d'insecte diurne (D₁ = 25μ m, D_r = 2μ m, f = 60μ m), alors l'équation 2.12 donne le nombre de photons par seconde absorbés : 4.10^7 photons pour le plein soleil, 4.10^4 pour l'éclairage d'intérieur, 40 pour le clair de lune et 0.004 (environ 1 photon toutes les 4 minutes) sous une nuit étoilée. Ces derniers chiffres peuvent expliquer pourquoi beaucoup d'insectes volent au crépuscule ou dans des conditions se situant entre l'éclairage d'intérieur et la lune. Dans l'oeil à apposition, de plus grandes facettes ont de plus gros rabdomères peuvent accroître la sensibilité de l'oeil. Le temps d'intégration peut aussi être augmenté chez certaines espèces jusqu'à 5 fois. Enfin, les superpositions optiques ou neuronales sont aussi utilisées pour améliorer la sensibilité au contraste.

Tous les points qui ont été soulevés dans cette partie proviennent principalement d'étude menées en vision sur des yeux naturels, camérulaires ou composés. Cependant, les résultats obtenus en termes de caractérisation des propriétés optiques et de sensibilité s'appliquent aussi à des yeux artificiels miniatures, tels ceux que l'on commence à voir apparaître depuis quelques années. L'oeil composé artificiel à grand champs visuel est toujours une sorte de Graal à atteindre et les études menées depuis 130 ans (Sigmund Exner) sur l'oeil composé des insectes ont posé des jalons indispensables à la mise en oeuvre d'un futur oeil courbe à facettes artificiel.

Analogies entre l'oeil camérulaire et oeil composé

Nous avons montré dans le paragraphe précédent que l'optique de l'œil composé est caractérisée par une sensibilité angulaire pour chaque photorécepteur de chaque ommatidie. De la même manière, on peut supposer que chaque photorécepteur (cônes et bâtonnets) de la rétine d'une oeil camérulaire a une sensibilité angulaire gaussienne résultant de la figure de diffraction de l'optique de l'oeil avec le diamètre d'ouverture d'un cône dans la fovéa (espacement entre cônes chez l'homme d'environ $3\mu m$, pour des cônes de diamètre de $1\mu m$ à $2\mu m$ chez l'homme, pour espacement entre cône d'environ $3\mu m$). La figure 12 montre des exemples de PSF (figure de diffration) obtenues chez l'homme à divers diamètres d'ouverture pupillaire. Ici, l'angle d'acceptance est bien plus petit que celui de l'oeil composé de la mouche *Calliphora* (1°) ou de l'abeille *Apis melliphera* (2, 6°) (Land [1997]). Une liste des principaux paramètres liés à l'optique et à la rétine de l'œil camérulaire est donnée dans : http ://white.stanford.edu/ brian/numbers/node1.html.

Si la figure de diffraction (point spread function, PSF) de l'optique peut être relativement facilement mesurée avec une bonne précision (Campbell and Gubisch [1966]), la mesure de la sensibilité angulaire d'un cône ou d'un bâtonnet n'a pour l'instant, à ma connaissance, pas été possible avec les technologies électrophysiologiques existantes. Il est néanmoins possible d'avoir une estimation de l'allure de cette sensibilité angulaire par la mesure du champ récepteur de cellules ganglionnaires dont le champ récepteur correspond à la fusion de la sortie de plusieurs cônes ou bâtonnets via les cellules bipolaires. La figure 13 montre que les allures de ces champs récepteurs ont aussi une forme gaussienne.

On peut donc constater qu'il existe maintes analogies entres les caractéristiques optiques des yeux composés et camérulaires. La sensibilité angulaire gaussienne est une caractéristique commune qui est au coeur de la modélisation du chapitre 4 concernant les micro-mouvements rétiniens. Même si l'étude se base sur les micro-mouvements rétiniens de la mouche, on constate que les passerelles (sensibilité gaussienne et micro-tremblement de la rétine chez l'homme) permettant d'étendre nos résultats à la rétine des vertébrés sont déjà bien en place.

L'oeil composé et la mesure du flux optique

côté NATUREL Il est impossible d'aborder la structure de l'oeil composé des insectes sans décrire un minima la neuro-anatomie et les fonctions de traitement du signal associées aux ganglions neuronaux que l'on trouves dans le tête d'une mouche. Le but ici n'est pas de dresser un tableau extrêmement précis de l'état de la connaissance de la neuro-anatomie de la mouche car cela demanderait certainement l'écriture d'un manuscrit dédié à ce sujet. Il s'agit ici de faire le point sur certaines fonc-



FIGURE 12.: Exemples de figures de diffraction (PSF) mesurées chez l'homme pour différent diamètre d'ouverture. D'après Campbell and Gubisch [1966].



FIGURE 13.: Champ visuel central (vert) et périphérique (rouge) d'une cellule ganglionnaire dont l'allure peut être approximée avec une bonne précision par une gaussienne. D'après Donner and Hemilä [2007].

tions identifiées et impliquées dans la mesure du flux optique et certaines structures neuronales impliquées dans le traitement des signaux visuels.

La figure 14 montre une représentation très schématique des lobes optiques d'une mouche.



FIGURE 14.: Représentation schématique en 3D des ganglions neuronaux du système visuel de la mouche. L'empilement des neurones à grand champ VS dans la lobulaplate est aussi montré. D'après Borst [2009].

On remarque que le système visuel de la mouche est organisé en couches successives. On peut s'attendre alors à ce que le traitement des signaux visuels qui permet de détecter le mouvement d'un contraste soit également organisé en couches ou fonctions élémentaires. La figure 15 représente schématiquement les différents ganglions neuronaux ainsi que certains neurones colonnaires chargés de l'interconnexion entre les différentes structures concernées par la détection du mouvement.

La figure 15 montre quelques neurones colonnaires représentatifs des principaux type de neurones servant à interconnecter les différents ganglions optiques de la drosophile. Il existe 110 types différents de ces neurones colonnaires. Il est frappant de constater que même pour un spécialiste, il est très difficile de dire, à partir d'un simple image (sans échelle) de ces neurones, de quelle espèce animal ils proviennent, même si 200 millions d'année séparent les espèces de diptère. Pour plus de détails, un résume des fonctions potentielles des neurones T1, T2, L2, Tm et T5 est donné dans Borst [2009].

Parmi toutes ces structures neuronales, c'est la lobula-plate qui a suscité le plus d'engouement ces 50 dernières années. En travaillant sur la mouche *Calliphora*, Hengstenberg et Hausen (Hengstenberg et al. [1982] et Hausen [1984]) ont donné une description très complète de la lobula-plate qui est constituée de 60 neurones dont



FIGURE 15.: Représentation schématique montrant quelques types de neurones colonnaires servant à interconnecter les différents ganglions optiques de la drosophile. Les six cellules photoréceptrices R1 – 6 impliquées dans la détection du mouvement sont toutes reliées à la *lamina* contrairement aux deux cellules photoréceptrices centrales R7 – 8 qui sont reliées directement à la *medulla*. La *lamina* sert notamment à filtrer passe-haut les signaux visuels. Les neurones montrés dans cette figure ont non seulement un rôle de transport d'informations mais sont aussi impliqués la fonction de sélectivité (sens préféré) des neurones à large champ présents dans la *lobula-plate*, neurones appelés LPTC (Lobula-plate Tangential Cell). D'après Borst [2009].

la plupart sont à large champ récepteur, et dont la réponse dépend du sens et de la vitesse de déplacement d'un contraste défilant dans leur champ visuel (figure 16).



FIGURE 16.: Vue éclatée des neurones tangentiels de la lobula-plate le long de l'axe médian de la tête (la flèche représente l'orientation frontale de la tête). Les flèches représentées à la droite de chaque neurone indiquent la direction préférée (pointe noire) et la direction nulle (pointe blanche) des neurones détecteurs de mouvement dans chacun des deux hémi-champs (droit, gauche) délimités par le trait vertical. D'après Hausen [1984]

Le neurone H1, représenté dans la figure 16 en troisième position à partir du haut a été particulièrement étudié. Comme les autres neurones de la lobula plate, le neurone H1 collecte en fait les nombreuses sorties de fins neurones colonnaires de la medulla et de la lobula que l'on appelle "neurones détecteurs de mouvement" (DEM). C'est sur la base d'une analyse électrophysiologique de ces DEMs, réalisée au laboratoire Franceschini [1985] et Franceschini et al. [1989], qu'un circuit électronique DEM reproduisant pas à pas le schéma fonctionnel des DEMs de la mouche a été élaboré. Une description détaillée de ce circuit DEM ainsi que de ses évolutions est donné dans le paragraphe sur le côté artificiel.

Les neurones à large champ de la lobula-plate présentent un intérêt tout particulier car ils sont intimement liés à la mesure du flux optique. Le flux optique correspond à la vitesse angulaire de défilement des objets contrastés sur la rétine d'un observateur. La figure 17 illustre les grandeurs associés au flux optique de translation où un observateur (ici un insecte) ayant une vitesse de translation V observe un point situé à une distance S défilant en sens inverse. La direction d'observation est définie par l'angle θ .



FIGURE 17.: Illustration du flux optique de translation où un objet situé à une distance S d'un insecte se translatant à une vitesse V observe selon une direction θ le défilement de cet objet en sens inverse selon une vitesse angulaire ω définie par 2.13. D'après Land and Nilsson [2012]

On peut alors exprimer la vitesse angulaire ω appelée flux optique définie par la relation suivante :

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{V\sin(\theta)}{S}$$
(2.13)

D'une manière plus générale, les vitesses de défilement sont associées à un vecteur dont la longueur représente l'amplitude et la direction le déplacement relatif à l'observateur des objets contrastés. La figure 22 montre deux exemples de flux optique générés par le mouvement propre de l'observateur (ici une mouche). Il est intéressant de constater l'ambiguïté liée à une mesure locale du flux optique (carré gris dans les figures 18c et 18d) car en se basant uniquement sur une mesure des flux optiques locaux associés à un champ visuel réduit, il est alors impossible de faire la différence entre un flux optique de translation et de rotation.

Les insectes et notamment les mouches semblent avoir levé cette ambiguïté grâce à des neurones à large champ visuel codant des rotations et des translations pures. Grâce à un dispositif expérimental couplant des enregistrements électrophysiologiques des neurones VS et une stimulation visuelle locale, Krapp et Hengstenberg



FIGURE 18.: Mouvement propre et flux optique. (a) Les mouvements d'un insecte peuvent se décomposer en rotations translations pures. (b) Partie latérale de l'oeil composé droit (f : frontale, c : caudale, v : ventrale, d : dorsale). (c) Flux optique de translation pure selon l'axe dorso-ventral et sa représentation en carte de Mercator. (d) Idem avec un flux optique de rotation pure selon D'après Krapp and Wicklein [2008]. ont montré que les neurones VS1, VS6 et VS8 connus pour leur préférence directionnelle à un mouvement vertical sont en fait aussi capables grâce à intégration globale de répondre à un flux optique de rotation selon un axe bien précis.



FIGURE 19.: Dispositif expérimental utilisé pour caractériser la réponse de certains neurones à grand champ visuel de la *lobula-plate*. Un petit point noir sous-tendant un angle de 7,6° monté sur un excentrique se déplace à une vitesse constante de 2cycle/o. Quand la direction déplacement coïncide avec la direction préférée du neurone détecteur de mouvement, alors le neurone répond en dépolarisant sa membrane (cf. encart). La position du pic de réponse permet de déterminer la direction préférée tandis que l'amplitude représente la sensibilité du neurone. D'après Krapp and Hengstenberg [1996].

La figure 20 montre les trois neurones VS1, VS6 et VS8 et leurs réponses en termes sensibilités directionnelles et de l'amplitude de leurs réponses (Krapp and Hengstenberg [1997]).

S'il existe donc des neurones répondant à des flux optiques de rotation tels que les neurones VS, il existe aussi des neurones appelés Hx de la lobula-plate répondant à des flux optique de translation avec une réponse maximale pour des mouvements générés dans la partie ventrale de l'oeil. La figure 21 montre la réponse d'un tel neurone (Krapp and Hengstenberg [1996]).

Tous ces résultats provenant de l'électrophysiologie et de la neuro-anatomie sont autant de sources précieuses d'inspiration pour la conception et la réalisation de capteurs de flux optique de demain. En effet, il important de constater, sans surprise, que la neuroanatomie de la mouche est en parfaite adéquation avec son oeil composé qui lui permet d'avoir un champ visuel à 360° pour une compacité extrême. Il est important aussi de noter que les neurones à grand champ de la lobula plate semblent agir comme des filtres dont la réponse est maximale pour des flux optiques de translation ou de rotation. Le groupe de neurone VS1-VS3 répond de manière maximale à des rotations autour de l'axe de tangage, tandis que le réponses du groupe VS4-VS7 sont maximisées pour des rotations autour de l'axe de roulis. Les rotations privilégiés par les neurones VS coïncident avec des axes de rotation proches de l'horizon là où le flux optique de translation généré par exemple par des nuages peut être très faible mais où le flux optique de rotation reste invariant. Inversement les flux optique de translations privilégiés correspondent pour la neurones Hx à des zones



FIGURE 20.: Neurones VS1, VS6 et VS8 détecteurs de mouvement à large champ visuel. Les carte de Mercator montrent les réponses des neurones en termes de direction préférée et amplitude de la réponse. Ces cartes montrent clairement que ce type de neurone peuvent répondre à un flux optique de rotation généré par l'animal selon trois axes de rotations azimutaux différents. Il est important de voir que la position de la dendrite verticale principale de chaque neurone coïncide avec la plus grande sensibilité au mouvement vertical de bas en haut. On peut constater aussi que la partie ventrale des champs récepteurs de ces neurones est très peu sensible au mouvement. D'après Krapp and Wicklein [2008].



FIGURE 21.: Neurone Hx et sa réponse à une stimulation de mouvement local. Le neurone semble réponde de manière global à un mouvement horizontal mais il présente des singularités autour de l'azimut 135° où la réponse est très faible. D'après Krapp and Hengstenberg [1996].

visuelles ventrales où le flux optique est maximum pour une hauteur donnée (cf. Krapp and Hengstenberg [1996]).

côté ARTIFICIEL Un oeil composé artificiel présente un double intérêt : un très grand champ visuel pour une compacité extrême. La contre-partie se situe au niveau de la résolution optique qui est beaucoup plus grossière que celle que l'on peut obtenir avec une oeil camérulaire. Il est donc primordial de situer l'oeil composé artificiel dans son contexte d'utilisation. Les applications potentielles sont pour l'instant principalement liées à la navigation autonome et à la mesure du flux optique (évitement d'obstacle, atterrissage et décollage automatique...), soit à l'imagerie classique (reconnaissance de visage, endoscopie...). Il est important de noter que toutes ces tâches ne requièrent pas à priori une résolution extrêmement fine permettant de voir les détails les plus fins d'une scène visuelle. De la même manière, une assistance à une personne mal-voyante pour lui signaler des obstacles proches potentielement dangereux ne requiert pas non plus une très bonne acuité mais requiert par contre une faible masse et une petite taille.

A l'instar de leurs homologues naturels, les micro-aéronefs autonomes ont besoin de modalités sensorielles leur permettant d'évoluer dans leur environnement visuel, à priori inconnu, en toute sécurité et de se stabiliser au point fixe (vol stationaire) avec une grande précision. Ce sont précisément ce type de tâches robotiques qui sont abordées dans le projet Européen CURVACE (www.curvace.org) dont l'équipe
Biorobotique de l'Institut des Sciences du Mouvement (ISM, Marseille) fait partie.

Le but de ce paragraphe n'est pas de dresser une liste exhaustive de tous les yeux composés artificiels qui ont été réalisés jusqu'à présent même si des réalisations technologiquement remarquables mais non fonctionnelles ont pu être réalisées (Jeong et al. [2006]). C'est pourquoi, j'ai préféré souligné certaines réalisations telles que l'oeil composé planaire conçu par l'Institut Fraunhofer de Jena en Allemagne (Duparre et al. [2008]) dont l'un des capteurs est montré dans la figure 22.



FIGURE 22.: Capteur optique plan de type oeil composé réalisé par l'institut Fraunhofer à Jena. Le capteur à droite est constitué d'un imageur CMOS classique et de son optique réalisant les décalages optiques nécessaires; Cet exemple montre clairement l'avantage en terme de compacité d'une optique de type oeil composé par rapport à une optique classique de type camérulaire. D'après Duparre et al. [2008].

Cette équipe a réussi a réaliser un oeil composé à apposition planaire en se basant sur un imageur classique en silicium. Le véritable tour de force de Duparré *et al.* est d'avoir réussi à générer les décalages optiques adéquates de manière à créer un angle inter-récepteur $\Delta \varphi$ et un angle d'acceptance $\Delta \rho$ pour chaque pixel. Le principe repose sur la conception d'un wafer optique d'épaisseur inférieure à 0,5mm composé de micro-lentilles et placé à la surface d'un imageur silicium classique composé d'une mosaïque régulière de pixels. Un masque composé de trou d'épingle est inséré et pris en sandwich entre l'imageur et le wafer optique (cf. figure 23). C'est précisément ce masque à trous qui crée les décalages optiques nécessaires au capteur. Ce type de technologie présente néanmoins deux inconvénients :

- les décalages optiques ne peuvent pas se faire sur une grande gamme angulaire (maximum $\pm 30^{\circ}$).
- les trous en tête d'épingle diminuent fortement le flux de photons tombant sur chaque photosite, ce qui a pour effet de diminuer fortement la sensibilité du capteur.

Le groupe de John Rogers à l'Université d'Ilinois (USA) travaille à nouveaux capteurs optiques utilisant une technologie micro-électronique sur un substrat de type polymère élastique. Même si ce type de technologie est encore loin de sortir des laboratoires pour être industrialisée, les travaux remarquables déjà publiés par ce groupe suggèrent que la micro-électronique sur substrat plastique va subir très probable-



FIGURE 23.: Le principe de l'œil composé plan repose sur la fabrication d'un wafer optique composé de micro-lentilles et d'un masque troué réalisant les décalages optiques des axes visuels des pixels. Ce type d'optique permet d'obtenir un champ visuel d'environ 60° pour une distance focale inférieure à 500µm. D'après Duparre et al. [2008].

ment un grand essor dans les 10 prochaines années, avec des applications visant, par exemple, de nouveaux capteurs visuels et des cellules solaires photovoltaïques à faible coût. Pour des capteurs de type oeil camérulaire sphérique artificiel, leurs travaux ont montré qu'une rétine souple pouvant épouser un forme sphérique permet de s'affranchir d'aberrations optiques telle que que l'astigmatisme en créant une surface de Petzval (site http ://www.telescope-optics.net/curvature.htm). La figure 24 montre un exemple récent d'oeil camérulaire artificiel à rétine et lentille souples réalisés par l'équipe de John Rogers (Ko et al. [2008]).



FIGURE 24.: Oeil camérulaire biomimétique dont la rétine est composé de pixels placés sur un substrat souple déformable de type plastique. Photo d'après Ko et al. [2008].

Le groupe de John Rogers a aussi réalisé très récemment un oeil semi-sphérique (cf. figure 25), de 14mm de diamètre, composé de 180 ommatidies, et basé sur un substrat souple intégrant une mosaïque régulière de photodiodes sur lesquelles ont

été placées un réseau de micro-lentille de diamètre 800μm (Song et al. [2013]). La relative grande taille des ommatidies a imposé un angle interrommatidial de 8° pour un angle d'acceptance d'environ 10°, conférant à cet oeil une résolution très grossière compensée en partie par une stratégie consistant à faire tourner le capteur par pas de 1, 1° de manière à reconstituer une images meilleure à partir d'un ensemble de sous-images ("dithering", Seitz [1988]). Cette technique très contraignante limite fortement les application possibles de ce type de capteur. De plus, les photocapteurs de cet oeil sphérique sont de simples photodiodes dépourvues de toute fonction auto-adaptative permettant de compenser localement de fortes variations d'éclairement.



FIGURE 25.: Oeil composé semi-sphérique biomimétique dont la rétine est composé de photodiodes placées sur un substrat souple déformable de type plastique. Photo d'après Song et al. [2013].

La technologie développée par l'IOF à Jena peut quand même être envisagée pour la réalisation d'un oeil courbe. C'était l'objectif de notre projet Européen CurvACE (projet ICT-FET open) qui a donné naissance pour la première fois à un capteur miniature de type oeil composé, reprogrammable et capable de détecter et de mesurer des vitesses de défilement de contrastes sur cinq décades de luminance (Floreano et al. [2013]). La figure 26 montre une le capteur CurvACE dans sa version cylindrique. Ce capteur optique innovant est composé de 640 petits yeux élémentaires, soit 42 colonnes de 15 ommatidies. Chaque ommatidie est constituée d'une lentille de 172 microns et d'un pixel de 30 microns de diamètre. L'œil composé CurvACE bénéficie d'un avantage majeur caractéristique de tous les yeux composés à savoir un grand champ visuel pour une extrême compacité. Ainsi, l'œil composé CurvACE offre un champ visuel panoramique horizontal de 180° et vertical de 60° pour une taille de seulement 15mm de diamètre, pour une consommation de quelques milliwatts et pour une masse de l'ordre d'une pièce de 2 centimes. Le capteur CurvACE devrait exister aussi sous forme planaire, sphérique ou de forme plus ou moins arbitraire pour des applications allant de la stabilisation d'un robot aérien, en passant par

la navigation, jusqu'à l'aide aux personnes à la vision déficiente. Il est aussi prévu une version dite active (basée sur la version cylindrique) car subissant des vibrations plus ou moins périodiques permettant d'améliorer grandement son acuité pour la localisation d'objets contrastés (propriété d'hyperacuité). Cette partie est largement décrite au chapitre 4 suivant.



FIGURE 26.: Premier oeil composé courbe fonctionnel réalisé dans le cadre du projet Européen CurvACE (www.curvace.org). Ce capteur intègre une matrice de pixels auto-adaptatifs et leurs micro-optiques de manière à former une juxtaposition d'ommatidies selon une courbe cylindrique. D'après Floreano et al. [2013].

Capteurs de flux optique bio-inspirés

Depuis les travaux de Reichardt et Hassenstein (rev. Borst [2000]) sur lla vision du mouvement chez l'insecte, nous savons que cette vision est intimement liée à la mesure du flux optique par des neurones détecteurs spécialisés. Indépendamment de la manière dont il est mesuré, le flux optique, notamment le flux optique de translation, présente des propriétés remarquables car il dépend du rapport entre la vitesse d'avance de l'observateur et de la distance aux objets (cf. figure 17) : c'est une *vitesse angulaire*. Par conséquent, le flux optique qui est parfaitement caractérisé d'un point de vue mathématique (Koenderink and Doorn [1987]), a donné lieu à maints algorithmes (rev. Barron et al. [1994]) et capteurs pour le mesurer. Les capteurs de flux optique basés sur un corrélateur (par exemple Harrison and Koch [1999]) et sur un schéma appelé "time-of-travel" (Pichon [1991]) ont donné lieu à de nombreuses applications robotiques. Contrairement à une approche basée sur des traitements d'images, le flux optique présente trois avantages :

• il est bien adapté au pilotage visuel d'un engin dans le but de mettre en œuvre des stratégies d'évitement d'obstacles, de suivi de terrain, d'atterrissage...

• il est lié à une vision dite "de bas niveau" nécessitant relativement peu de ressources calculatoires (pas besoin de reconnaître des formes). Contrairement à des approches basées sur le traitement d'images et souffrant de leur complexité, plus l'environnement visuel sera riche en contraste et plus la mesure du flux optique sera précise (Albus and Hong [1990]).

A l'instar du neurone détecteur élémentaire de mouvement H1, le capteur DEM, mis au point au laboratoire délivre un signal sous la forme d'une impulsion dont l'amplitude est proportionnelle à la vitesse de défilement du contraste (Pichon et al. [1989],Blanes [1991], Ruffier et al. [2003]). De plus, le DEM peut être configuré pour n'être sensible qu'à un seul sens de déplacement du contraste (sens préféré) et à un seul type de transition de contraste (blanc-noir ou noir blanc). Un circuit DEM complet fournit un signal pour chaque type de transition et pour chaque sens de déplacement, donc au total 4 signaux indépendants, comme cela a été montré chez la mouche (Franceschini et al. [1989]) et récemment confirmé chez la drosophile par des techniques génétiques et électrophysiologiques qui ont montré la séparation des voies ON et OFF au niveau des cellules L1 et L2 de la la lamina (Joesch et al. [2010]).

Détaillons maintenant l'ensemble des 9 étapes du traitement DEM originel commandé par deux photorécepteurs adjacents (cf. figure 27) :

- Échantillonnage spatial, caractérisé par l'angle inter-récepteur Δφ : Les informations d'intensité lumineuse spatiale en fonction de φ (position angulaire de n'importe quel point de la scène visuelle par rapport à l'axe optique) sont échantillonnées par 2 photorécepteurs séparés spatialement d'un angle Δφ
- Filtrage spatial passe-bas à l'aide d'une lentille défocalisée associée à chaque photorécepteur et lui conférant une sensibilité angulaire de type quasi-gaussien,

Le flux optique, c'est-à-dire la vitesse angulaire relative de l'œil par rapport à l'environnement, transfère dans le domaine temporel les informations spatiales de contraste :

$$\Delta t = \frac{1}{\omega} \cdot \Delta \varphi \tag{2.14}$$

De ce fait, le décalage spatial $\Delta \varphi$ est transformé en un décalage temporel Δt . Ainsi, le signal visuel produite par le mouvement relatif d'un contraste à la vitesse angulaire ω est retardé d'un temps Δt en sortie du second photorécepteur par rapport à la sortie du premier photorécepteur.

La figure 27 montre le schéma de principe d'un circuit DEM dont les étapes de traitement du signal sont :

- Photodétection (fonction de transfert des photorécepteurs), Cette détection est logarithmique dans le DEM originel pour conserver une amplitude de signal relativement constante, indépendamment de la luminance de l'environnement,
- Filtrage passe-haut temporel du 1er ordre (fréquence de coupure 16Hz), à l'aide d'un circuit RC sur chacune des deux voies pour éliminer la composante continue (cf. figure 27),
- Filtrage passe-bas temporel du 3ème ordre (fréquence de coupure 28,5Hz), à l'aide de circuits RC sur chacune des voies pour éliminer le bruit (notamment

la composante alternative à 100Hz provenant de l'éclairage ambiant d'intérieur) (cf. figure 27),

- Circuit à seuil pour séparer les fronts Noir-Blanc (appelé front ON) et Blanc-Noir (appelé front OFF) et génération d'une impulsion sur chacune des voies, attestant de la détection d'un contraste. Cette séparation permet de dédoubler les voies et de créer 2 voies ON et OFF pour chaque photorécepteur. Ainsi, les étapes suivantes du traitement DEM sont réalisées à la fois pour les voies ON et pour les voies OFF.
- Génération, sur la voie 1, d'une exponentielle décroissante de longue durée (plusieurs centaines de milli-secondes) déterminant ainsi la gamme de retard Δt considérée, et par conséquent la gamme de mesure du DEM (cf. figure 27),
- Génération, sur la voie 2, d'une impulsion unitaire très courte, qui se trouve « naturellement » retardée de Δt (cf. figure 27),
- Échantillonnage de l'exponentielle de la voie 1 par l'impulsion de la voie 2, (au moyen d'un circuit à diodes) permettant ainsi d'approximer ω suivant l'équation IV.4 (cf. figure 27).



FIGURE 27.: Étapes du traitement DEM Détecteur Elémentaire de Mouvement (DEM) original (Pichon et al. [1989]). Le DEM estime le flux optique ω à partir des signaux des deux photorécepteurs Ph₁ et Ph₂, qui se trouvent naturellement décalés dans le temps de Δ t. D'après Viollet and Franceschini [2001].

Par la suite nous avons discrétisé certaines étapes du traitement du signal tel que le filtrage passe-bas d'ordre 3, de manière à les mettre en oeuvre sur un microcontrôleur et à bénéficier ainsi d'une forte intégration des différentes fonctions et de beaucoup plus de souplesse d'ajustement.

Le circuit DEM constitue véritablement la clé de voûte de tous les traitements sensorimoteurs mis en œuvre à bord de nos robots. C'est pour cette raison que nous nous sommes efforcés de le faire évoluer pour le rendre compatible avec la faible capacité d'emport des robots aériens OSCAR et OCTAVE (Viollet and Franceschini [2001], Ruffier and Franceschini [2005]). Le tableau 1 résume les différentes évolutions du circuit DEM, la dernière version est issue d'une collaboration fructueuse avec le laboratoire de micro-électronique d'Oulu en Finlande (Pudas et al. [2007]).

La figure 28 montre l'évolution du circuit DEM depuis la version originelle de 1989 jusqu'à la version en technologie "céramiques co-cuites à basse température" (LTCC), utilisée notamment par Nokia dans ses téléphones portables.

| Circuit | DEM | original | Circuit | DEM | hybride | Circuit | DEM | LTCC |
|----------------------|-----|----------|----------------------|-----|---------|--------------------|-----|------|
| (1989) | | | (2003) | | | (2005) | | |
| 40x30mm ² | | | 20x20mm ² | | | 7x7mm ² | | |
| 50mW | | | 40mW | | | 40mW | | |
| 2,5g | | | 0,8g | | | 0,2g | | |

 TABLE 1.: Comparaison entre les différents circuits DEM mis en oeuvre avec diverses technologies.



FIGURE 28.: Evolution entre le circuit DEM originel de 1989 (à gauche) et une version de 2005 (à droite) réalisé en collaboration avec l'Université d'Oulu en Finlande.

La figure 29 montre une version dite hybride du DEM, que nous avons réalisée en 2003 (ISCAS). Cette version a été pour nous un tournant car elle a permis de passer d'un traitement entièrement analogique à un traitement mixte basé sur un pré-traitement des signaux visuels analogiques et sur un filtrage et une mesure de flux optique discrétisés (micro-contrôleur 8 bits de 3x3mm).



FIGURE 29.: Capteur DEM dans sa version hybride où le traitement des signaux visuels se fait de manière analogique et numérique. D'après Ruffier et al. [2003].

Dans le cadre du projet ANR EVA, nous avons développé et réalisé un nouveau DEM basé, cette fois, sur une rétine du commerce (capteur LSC, société IC-Haus) composée de 6 pixels. Ce nouveau capteur, dont la masse ne dépasse pas 2 grammes (avec optique) et la consommation 100mW (avec micro-contrôleur de type dSpic) intègre 5 capteurs de flux optique de type DEM.

Nous avons aussi poursuivi un travail d'intégration en technologie micro-électronique analogique (analog VLSI) grâce à un travail collaboratif avec le Centre de Physique des Particules de Marseille. Un premier circuit, appelé APIS, issu de cette collaboration, nous a permis de caractériser l'utilisation de pixels auto-adatatifs de type Delbrück (Delbruck and Mead [1994]) pour la mesure du flux optique sous différents niveaux d'éclairement. Nous avons donc du mettre en place une procédure de caractérisation, sorte de benchmark, pour la caractérisation de capteurs de flux optique en environnement réel, intérieur et extérieur présentant de fortes variations d'éclairement (Viollet and Franceschini [2010] et Expert et al. [2011]). La caractérisation et la calibration étaient faites en comparant la mesure de la vitesse angulaire par le capteur optique avec celle mesurée par un gyromètre. Le capteur APIS montré dans la figure <u>30</u> est composé d'une rétine de 5x5 pixels auto-adaptatifs, un multiplexeur analogique et un convertisseur-analogique-parallèle 10 bits. Les sorties analogiques de chaque pixel sont aussi disponibles directement.

Les résultats que nous avons obtenus en comparant les caractéristiques statiques et dynamiques des capteurs LSC et APIS dans un environnement naturel (cf. figure 31) montrent que le capteur LSC est plus précis que le capteur APIS (Viollet and Franceschini [2010], Expert et al. [2011]). Cependant, le capteur LSC étant dépourvu de pixels auto-adaptatifs, le capteur APIS permet de mesurer le flux optique dans une gamme d'éclairement beaucoup plus grande (3 décades pour APIS contre 1,5 décades pour le LSC). Afin d'améliorer les performances de nos capteurs de flux optique, nous devrions nous orienter vers de futures pistes concernant notamment les rétines artificielles dont les amplificateurs connectés aux photodiodes reproduisent



FIGURE 30.: Caractérisation des capteurs DEM de flux optique basés sur une rétine de photodiodes du commerce (capteur LSC IC-Haus) et sur un circuit dédié (capteur APIS) réalisé en collaboration avec le CPPM. a) Dessin du banc de test permettant à la carte supportant les capteurs de tourner à une vitesse angulaire fixée.
b) Description de la carte éléctronique incluant en plus des capteurs de flux optique, un module Bluetooth pour la télémétrie, un capteur d'éclairement et un gyromètre sur son autre face (non montré). c) Assemblage optique miniature utilisé pour le capteur APIS. Une défocalisation volontaire permet d'obtenir la sensiblité angulaire décrite précédemment (cf. figure 2). d) Capteur APIS réalisé en technologie micro-électronique analogique (XFAB 0.35µm). D'après Expert et al. [2011].

la courbe de sensibilité au contraste inspirée de celle des vertébrés (Delbruck and Mead [1994], Beaudot [1996] et Sicard et al. [1999]). S'il nous est possible de disposer d'un signal proportionnel au niveau d'éclairement alors l'utilisation de ce type de fonction non-linéaire peut s'avérer très prometteuse.



FIGURE 31.: Image des environnements naturels avec lesquels nous avons caractérisé les capteurs de flux optique APIS et LSC. a) Environnement intérieur. b) Environnement extérieur. c) Banc de test complet. Les flèches indiquent les distances aux objets par rapport aux capteurs. D'après article Expert et al. [2011].

2.1.2 Les ocelles

côté VIVANT Les ocelles sont des capteurs optiques placés sur la partie dorsale de la tête des insectes. Extérieurement, ils se distinguent par 3 larges lentilles (de diamètre 100µm à 500µm, figure 32), chacune d'elles coiffant une petite rétine de quelques centaines de photorécepteurs. On les trouve chez tous les insectes ailés et ils sont particulièrement larges chez les insectes nocturnes. Mis en évidence voici 300 ans, ils ont livré un de leurs secrets vers 1980 seulement quand on a montré qu'ils permettaient à certains insectes (les libellules) de détecter l'horizon (Taylor and Krapp [2007]). Ces insectes le font grâce à une rétine ocellaire très sensible au proche ultra-violet, ce qui accentue la ligne de contraste entre ciel et terre. Les signaux électriques issus des cellules photoréceptrices en question convergent vers un petit nombre de neurones relais, qui vraisemblablement participent à la correction d'attitude de l'animal en tangage et en roulis (Hengstenberg [1993]). Il est aussi intéressant de noter que le traitement neuronal associé aux ocelles est plus rapide que celui associé à l'oeil composé car Hengstenberg a montré que le réflexe de compensation de la tête est plus rapide lorsqu'il implique uniquement les ocelles (Schuppe and Hengstenberg [1993]). Cependant, il faut nuancer ce résultat car Hengstenberg a aussi montré que l'amplitude de compensation de la tête est beaucoup plus faible lorsqu'elle est déclenchée par les ocelles que lorsqu'elle repose sur l'oeil composé uniquement. Ce résultat va à l'encontre de ce qui a été découvert chez la libellule ou le cricket et remet en cause le rôle des ocelles pour la stabilisation du roulis chez la mouche. Il reste donc à découvrir un comportement plus systématique liés aux ocelles et à comprendre les mécanismes neuronaux sous-jacents. Enfin, il semble que

chez la libellule (Berry et al. [2007]), les neurones de type L des ocelles seraient capables de mesurer des variations de luminance au voisinage de l'horizon, offrant à l'animal des informations supplémentaires aux seules inclinaisons en roulis et en tangage.



FIGURE 32.: Vue dorsale d'une partie de la tête de la mouche bleue Calliphora (les 3 ocelles sont indiqués par des têtes de flèche). D'après Schuppe and Hengstenberg [1993]

côté ARTIFICIEL Des sortes d'ocelles artificiels ont été proposés dans le domaine du modélisme où la stabilisation visuelle par rapport à l'horizon a donné lieu à la commercialisation d'un certain nombre de capteurs tels que le capteur PA-2 de chez Futaba (cf. figure 33). Des travaux récents (Chahl and Mizutani [2012]) ont montré qu'il était possible de stabiliser optiquement un véhicule aérien à voilure fixe en utilisant 4 paires de photodiodes ayant deux sensibilités spectrales différentes (vert et ultraviolet) Mais la plupart du temps, la stabilisation en assiette (tangage et roulis) se fait par mesure inertielle combinant à la fois inclinomètre, gyromètre et magnétomètre (Inertial Measurement Unit).



FIGURE 33.: Capteur de type ocelles artificielles composé de 4 paires de photodiodes sensibles dans le vert et l'ultraviolet. D'après Chahl and Mizutani [2012].

2.1.3 Les capteurs infra-rouge

côté vivant Certains coléoptères sont capables de détecter des feux de forêt à plusieurs kilomètres de distance. La femelle s'intéresse en effet à pondre ses œufs sur l'écorce encore fumante des arbres, où ses larves se développeront à l'abri des prédateurs (ces insectes sont dits pyrophiles). Elle possède pour ce faire, à la partie ventrale du thorax un « œil à infra-rouge » particulier donc le pic de sensibilité se situe à une longueur d'onde voisine de 3μ m (Schmitz and Bleckmann [1998]). le spectre d'émission d'un feu de forêt se situe précisément autour de 3μ m - longueur d'onde qui correspond par ailleurs à une bonne fenêtre de transmission dans l'atmosphère terrestre. La figure 34 montre une photo au microscope électronique à balayage des récepteurs infra-rouge d'un coléoptère *Melanophila*.



FIGURE 34.: Récepteurs infra-rouge du coléoptère Melanophila.

Les cellules « photoréceptrices » en question ne sont nullement des capteurs quantiques (comme le sont les photorécepteurs de l'oeil composé et des ocelles) mais plutôt des capteurs bolométriques. Ce sont en effet des neurones *mécanorécepteurs* sensibles à la dilatation d'une structure : l'énergie absorbée dilate une sphérule de cuticule, excitant par là-même les dendrites des cellules mécano-réceptrices qui l'entourent.

côté ARTIFICIEL II existe plusieurs projets de réalisation de bolomètres artificiels inspirés de ceux des coléoptères tels le *Melanophila*. Le principe repose sur une microcavité renfermant un fluide et tapissée de mécano-récepteurs mesurant une microdéformation mécanique de la cavité : la déformation provenant d'un changement de pression du fluide dû à l'exposition aux infra-rouges. Il y a une quinzaine d'années, ce principe biomimétique reposant sur une conversion rayonnement-pression a pu être reproduit artificiellement sous forme de cellules dites de Golay grâce à une technologie "micro-systèmes" (Yamashita et al. [1997]). Ce principe de Golay pour la mesure de rayonnements infra-rouge a été publié en 1947 donc, bien avant les premières études sur les bolomètres naturels ! Ce type de cellule met en oeuvre une micro-cavité remplie d'un gaz, la variation de pression due au rayonnement infrarouge est mesurée grâce à la micro-déformation mécanique d'une micro-électrode qui se traduit soit par une variation de capacité, soit par une mesure directe de la déformation. Plus récemment, Schmitz *et al.* ont publié une étude complète sur un capteur biomimétique infra-rouge (cf. figure 35) reprenant le modèle de la cellule de Golay (Schmitz et al. [2012]).



FIGURE 35.: (Gauche) récepteurs infra-rouge d'un coléoptère *Melanophila*.. (Droite) Schéma d'un capteur infrarouge inspiré de ceux du coléoptère et reposant sur le principe de Golay. D'après Schmitz et al. [2012].

2.2 LES CAPTEURS INERTIELS : LES BALANCIERS

CÔTÉ VIVANT Il existe à la partie postérieure des 2 ailes de tout diptère, une paire d'organes « vestigiaux », les balanciers, qui ont déjà fait couler beaucoup d'encre (rev. Hengstenberg [1998]). La figure 36 montre l'emplacement de ces organes, dont le rôle est fondamental. On sait depuis 65 ans, en effet, que les balanciers sont à la mouche ce que le gyromètre est à l'avion. Oscillant à la même fréquence que les ailes mais en opposition de phase, ils sont sensibles à la force de Coriolis et subissent une déformation lorsque la mouche effectue une rotation selon chacun de ses trois degrés de liberté en rotation. Grâce à un positionnement judicieux (oblique) de leur plan d'oscillation, ces balanciers sont aussi sensibles à une rotation autour de l'axe de roulis. Tout comme les ocelles, ces capteurs jouent un rôle fondamental dans les réflexes de stabilisation du vol mais aussi dans ceux qui contrôlent à chaque instant l'orientation de la tête par rapport au corps (fixation visuelle, saccades...). Chez la mouche Calliphora, une vitesse maximale de rotation du corps en roulis de $1000 \circ / S$ peut être compensée par une rotation inverse de la la tête (cf. chapitre 3). De nombreuses études ont essayé de déterminer si les balanciers sont plus sensibles à une accélération ou une vitesse angulaire (Hengstenberg [1998]). Il semble très probable que les balanciers sont sensibles à une vitesse angulaire. Même si le signal nerveux des sensilles campaniformes, présents à la base des balanciers, ne semble pas coder directement une vitesse angulaire.

Des capteurs biologiques analogues aux balanciers ont été observés chez d'autres espèces que les diptères. Contrairement aux diptères qui ont perdu la paire d'aile arrière, le Strepsiptera a perdu sa paire d'ailes antérieures Pix *et al.* ont montré que la paire d'organe restant chez le mâle a la même fonction que les balanciers des diptères (Pix et al. [2000]). Plus récemment, Sane *et al.* ont avancé l'hypothèse que les antennes du papillon sphinx *Manduca Sexta* pouvaient aussi mesurer la force de Coriolis à la manière des balanciers (Sane et al. [2007]). Cette hypothèse est probablement à réfuter car même si l'organe de Johnston, present dans l'antenne, se trouve aussi chez le papillon, l'amplitude des oscillations des antennes du papillon est négligeable par rapport à celles des balanciers des diptères (la fréquence de battement des ailes des papillons est bien inférieure à celle des mouches). Il parait plus probable que les antennes des papillons soient sensibles à des accélérations angulaires de grande amplitude.



FIGURE 36.: Illustration des deux balanciers post-alaires de la mouche, oscillant dans un plan vertical. Lors de toute rotation du corps de l'animal en tangage, roulis ou lacet, les forces de Coriolis induites produisent une déflexion du plan d'oscillation de chaque balancier. Cette déflexion est mesurée par des neurones mécanorécepteurs cuticulaires placés à sa base, dont le nombre a été évalué à 335 chez la mouche bleue (Hengstenberg [1998]).

côté ARTIFICIEL Depuis une vingtaine d'années, poussée principalement par l'industrie du jeu et du téléphone mobile, la technologie MEMS (Micro ElectroMechanical Systems) a connu un essor considérable. Cette technologie a donné naissance, entres autres, à des micro-capteurs inertiels de type accéléromètre et gyromètre dont les applications sont innombrables, allant de la manette de jeu, en passant par les appareils photos, téléphones portable et autres tablettes graphiques jusqu'au robots mobiles de tous types pour lesquels la mesure de l'attitude est primordiale, voire vitale (drone, humanoïde..). Des entreprises telles qu'Analog Devices, Murata, ST Microelectronics ou encore Invensense sont des acteurs incontournables du marché des micro-capteurs inertiels de type MEMS. Le principe sur lequel repose tous ces capteurs est très similaire à celui des balanciers de la mouche. La figure 37 illustre le principe de la mesure de vitesse angulaire basé sur une mesure de la force de Coriolis.



FIGURE 37.: Illustration de l'effet de la force de Coriolis sur une masse oscillante placée dans un cadre lui-même soumis à un mouvement de rotation. La flèche orange indique la force appliquée sur la structure. Adapté d'Analog Devices.

Considérons une masselotte de masse m vibrant (double flèches verticales sur la figure 37) à une fréquence ω dont la position x_m est donnée par l'équation suivante :

$$x_{\rm m} = A\omega \cos(\omega t) \tag{2.15}$$

Si cette masselotte est placée entre deux autres ressorts dans un cadre (cf. figure 38) soumis à une vitesse angulaire Ω , alors la position du cadre, notée y_c, est donnée par l'équation suivante :

$$y_{c} = \frac{F_{c}}{k} = \frac{2m\Omega A\omega cos(\omega t)}{k}$$
(2.16)

avec F_c la force de Coriolis et k la raideur des ressorts perpendiculaires à la direction d'oscillation de la masselotte.

2.3 LES AUTRES CAPTEURS PROPRIOCEPTIFS

La mouche dispose à la base de son cou de capteurs appelés organes prosternaux (cf figure 39a). Ces mécanorécepteurs permettent à l'animal de mesurer finement la position de sa tête par rapport à son corps. Ainsi, la mouche peut compenser une rotation de son corps par une rotation de sa tête (cf figure 39b).

La figure 40 illustre le principe de la mesure de l'orientation de la tête par rapport au corps en roulis et en tangage grâce aux organes prosternaux.

La mouche en situation de marche a développé une stratégie élégante pour mesurer l'orientation de la gravité. Cette stratégie est basée sur la charge appliquée sur les pattes de l'animal. La figure **41** illustre ce principe.



FIGURE 38.: Layout d'un gyromètre dont le principe repose sur la mesure de la force de Coriolis à la manière des balanciers de la mouche. Photo Analog Devices.



FIGURE 39.: (a) Photographie de l'organe prosternal placé à la base du cou chez la mouche, et constitué de fines soies innervées. Lors d'une stimulation dissymétrique des deux organes, droit et gauche, (cas du milieu de la figure 2.3b), on peut observer le déclenchement d'une saccade de rotation de la tête autour de l'axe de roulis dans le sens opposé à la stimulation. Ces organes sont de véritable capteurs de position angulaire, renseignant l'animal sur l'orientation de sa tête par rapport à son corps. D'après Hengstenberg [1998].



FIGURE 40.: Représentation schématique de la cinématique du fonctionnement des organes prosternaux. Lorsque la tête tourne autour de l'axe de tangage (pitch), les deux sclérites appuient simultanément dans le même sens sur les soies innervées. Lorsque la tête tourne autour de l'axe de roulis, les deux sclérites appuient en différentiel sur les soies. D'après Preuss and Hengstenberg [1992].



FIGURE 41.: Lorsqu'une mouche fixée par le thorax doit porter son propre poids (boule de polystyrène expansé placée entre ses pattes), la mouche est capable de compenser un changement d'orientation de son corps par une rotation de sa tête autour de l'axe de roulis. La gravité affecte de façon différentielle ses pattes ipsi- et contralatérales, renseignant ainsi l'animal sur l'orientation du vecteur gravité. Si, au contraire, la boule est supportée par deux pivots, la mouche ne compense plus de la tête : ses pattes ne supportent plus aucune masse : elle n'a plus d'information sur l'orientation du vecteur gravité (rev. Hengstenberg [1993]).

2.3.1 Les antennes

côté VIVANT Les antennes des insectes sont des organes complexes dont la fonction et la place dans les traitements sensori-moteurs réalisés à bord de l'animal sont encore mal compris et certainement sous-estimées. Dans leur revue sur les capteurs des insectes et leurs fonctions, Krapp et Taylor (citation) consacrent une partie conséquente de leur article à l'anatomie et à la fonction des antennes dans les boucles sensori-motrices servant à stabiliser le vol. La figure 42 montre les différence anatomiques existant entre les antennes des diptères, telle la mouche *Calliphora*, et la forme flagellaire plus primitive des antennes du criquet pellerin *Schistocerca*.



FIGURE 42.: Anatomie de l'antenne de la mouche Calliphora et du cricquet Schistocerca.

Dans leurs parties communes, les antennes sont composées d'un scape, d'une scapule, d'un pédicelle et d'une flagelle. Les articulations entre le scape et la scapule et entre la scapule et le pédicelle sont actionnées par des muscles. Le scape et le pédicelle sont aussi couverts de nombreuses soies qui sont souvent placées à des endroits stratégiques faisant de ces soies de parfaits mécanorécepteurs pour mesurer les rotations de chaque articulation. L'articulation entre le pédicelle et la flagelle est toujours passive, donc dépourvue de muscles.

Les antennes semblent être impliquées dans la mesure de la vitesse de l'insecte par rapport à l'air car lors du vol, les antennes s'orientent automatiquement de manière à minimiser la force de trainée aérodynamique s'appliquant sur leurs flagelles. Il existe donc une boucle sensori-motrice agissant sur l'orientation des antennes de manière à minimiser la surface de contact avec le flux d'air. Il semble que l'articulation passive entre le pédicelle et la flagelle joue un rôle primordial pour la proprioception car si cette articulation est bloquée, le réflexe de positionnement de l'antenne ne fonctionne plus (voir article Krapp et Taylor).

La figure 43 montre un modèle de réflexe de positionnement des antennes sous forme de schéma bloc, qui rend compte du mieux possible de la neuro-anatomie de la mouche *Calliphora* et de l'insertion de ce réflexe (boucle interne) dans une boucle de contre-réaction externe servant à réguler la vitesse d'avance de la mouche par rapport à l'air.



FIGURE 43.: Modèle du système de commande des antennes en vol chez la mouche *Calliphora*. Le système sensori-moteur (AMMC) agit sur l'angle α entre le pédicel et le scape de manière à minimiser la déflexion de l'antenne β. Les organes de Johnston recevant comme entrée l'angle β seraient impliqués dans une boucle externe de contre-réaction agissant sur les muscles des ailes de manière à réguler automatiquement la vitesse de l'animal par rapport au vent. D'après Taylor and Krapp [2007]

CÔTÉ ARTIFICIEL A priori, il n'existe pas, pour l'instant, de capteur artificiel de vitesse de l'air se basant sur le principe biologique décrit dans ce paragraphe. Cependant, des pistes peuvent être creusées notament au niveau de l'organe de Johnston qui, par sa sensibilité extrême basée sur une micro-vibration des antennes, ouvre des perspectives intéressantes pour l'étude de nouveau type d'anémomètre.

46 | CAPTEURS CHEZ L'INSECTE AILÉ

2.4 RÉSUMÉ

Dans ce chapitre, nous avons fait un tour d'horizon des différents capteurs permettant aux insectes ailés de se stabiliser et de naviguer en toute sécurité dans un environnement inconnu dont les obstacles peuvent être stationaires ou non. Comme nous avons pu le voir, la vision joue bien sur un rôle prépondérant dans toutes les boucles sensorimotrices mises en oeuvre à bord de l'animal. Il est même assez déroutant de constater que cette vision, de par ses caractéristiques optiques, est très grossière, notamment chez la mouche, en termes de résolution et de sensibilité au contraste. Néanmoins, n'oublions pas qu'il est certainement beaucoup plus important pour une mouche d'éviter des obstacles et de repérer un congénère que d'admirer le détail d'une peinture ou le piqué d'une photo. La vision des insectes est principalement dédiée à la détection du mouvement où il est important d'avoir un temps de réponse rapide des photorécepteurs et de limiter les erreurs de mesure (filtrage passe-bas spatial). La détection du mouvement est intimement liée à la mesure du flux optique, qui s'assimile à la mesure d'une *vitesse angulaire*. De nombreuses études, menées côté vivant et artificiel, ont permis d'avancer à grand pas dans la compréhension de la mesure du flux optique et de son utilisation pour le pilotage d'un animal (mouche, libellule...) ou d'un engin volant ayant besoin de décoller et atterrir automatiquement, suivre le relief, éviter des parois... Même s'il est indéniable que l'oeil composé des insectes est extrêmement performant pour la mesure de la vitesse de défilement des objets contrastés (flux optique), la mesure de la position angulaire de ces mêmes objets semble tenir un rôle tout aussi important, notamment lors de tâches de poursuite et de vol stationnaire. La précision (acuité) de la mesure de la position angulaire d'un objet contrasté est liée directement à la résolution optique du capteur de position. On peut donc à ce que l'acuité d'un oeil composé soit relativement mauvaise comparée à celle d'un oeil camérulaire impliquant plusieurs millions de photorécepteurs (pixels). Cela serait sans doute vrai s'il n'existait pas un procédé de vision active basé sur une micro-vibration rétinienne. Nous verrons dans le chapitre 4 que ces micro-mouvement rétiniens sont loin d'être négligeables.

3 STRATÉGIE BIO-INSPIRÉE DE PILOTAGE PAR LE REGARD

| MATIÈR | ES | | | | | |
|--------|--|--|--|--|--|--|
| | 3.0.1 | Stabilisation de la tête chez l'insecte ailé 49 | | | | |
| | 3.0.2 | Mouvement tête-corps et contrôle de l'orientation 54 | | | | |
| 3.1 | 1 Stabilisation du regard chez le robot OSCAR 58 | | | | | |
| 3.2 | Pilotage par le regard du robot OSCAR 59 | | | | | |
| | 3.2.1 | Pilotage du cap par l'orientation de l'oeil 59 | | | | |
| | 3.2.2 | Pilotage du cap par recopie du signal de commande de l'oeil 62 | | | | |
| | 3.2.3 | Changement de cap : aller où le regard se pose 64 | | | | |
| 3.3 | Résum | é 64 | | | | |
| | | | | | | |

3.0.1 Stabilisation de la tête chez l'insecte ailé

L'étude de la stabilisation de la tête par rapport au corps autour de l'axe de roulis a fait l'objet de nombreuses expériences. Dans beaucoup d'études se basant sur un simulateur, la tête de l'animal était rendue solidaire du corps par une goutte de cire. Or la mouche dispose d'un cou portant la tête, c'est-à-dire la « plate-forme visuelle ». Pas moins de 23 paires de muscle contrôlent à chaque instant l'orientation de la tête par rapport au corps, en tangage (Hengstenberg [1993]), roulis (Hengstenberg [1993]) et lacet (Liske [1977]), et ils reçoivent des signaux non seulement des yeux mais aussi des deux balanciers post-alaires, dont la fonction de « gyroscopes oscillants » a été décrite au paragraphe 2.2. Des travaux menées chez la mouche soldat noire (Hermetia illucens) ont montré que les nerfs des organes prosternaux situés à la base du cou répondent à des stimulations de rotation de la tête de $\pm 40^{\circ}$ en tangage, $\pm 30^{\circ}$ en lacet et $\pm 180^{\circ}$ en roulis. Ces travaux ont aussi montré que cet insecte était capable de tourner volontairement sa tête en tangage de 30° en 30ms environ (Paulk and Gilbert [2006]). Ce résultat est à rapprocher de travaux menés chez la mouche Sarcophaga : la tête de la mouche en marche est capable de rejeter une perturbation rotation de 35° en roulis en moins de 300ms (Gilbert and Bauer [1998]). Dans ce dernier cas, l'élasticité du cou permet à la mouche de rejeter environ 40% de la perturbation, le reste étant compensé de manière active. Il existe une grande différence de dynamique (facteur 10) existant entre une rotation volontaire de la tête et la rejection de perturbation. Dans les année 80, Hengstenberg a construit un dispositif remarquable pour l'étude de la stabilisation de la tête autour de l'axe de roulis. La figure 44 décrit ce dispositif expérimental et montre que la mouche, en présence d'un horizon artificiel stationnaire, compense par une rotation opposée de sa tête la

perturbation de roulis que l'on applique à son corps au moyen d'un micromoteur à courant continu.



FIGURE 44.: Dispositif permettant de mesurer les mouvements tête-corps de la mouche placée en vol au point fixe dans un cylindre horizontal stationnaire ou pouvant tourner dynamiquement. La mouche est soumise à une perturbation de roulis appliquée soit à corps soit à l'environnement, grâce à deux micro-moteurs à courant continu .D'après Hengstenberg [1988].

En imposant une rotation en roulis (cf. figure 45), soit à l'animal (comme c'est le cas ici) soit au panorama, soit aux deux, dans un environnement uniforme (pour mettre hors de cause la vision) puis dans un environnement contrasté, l'auteur a pu disséquer la part relative du système visuel et du gyroscope dans cette réaction de compensation en roulis (Hengstenberg, 1988). La fusion de données visuelles/inertielles conduit ici à des performances dynamiques exceptionnelles, avec des vitesses de rotation de la tête atteignant 2000°/seconde (comparées au 300°/s de l'œil humain). On connaît aujourd'hui avec précision les 10 neurones détecteurs de mouvement qui, de chaque côté de la tête, assurent la détection du flux optique de rotation impliqué dans cette réaction. Les figures 45a et 45c montrent aussi clairement la différence de précision entre une compensation basée uniquement sur une mesure inertielle (condition 3 de la figure 44b) et une compensation fusionnant les deux modalités sensorielles, visuelles et inertielles, rendant la réponse beaucoup plus précise (tracé de la figure 45a). On peut supposer que cette différence de précision provient de la différence des latences existant entre de ces deux modalités qui sont respectivement d'environ 3ms pour les balanciers (Sandeman and Markl [1980]) et environ 20ms pour un neurone tel que HSE, qui répond à un mouvement préféré horizontal de la partie frontale de l'œil vers le latéral droit (Kern et al. [2005]). Chez la mouche bleue, cette latence est d'environ 40ms (Hengstenberg [1993]).

Les travaux menés par Van Hateren et Schilstra (Hateren and Schilstra [1999]) ont permis pour la première fois de mesurer indépendamment les vitesses de rotation de la tête et du corps lors de vols quasi libres de la mouche (l'animal traînait durant le vol un câble ultrafin recueillant le signal de micro-bobines collées sur la tête et sur le corps, cf. 46). Cette méthode décrite dans (Schilstra and van Hateren [1998]) s'inspire de la méthode de la bobine sclérale utilisée depuis 50 ans pour la mesure



FIGURE 45.: Les tracés notés (TP), (PP) et (HR) montrent respectivement la position angulaire du corps, du panorama et celle de la tête par rapport au corps. (a) Le fait que les deux tracés TP et HR soient en opposition de phase montre que la mouche agit ici de manière à maintenir constante l'orientation de sa tête dans l'espace). (b) L'orientation de la tête est en phase avec le mouvement de rotation du panorama, ce qui est cohérent avec la réponse optomotrice où la mouche tente de réduire le mouvement relatif entre la vitesse de rotation de sa tête et celle de l'environnement. (c) Sans stimuli visuel, la tête est quand même en opposition de phase avec le corps, ce qui montre une réponse de compensation ici basée uniquement sur une mesure inertielle (balancier) , donc moins précise (amplitude plus faible) que dans le cas (a) où les deux modalités sensorielles visuelles et inertielles étaient impliquées. D'après Hengstenberg [1988].

des mouvements des yeux chez le singe et l'homme. La grande difficulté de cette méthode appliquée à la mouche réside dans la fabrication des bobine tri-axiales, leur positionnement et leur localisation 3D par détection synchrone.



FIGURE 46.: Mouche bleue avec ses deux bobines tri-axiales, l'une collée sur la tête et l'autre sur le corps pour mesurer les orientations selon les trois rotations en roulis, tangage et lacet. D'après Hateren and Schilstra [1999].

Les résultats obtenus ont permis de quantifier l'efficacité des différents réflexes responsables de la stabilisation de la tête et du corps, et d'analyser la synchronisation tête-corps lors de rotations autour de l'axe de lacet. Un résultat important est que l'animal maintient son regard quasi-verrouillé dans l'espace par épisodes d'environ 150 ms, durée durant pendant laquelle il ne reçoit donc qu'un flux optique dont la composante principale est de translation (cf. figure 47).

Grâce à l'utilisation de caméra rapide à haute résolution, des études récentes menées chez l'abeille (Boeddeker and Hemmi [2009]) et la guêpe de sable (*Bembix*) en vol libre (Zeil et al. [2008]) ont montré que ces insectes hyménoptères, dépourvus de balanciers, donc a priori de gyromètres, sont néanmoins capables de stabiliser leur regard avec une grande précision (cf. figure 48). Ces expériences ont montré que la guêpe des sables maintenait sa tête parfaitement horizontale malgré des rotations de son corps autour de l'axe de roulis pouvant atteindre 180° pour des vitesses angulaires variant entre 2000°/s et 4000°/s (Zeil et al. [2008]). Une fois de plus, ces résultats soulèvent la question du mode de contrôle en fonction du type de mouvement : rejection ou mouvement volontaire.

En 2010, j'ai mené un travail collaboratif avec Jochen Zeil pour tenter de trouver chez la guêpe la preuve d'une compensation tête-corps basée sur une modalité *iner-tielle*, même s'il n'existe pas, à ma connaissance, de fondement anatomique prouvant que la guêpe puisse mesurer une vitesse de rotation de son corps comme le fait la mouche. Ce travail s'inspirant de l'expérience d'Hengstenberg (cf. figure 44), a permis de mesurer pour la première fois des mouvements de compensation tête-corps chez la guêpe, qui prouvent que l'animal stabilise sa tête en vol avec une bonne précision, dans une gamme allant de 0,1Hz à 2Hz. (Viollet and Zeil [2013]). Cependant,



FIGURE 47.: Exemple de trajectoires de la tête (en rouge) et du corps (en bleu) acquises durant un vol libre de 5s, révélant les mouvements de la tête et du corps autour des trois axes de rotation (lacet, tangage, et roulis). La tête (le regard) s'oriente en lacet par saccades rapides laissant place à des phases de stabilisation du regard durant 100-200 ms (Les trajectoires montrées par les flèches noires correspondent à des vues élargies). En tangage et roulis, les rotations de la tête sont beaucoup plus faibles et plus lissées que celles du corps. D'après Hateren and Schilstra [1999].



FIGURE 48.: Mouvements tête-corps chez la guêpe *Bembix* en roulis. La tête (orange) est parfaitement stabilisée et ce en dépit d'une rotation de forte amplitude (±45°) du corps en roulis (bleu) D'après Zeil et al. [2008].

nous n'avons pas pu démontrer l'existence d'une stabilisation de la tête sur la base d'une mesure inertielle, ou en tout cas autre que visuelle. La figure 49 montre le générateur de roulis construit en 2011 au laboratoire afin d'étudier la stabilisation de la tête chez la mouche et le syrphe. Ces travaux se poursuivent notamment chez le syrphe afin de modéliser les lois de commande permettant à l'animal de se stabiliser en vol stationnaire.

3.0.2 Mouvement tête-corps et contrôle de l'orientation

Il existe donc chez la mouche des réflexes visuo-moteurs extrêmement efficaces dont les fonctions, illustrées dans la figure 50, sont :

- de stabiliser le regard pendant le vol,
- de maintenir le cap selon une direction précise et ce, en dépit de diverses perturbations subies pendant le vol.

La fixation visuelle joue un rôle primordial pour le maintien de cap lors de la navigation. Mais elle permet aussi à l'animal de verrouiller son regard sur un endroit précis de l'espace (cible, objet d'intérêt, amer visuel...). C'est précisément ce type de comportement que nous avons mis en œuvre sur le robot OSCAR 2, décrit dans ce chapitre.

Le contrôle de l'orientation de la tête par rapport au corps autour de l'axe de lacet a suscité de nombreuses questions, notamment concernant le rôle de la commande visuelle et de la commande motrice du cou. Les premiers travaux de Land (Nature73) montraient des saccades d'orientation de la tête et du corps avec des mouvement de compensation de la tête lorsque le corps tournait autour de l'axe de lacet. L'étude



FIGURE 49.: (Droite) Schéma du banc expérimental du laboratoire permettant d'étudier les mouvements tête-corps chez l'insecte en vol au point fixe. (Gauche) Syrphe maintenu au point fixe par le thorax.



FIGURE 50.: (a) Changement de cap d'une mouche bleue s'accompagnant d'une rotation du corps autour de l'axe de lacet puis d'une rotation de la tête qui, bénéficiant d'une inertie bien plus faible, atteint la position finale avant le corps (c). Les courbes (d) montrent les mouvements tête par rapport au corps durant un mouvement de roulis, où l'on peut voir que l'orientation de la tête dans l'espace (notée h en rouge) est bien stabilisée, ne varient que d'environ 1° alors que le corps a tourné de plus de 10°. D'après Schilstra and van Hateren [1998].

de Geiger et Poggio en 1977 (Geiger and Poggio [1977]) a montré que l'expérience de 1973 de Land souffrait d'un problème d'inertie non négligeable apportée par l'axe supportant la mouche. Avec un axe très léger monté sur des pivots saphir, ces travaux ont montré que tête et corps tournent de manière indépendante et simultanément lorsque la mouche effectue un changement de cap. Ce point a donné lieu au schéma de commande simplifié de la figure 51 où deux hypothèses fondamentales de commande sont représentées :

- la vision commande l'orientation du cou qui commande à son tour l'orientation du corps,
- la vision commande l'orientation du cou et du corps (copie d'efférence).

Même si les résultats expérimentaux tendent à privilégier la seconde hypothèse où le signal visuel est recopié, ceci n'exclue pas la mise en oeuvre d'une boucle locale au niveau de la commande de l'orientation de la tête via les organes prosternaux (cf. paragraphe2.3) et au niveau du contrôle de l'orientation du thorax via les balanciers.



FIGURE 51.: Représentation schématique de deux lois de commande où (a) la vision commande l'orientation du cou qui, via les organes prosternaux, commande l'orientation du corps ou (b) la vision commande à la fois l'orientation du cou et du corps par copie d'efférence. Les résultats expérimentaux tendent à favoriser le schéma (b) .D'après Geiger and Poggio [1977].

Afin d'étudier les différentes dynamiques entre la tête et le corps, il est aussi intéressant de regarder leurs vitesses de rotation. La figure 52 montre des courbes moyennes (n=667) de saccades de la tête et du corps chez la mouche *Lucilia* en vol. On peut voir que les pics de vitesses de la tête (notée h) et du thorax (noté t) atteignent leur maximum de vitesse angulaire au même instant, privilégiant de ce fait l'hypothèse d'une copie d'efférence du signal envoyé au même instant aux motoneurones des ailes et aux muscles du cou. Nous avons introduit ce type de contrôle en feedforward, discuté par Webb (Webb [2004]), dans notre modèle de la stabilisation de la tête chez la guêpe en vol libre. Dans ce type de modélisation, il nous est apparu fondamental de bien différencier la compensation de la tête en réponse à une perturbation appliquée sur le corps de la compensation en réponse à

un mouvement volontaire de rotation du corps, ce point est d'ailleurs discuté dans le chapitre 5.



FIGURE 52.: Saccades de la tête et du corps chez la mouche *Lucilia* autour de l'axe de lacet. (Haut) Position angulaire de la tête (*h*) et du thorax (*t*) en degré. (Bas) Courbes de vitesse angulaire (en °/s) de la tête et du thorax montrant une parfaite synchronicité des pics de vitesse suggérant une commande commune provenant du système vers le cou et les ailes. D'après Blaj and van Hateren [2004].

Dans leurs travaux concernant la stabilisation en roulis chez le cricket (Hensler and Robert [1990]), Hensler et Robert ont analysé le rôle du découplage tête-corps pour la stabilisation par rapport à l'horizon. Il s'avère que la stabilisation chez l'animal "tête libre" s'accompagne d'oscillation du corps dont l'amplitude est considérablement réduite par rapport à l'animal tête fixée au corps (voir figure 53). Les auteurs suggèrent que non seulement le contrôle de l'orientation de la tête stabilise la vision mais il participe aussi indirectement à la stabilisation du corps.

Notre approche robotique bio-inspirée nous a conduit à reconstruire ou plutôt à construire un démonstrateur robotique pour mieux comprendre les boucles sensorimotrices impliquées dans la stabilisation du regard et dans le contrôle de l'orientation (cap). Nous avons conçu et réalisé un robot, appelé OSCAR 2 qui, comme nous allons le voir, est biomimétique à bien des égards.



FIGURE 53.: Stabilisation par rapport à l'horizon en boucle fermée chez le cricket tête fixe (A) et tête libre (C). Les histogrammes (B,D) montrent clairement une atténuation des oscillations du corps chez l'animal tête libre. L'animal doit compenser ici un biais sur la position de l'horizon égal à 100°. Une erreur statique d'environ 15° montre que l'animal ne compense pas parfaitement le biais. D'après Hensler and Robert [1990].

3.1 STABILISATION DU REGARD CHEZ LE ROBOT OSCAR

Le concept du robot aérien OSCAR 2, montré dans la figure 54, repose sur la mise en œuvre, à bord d'une même plate-forme, d'un œil biomimétique vibrant, dont les propriétés (hyperacuité, *minimum visibile*) seraient identiques à celles de l'œil originel d'OSCAR 1 construit lors de ma thèse de doctorat. Mais la particularité d'OSCAR 2 est de faire appel à des réflexes oculomoteurs de haut niveau, capables de contrôler l'orientation de l'œil par rapport au corps. De tels réflexes existent chez la plupart des animaux (vertébrés et invertébrés) et ils ont été largement analysés au cours des 60 dernières années :

- le réflexe vestibulo-oculaire (RVO) permettant de compenser une rotation du corps (ou de la tête) grâce à une mesure inertielle
- le réflexe de fixation visuelle permettant de maintenir l'orientation de l'œil (regard) verrouillé sur une cible contrastée.
- le réflexe de poursuite fine permettant de suivre du regard, selon un mouvement continu, une cible se déplaçant à une vitesse angulaire relativement faible.
- la saccade oculaire permettant à un animal d'amener rapidement la zone de grande acuité (fovéa) de son œil en direction d'un objet d'intérêt.

Le robot OSCAR 2 est donc biomimétique à maints égards (cf. figure 55) :

- au niveau de son comportement, l'idée étant de piloter l'orientation (cap) du robot selon l'orientation de son regard.
- au niveau de sa structure mécanique globale : découplage œil-tête
- au niveau de la construction de son œil : micro-balayage rétinien introduit par un actionneur piezo-électrique faisant vibrer la rétine de l'oeil



- FIGURE 54.: Représentation conceptuelle 3D du robot OSCAR 2. Grâce à un découplage mécanique œil-corps, analogue à celui présent chez la plupart des animaux mais limité à un seul axe, OSCAR 2 est capable d'orienter son œil indépendamment de son corps. En cas de perturbations affectant son corps, OSCAR 2 maintient d'abord et avant tout son regard verrouillé sur la cible, quitte à réorienter ensuite progressivement son corps dans la direction de son regard.
 - au niveau des capteurs utilisés : visuel, inertiel et proprioceptif afin de mesurer l'orientation de l'oeil dans le référentiel du robot.

Le robot OSCAR 2 est un robot biomimétique à bien des égards notamment au niveau des capteurs qu'il comporte comme illustré dans la figure 55.

La figure 56 montre l'oeil du robot OSCAR 2, composé d'un tube vertical de 10mm de diamètre dans lequel sont insérés un actionneur de type piezo bender (Physik Instrumente PL.128) à l'extrémité duquel est fixée une rétine élémentaire composée de 6 photodiodes en ligne (rétine IC-Haus LSC dont seules les deux photodiodes centrales sont utilisées ici). La rétine est placée derrière une lentille fixe de distance focale égale à 8,5mm. A chaque extrémité du tube de l'oeil, sont placés un axe et une pointe miniature permettant à l'oeil de s'insérer dans un micro-roulement à billes et un micro-roulement conique de manière à ce que l'oeil puisse tourner librement par rapport à son support mécanique.

3.2 PILOTAGE PAR LE REGARD DU ROBOT OSCAR

3.2.1 Pilotage du cap par l'orientation de l'oeil

Dans sa première version publiée dans (Kerhuel et al. [2007]), la conception du système de maintien de cap automatique du robot OSCAR 2 (cf. figure 57) repose sur l'interconnexion de deux sous-systèmes :

• un sous-Système de Commande de Cap (SCC) : il s'agit d'une commande en boucle fermée de la vitesse de rotation du robot autour de son axe de lacet.



FIGURE 55.: Illustration du caractère biomimétique du système oculomoteur du robot OS-CAR 2 tant au niveau de ses capteurs qu'un niveau des ses actionneurs. En plus de son oeil à micro-vibration rétinienne (capteur VODKA) dont le traitement est décrit dans le paragraphe 4.3.3 et dans (Kerhuel et al. [2012]), le robot OSCAR 2 dispose d'un capteur proprioceptif lui permettant de mesurer l'orientation de son oeil par rapport à son corps, à l'image des organes prosternaux de la mouche (cf. 2.3 et de mesurer la vitesse angulaire de son corps, à l'image des balanciers de la mouche (cf. 2.2).



FIGURE 56.: CAO de l'oeil du robot OSCAR 2 montrant par transparance l'actionneur piezo en charge de faire translater la rétine périodiquement derrière une lentille fixe. Comme décrit dans le paragraphe 4.2, cette micro-translation de la rétine a pour effet de faire tourner les axes visuels de chaque photocapteur. La vitesse de lacet du robot est asservie de manière à compenser d'éventuelles perturbations de couple (régulation) et à améliorer le temps de réponse du robot pour un changement de cap (suivi de consigne).

 un sous-Système de Commande du Regard (SCR) : il s'agit d'un système de contrôle de l'orientation de l'œil par rapport au robot. Une fusion est réalisée ici entre une commande U_ν (résultant d'une boucle visuelle) et une commande "feedforward" U_{VOR} provenant du gyromètre.



FIGURE 57.: Schéma bloc du système biomimétique de pilotage de cap du robot OSCAR 2 par la vision. Les angles notés θ_{robot} , θ_{oeil} et θ_{reg} correspondent respectivement à la position angulaire absolue du robot autour de l'axe de lacet (cap), à la position angulaire relative de l'œil par rapport au robot et à la position angulaire absolue de l'œil dans l'espace (le regard). Le regard correspond, par définition, à la somme $\theta_{robot} + \theta_{oeil}$. Le signal de sortie θ_{oeil} du système de commande du regard (SCR) est aussi une consigne pour le système de commande de cap (SCC). Réciproquement, le signal de sortie θ_{robot} du SCC est à la fois une entrée pour le SCR et aussi une perturbation agissant sur l'orientation de l'œil. Ces interconnexions entre les système SCC et SCR, au travers des grandeurs θ_{robot} et θ_{oeil} , traduisent le fait que le regard θ_{reg} pilote l'orientation du robot (le cap), alors même que le robot entraîne l'œil avec lui dans sa rotation. Adapté de Kerhuel et al. [2010].

Même si le pilote automatique de cap décrit dans la figure 57 nous a permis d'atteindre les objectifs voulus en termes de stabilisation du regard et de verrouillage de l'oeil sur une cible, les performances que l'on a obtenues en terme de temps de rejection de perturbation de cap n'étaient pas tout à fait satisfaisantes. La figure 58 montre un exemple de réjection d'une perturbation impulsionnelle générée par une
machine frappant violemment le corps du robot de manière à modifier soudainement son cap. La courbe liée à la position angulaire de l'oeil par rapport au robot θ_{er} montre que l'oeil compense en 0,2s quasiment l'intégralité de la perturbation mais le regard est sorti trois fois du champ visuel de l'œil (égal à ±1.4°), ce qui peut conduire à une perte de la cible .



FIGURE 58.: Réponse du système de verrouillage de cap du robot OSCAR 2 à une forte perturbation de type "claque" appliquée sur le corps du robot. On peut voir que l'oeil θ_{er} compense très rapidement la perturbation de manière à maintenir le regard θ_{gaze} au voisinage de zéro. Même si le temps de rejection est de seulement 0, 2s, le regard est sorti trois fois de la zone ±1.4° correspondant à la faible largeur du champ visuel de l'œil. D'après (Kerhuel et al. [2007])

3.2.2 Pilotage du cap par recopie du signal de commande de l'oeil

Dans une seconde version du contrôleur automatique de cap basé sur l'orientation du regard, décrit dans la figure 59, nous avons proposé un autre schéma de commande plus performant. La principale différence avec le schéma décrit dans la figure 57 se situe au niveau du signal commande C_d qui est dupliqué et envoyé à la foi, comme consigne d'orientation au système de positionnement de l'oeil et comme signal de commande différentielle au robot. Ainsi, la mesure de position de l'oeil par rapport au robot n'est plus utilisée comme consigne du système de commande de cap, ce qui a pour effet de simplifier grandement le schéma de commande mais aussi d'améliorer les performances de rejection de perturbation du système de verrouillage de cap.



FIGURE 59.: Schéma général de contrôle du cap du robot par le regard. Deux boucles de contrôle interagissent. La partie inférieure présente la boucle visuelle et la partie supérieure présente 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 and Enright [2000]) dans laquelle le signal commun (C_d) est à la fois un signal d'erreur pour la boucle (lente) de contrôle de cap, et en même temps 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. D'après (Kerhuel [2009] et Kerhuel et al. [2010])

La figure 60 montre la réponse du robot OSCAR 2 avec son nouveau contrôle de cap décrit dans la figure 59 en réponse à une forte perturbation de type courant d'air (impulsions) envoyé dans l'une des deux hélices.

3.2.3 Changement de cap : aller où le regard se pose

En plus de sa capacité à maintenir son regard verrouillé sur une cible , donc à maintenir son cap constant et ce, en dépit de fortes perturbations aérodynamiques. le robot OSCAR 2 est aussi capable de changer son cap volontairement, ce qui se traduit chez ce robot par un changement de la position de son regard qui se porte sur une autre cible. C'est ce qui fait tout l'intérêt du pilotage par le regard qui à aucun moment ne requiert la connaissance explicite du cap par une boussole ou un magnétomètre par exemple. La figure 61 montre un exemple de changement de cap automatique où le robot OSCAR va porter son regard d'une cible à une autre alternativement (les deux cibles étant séparées de 10°), ce qui va avoir pour effet de modifier automatiquement son cap en direction de l'objet d'intérêt.

3.3 RÉSUMÉ

Aller là où le regard se pose résume la stratégie bio-inspirée que nous avons mis en œuvre pour stabiliser le cap d'un robot aérien. Nous avons vu dans ce chapitre qu'il existe des mécanismes sous-jacents fondamentaux permettant à un insecte ailé tel que la mouche de stabiliser sa tête durant le vol. Nous avons vu que cette stabilisation implique tout d'abord des actionneurs performants et précis, d'ailleurs la mouche ne dispose pas moins de 23 paires de muscles pour contrôler finement l'orientation de sa tête. Ensuite, la stabilisation résulte chez la mouche d'une fusion multi-sensorielle entre une mesure inertielle fournie par les balanciers (cf. paragraphe 2.2), une mesure proprioceptive fournie par les organes prosternaux (cf. paragraphe 2.3) et une mesure visuelle fournie par l'oeil composé et les ocelles (cf. paragraphe 2.1). Afin d'étudier les performances des réflexes oculomoteurs en charges de stabiliser la tête, trois types d'expériences ont été conduites :

- des expériences où l'insecte en vol au point fixe est soumis à des perturbations de roulis
- des expériences où l'animal en vol mais monté sur un axe à faible frottement et inertie peut changer son cap
- des expériences où l'animal est filmé en vol libre

Toutes ces expériences ont non seulement permis de mettre en exergue le rôle fondamental de la stabilisation de la tête, donc de l'information visuelle, mais aussi de montrer le rôle tout aussi fondamental du regard pour piloter l'orientation de l'animal dans l'espace. Dans notre démarche bio-robotique qui consiste à "reconstruire pour mieux comprendre", nous avons mis en oeuvre à bord d'un robot aérien de petite taille une stratégie bio-inspirée de pilotage du cap qui a montré tout l'intérêt pour un robot d'avoir un œil découplé du corps de manière à maintenir le regard verrouillé sur une cible. Nous avons montré que cette stratégie dite de pilotage par le



FIGURE 60.: (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 du robot 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 du robot (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 du champ visuel ($\pm 1.8^{\circ}$), et ce, pendant 400ms (de 0.03s à 0.4s). Par contre, lorsque l'œil est découplé du robot (b), la ligne de regard θ_{qaze} ne s'écarte pas à plus de 1.8° de la cible. La cible est donc toujours maintenue à l'intérieur du champ visuel du robot. 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. D'après Kerhuel [2009] et Kerhuel et al. [2010].



FIGURE 61.: Changement rapide de cap. Le robot OSCAR II est monté sur l'axe d'un resolver de friction négligeable mesurant sa position angulaire. Il est libre de tourner autour de son axe de lacet. Deux cibles (deux bords contrastés) séparés de 16.5cm sont placées face au robot à une distance de 116.5cm. Le cap du robot est verrouillé sur la 1^{er} cible et à chaque seconde, un offset important $(\pm 10^{\circ})$ est ajouté au signal C_d (voir figure 59) pour que le regard (courbe noire : θ_{qaze}) 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}). Le cap du robot (courbe rouge : $\theta_{heading}$) rejoint rapidement la direction du regard, permettant à l'œil de revenir 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 bord contrastés (vus du robot) est de 11°. On voit que malgré une consigne de saccade oculaire légèrement erronée, le système de poursuite visuelle permet au robot de se verrouiller sur la nouvelle cible, comme on peut l'observer pour les saccades oculaires chez l'homme. D'après Kerhuel 2009.

regard permettait d'améliorer les performances du robot pour la rejection de perturbations aérodynamiques de fortes amplitude sans jamais perdre la cible. Enfin, nous avons aussi mis en oeuvre une stratégie originale de pilotage de changement de cap sans jamais disposer d'une mesure absolue du cap du robot mais en autorisant l'oeil à tourner rapidement (saccade) pour changer de cible d'intérêt.

4 HYPERACUITÉ ET MICRO-MOUVEMENTS RÉTINIENS

| MATIÈR | ES | |
|--------|---|--|
| 4.1 | Quelques mots sur les micro-mouvements rétiniens naturels 69 | |
| | 4.1.1 Micro-mouvements rétiniens chez la mouche 69 | |
| 4.2 | Modélisation d'un oeil élémentaire à micro-balayage 71 | |
| | 4.2.1 Modélisation de l'optique 71 | |
| | 4.2.2 Modélisation des signaux visuels 75 | |
| 4.3 | Traitements des signaux temporels : Deux approches 76 | |
| | 4.3.1 Approche par codage du retard : Capteur OSCAR 76 | |
| | 4.3.2 Nouvel éclairage sur le capteur OSCAR 80 | |
| | 4.3.3 Approche par traitement de l'amplitude : Capteur VODKA 82 | |
| 4.4 | Résumé 87 | |

4.1 QUELQUES MOTS SUR LES MICRO-MOUVEMENTS RÉ-TINIENS NATURELS

Afin de réduire le champ d'étude de ce paragraphe concernant les micro-mouvements rétiniens, j'ai choisi délibérément d'orienter le contenu de ce paragraphe autour d'un seul exemple remarquable dont la modélisation et la mise en oeuvre nous a menés vers une meilleure compréhension du phénomène d'hyperacuité (Westheimer [1981]), c'est-à-dire la capacité d'un capteur visuel (naturel ou artificiel) à *localiser* un objet avec une précision meilleure que celle dictée par l'espacement entre deux photorécepteurs.

4.1.1 Micro-mouvements rétiniens chez la mouche

L'étude des micro-mouvements rétiniens découverts dans l'œil de mouche au laboratoire (Franceschini and Chagneux [1997]) a permis de mettre en lumière un nouveau mécanisme dont l'utilité pourrait être fondamentale lors des phases de fixation visuelle. Ces travaux concernent les mouvements de la rétine de l'œil composé de la mouche *Musca Domestica*. Grâce à deux muscles, notés MOT et MOS (Mücke and Franceschini [1991]), montrés dans la figure 62a, la mouche peut déplacer sa rétine et faire subir une translation aux photorécepteurs. La figure 62b montre un enregistrement de l'activité du muscle MOT, enregistrement qui a pu être effectué sur

70 | hyperacuité et micro-mouvements rétiniens

une mouche en vol libre. La figure 62c montre la périodicité des sauts de fréquence ($\simeq 6$ Hz), qui induisent eux-mêmes des sauts de mouvement rétinien. De plus, cette figure montre que la commande du muscle comporte deux phases :

- une phase au cours de laquelle le muscle reçoit une fréquence croissante d'impulsions
- une phase où le muscle se relâche par absence d'impulsion, donc de commande. La rétine subit alors un mouvement de relaxation assimilable à celui d'un système mécanique du premier ordre.



FIGURE 62.: (a) Muscles MOS et MOT actionnant la rétine de la mouche Musca Domestica. Coupe frontale (gauche) et sagitale (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 Franceschini1991,Muecke1991). (b) Mouvements rétiniens de l'œil composé de Musca domestica en vol. Enregistrement d'une série d'impulsions de commande du muscle MOT servant au déplacement de la rétine. (c) Décours temporel de la fréquence instantanée des impulsions en fonction du temps. On note des chutes de fréquence périodiques à 5-6Hz. D'après Franceschini and Chagneux [1997].)

4.2 MODÉLISATION D'UN OEIL ÉLÉMENTAIRE À MICRO-BALAYAGE

D'une manière générale, il existe deux moyens pour générer un micro-balayage rétinien, c'est-à-dire une rotation des axes visuels de faible amplitude selon un mouvement d'aller-retour. Cette rotation résulte soit d'une *translation de la rétine* (comme chez la mouche) soit d'une *translation* de l'optique par rapport à la rétine. Soit cette rotation est directement obtenue en imposant une *rotation* à l'ensemble de l'oeil (comme chez l'homme). La figure 63 illustre ces deux principes où translation et rotation permettent de générer une rotation équivalente des axes visuels.



FIGURE 63.: Rotation des axes optiques résultant : a) d'une translation de la rétine (mouche) et b) d'une rotation de l'ensemble de l'oeil (oeil camérulaire de l'homme). Ces deux principes ont pour effet de faire tourner les axes optiques avec une amplitude équivalente. Dans le cas b), le centre de rotation est considéré très proche du point nodal de la lentille.

Dans le cas de la figure 63a, un déplacement d'amplitude ϵ en translation pure d'une rétine plaçée derrière une lentille fixe entraine une rotation des axes optiques d'un angle $\Delta\xi$. Les axes optiques sont séparés par l'angle inter-récepteur $\Delta\varphi$. L'amplitude du balayage $\Delta\xi$ se calcule donc de la manière suivante :

$$\Delta \xi = \operatorname{atan}\left(\frac{\varepsilon}{f}\right) \tag{4.1}$$

4.2.1 Modélisation de l'optique

Nous avons vu dans le chapitre 2.1 que l'oeil composé des insectes est formé d'ommatidies distinctes (ommatidie = petit œil élémentaire) dont le nombre va de

quelques dizaines par œil (chez les fourmis) jusqu'à 30.000 (chez les grosses libellules). Chaque ommatidie découpe dans l'espace un petit champ de vision de quelques degrés seulement. Le nombre d'ommatidies définit donc le nombre de pixels de l'image globale, qui couvre 4π [ster] - et même parfois davantage par suite d'un recouvrement binoculaire. Les signaux électriques émis par chaque cellule d'une ommatidie sont analysés point par point, et pas à pas, dans le réseau de neurones du système nerveux sous-jacent – qui ne comporte qu'un million de neurones environ. Chaque ommatidie est composée d'une microlentille ("facette"), dont le diamètre est de l'ordre de $30\mu m$, et qui focalise la lumière sur un petit groupe de cellules visuelles (8 ou 9 selon l'insecte), véritables neurones photorécepteurs responsables de la phototransduction.

L'information visuelle occupe une place primordiale parmi toutes les informations proprioceptives dont dispose un insecte ailé. Ce n'est donc pas par hasard que l'œil composé occupe aussi une place prépondérante parmi tous les capteurs embarqués à bord de l'animal. Pour rappel, les paramètres essentiels caractérisant cette optique particulière sont (cf. figure 2) :

- l'angle interommatidial $\Delta \phi$
- l'angle d'acceptance Δρ correspondant à la largeur à mi-hauteur de la sensibilité angulaire gaussienne

Dès les premiers enregistrements électrophysiologiques unitaires dans l'œil composé des arthropodes et notamment de la mouche (Hardie [1984]), il est apparu qu'un photorécepteur présentait une courbe de sensibilité directionnelle en forme de cloche (gaussienne). Comme nous avons pu le voir dans le paragraphe 2.1.1, cette forme particulière peut s'expliquer grâce à la théorie de la diffraction de la lumière étant donné les très faibles dimensions des optiques mises en jeu dans un œil composé. Chaque ommatidie peut être assimilée à une lentille d'ouverture relative F (F-number) et de diamètre D₁ associée à un rhabdomère (guide d'onde) de diamère D_r (Franceschini and Kirschfeld [1971], Stavenga [2003]). Pour rappel, le F-number est défini par :

$$F = \frac{f}{D_l}$$
, avec f la distance focale de la lentille. (4.2)

Une manière de caractériser la figure de diffraction associée à chaque ommatidie est de calculer le nombre de Fresnel N de la manière suivante :

$$N = \frac{fD_1}{4\lambda}, \text{ avec } \lambda \text{ la longueur d'onde de la lumière.}$$
(4.3)

Ainsi, pour une drosophile dont les ommatidies sont caractérisées par une lentille d'ouverture F = 1,25, de diamètre $Dl = 16\mu m$ et pour des valeurs de longueur d'onde de 300nm et 600nm, on obtient respectivement N = 16,6 et N = 8,3. D'une manière générale, les valeurs que l'on obtient, pour un œil composé, sont considérés comme très faibles car très voisines ou inférieures à 10. Ce très faible nombre de Fresnel (principalement dû au faible diamètre et à la faible distance focale de la lentille) est caractéristique des système optiques dont la sensibilité angulaire, de type gaussien, est obtenue par diffraction de la lumière. La sensibilité angulaire de forme gaussienne de chaque photorécepteur est une caractéristique fonctionnelle fondamentale pour les raisons suivantes :

- elle permet « d'adoucir » les transitions de contraste spatial , donc les transitions temporelles des signaux provenant des photorécepteurs.
- elle permet de réaliser un filtrage spatial de type passe-bas, donc de limiter les erreurs de correspondance lors de la mesure du flux optique
- elle semble être à l'origine de la propriété d'hyperacuité.

Pour toutes ces raisons, il nous a semblé essentiel d'imposer un flou gaussien au capteur visuel de nos robots volants OCTAVE et OSCAR. Contrairement à la mouche, le nombre de Fresnel associé à l'optique que nous avons utilisée est ici très supérieur à 10. Pour le robot OSCAR dont la lentille a un diamètre de 5mm et une distance focale de 8,5mm, le nombre de Fresnel est égal à environ 6000. Dans ces conditions, nous avons obtenu une sensibilité angulaire gaussienne, non pas par diffraction comme chez la mouche, mais par défocalisation de la lentille placée devant une rétine élémentaire. En d'autres termes, le flou gaussien est obtenu en diminuant la distance lentille-rétine et par conséquent en plaçant la rétine en amont du plan focal.

La figure 64 montre un exemple de sensibilités angulaires que nous avons mesurées dans l'œil du robot OSCAR en plaçant, dans le champ visuel de ce dernier, une source de lumière ponctuelle dont la position angulaire variait par pas de 0, 1° (Viollet and Franceschini [2001]).

Ici, la sensibilité angulaire de chaque photorécepteur sera modélisée par une gaussienne tronquée $A(\phi)$ (Götz [1964]), que l'on peut caractériser par les équations suivantes (Pichon [1991]) :

$$A(\phi) = \frac{abs(G(\phi) - s_{o}) + G(\phi) - s_{o}}{2}$$
(4.4)

, avec G(
$$\varphi$$
) = exp $\left[-\frac{\varphi^2}{2\sigma^2}\right]$ (4.5)

Les principaux paramètres qui caractérisent $S(\phi)$ sont les suivants :

• L_v : largeur angulaire totale du champ visuel

• $\Delta \rho$: largeur à mi-hauteur de la courbe de sensibilité directionnelle

Ces deux paramètres peuvent être exprimés en fonction de l'écart type σ de la manière suivante :

$$\Delta \rho = 2\sigma \left[2\ln \left(\frac{1}{1+s_0} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$
(4.6)

$$L_{\nu} = 2\sigma \left[2\ln \left(\frac{1}{s_0} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$
(4.7)



FIGURE 64.: Sensibilité angulaire mesurée pour chacune des deux photodiodes utilisées. Courbes relevées en utilisant une source ponctuelle (source de diamètre 5mm). La source placée à 100cm du capteur, sous-tend un angle de $0, 3^{\circ}$, bien inférieur à l'angle interrécepteur (4°). L'angle φ est l'angle entre la source ponctuelle et l'axe médian de chaque photorécepteur (angle d'incidence de la lumière), la position $\varphi = 0^{\circ}$ a été choisie de manière arbitraire. D'après Viollet and Franceschini [2001].

D'une manière générale et afin de simplifier nos calculs, nous avons par la suite approximé la courbe de sensibilité angulaire $s(\phi)$ d'un i^{ème} d'un photorécepteur par une gaussienne non tronquée qui s'écrit classiquement de la manière suivante :

$$S_{i}(\varphi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-}\left(\frac{(\varphi - (i-1)\Delta\varphi)^{2}}{2\sigma^{2}}\right)$$
(4.8)

Avec σ l'écart-type qui peut s'écrire en fonction de l'angle $\Delta \rho$ de la manière suivante :

$$\sigma = \frac{\Delta \rho}{2\sqrt{2\ln 2}} \tag{4.9}$$

Pour un photorécepteur donné, $S(\phi)$ peut s'écrire aussi comme suit (pour i = 1) :

$$S_{1}(\varphi) = \frac{2\sqrt{\pi \ln(2)}}{\pi \Delta \rho} e^{-\left(4\ln(2)\frac{\varphi^{2}}{\Delta \rho^{2}}\right)}$$
(4.10)

Un premier principe fondamental biomimétique consiste donc à reproduire une sensibilité angulaire de type gaussienne pour chaque photorécepteur. Sur la base du modèle décrit par les équations 4.8 et 4.9, nous allons nous intéresser à la simulation d'un micro-mouvement rétinien appliqué sur un œil élémentaire placé devant un objet contrasté de type barre ou front. Il est important de noter qu'une rotation des axes visuels (par translation ou rotation, cf. figure 63) d'une amplitude $\Delta \xi$ a pour effet de faire tourner d'un même angle les axes optiques de chaque photorécepteur. Il s'agit donc maintenant d'étudier le type de lois de balayage à imposer sur la rétine ou sur l'ensemble de l'oeil de manière à mettre en oeuvre un micro-balayage visuel offrant des propriétés optiques intéressantes.

4.2.2 Modélisation des signaux visuels

Comme indiqué dans (Kerhuel [2009] et Kerhuel et al. [2012]), le signal de sortie d'un photorécepteur placé devant un objet contrasté (front ou barre) résulte de la convolution de l'intensité lumineuse (luminance) projetée sur la surface photosensible avec la fonction $S_i(\varphi)$ donnée par (4.10).

Lorsqu'un front de contraste vertical est placé à une position angulaire Ψ_c dans le champ visuel du photorécepteur alors cette convolution s'écrit sous forme d'intégrale de la manière suivante :

$$Ph(\Psi_c) = \int_{-\infty}^{\Psi_c} kS(\phi) \, d\phi \tag{4.11}$$

avec k dépendant du contraste m et des conditions d'éclairement.

L'équation **4.11** peut aussi s'écrire pour son calcul à partir de la fonction erreur *erf* définie par intégrale :

$$S_{\text{ph,i}}(\Psi_{c}) = \frac{m}{2} \left(1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\Psi_{c}(t) - (i-1)\Delta\phi}{\sigma\sqrt{2}}\right) \right)$$
(4.12)

Nous considérons ici un capteur à deux photorécepteurs (photodiodes), les signaux de sortie pour les photorécepteurs 1 et 2 s'écrivent donc :

Avec la fonction erreur *erf* définie classiquement de la manière suivante :

$$\operatorname{erf}(\varphi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\varphi} e^{-x^2} dx \tag{4.13}$$

Lorsqu'une barre verticale de contraste m et de largeur L est placée dans le champ visuel, le signal de sortie du photorécepteur résultant de la convolution de l'image de la barre avec la fonction $S(\phi)$ s'écrit :

$$Ph(\Psi_{c}) = \frac{m}{2} \left(erf\left(\frac{2\sqrt{\ln(2)}(\Psi_{c} + \frac{L}{2})}{\Delta\rho}\right) - erf\left(\frac{2\sqrt{\ln(2)}(\Psi_{c} - \frac{L}{2})}{\Delta\rho}\right) \right)$$
(4.14)

Le contraste m est défini selon la définition de Michelson donné par l'équation (2.4).

Les équations (4.12) et (4.14) constituent le noyau du modèle numérique permettant d'obtenir les signaux visuels fournis par chaque photorécepteur. Cette étape de simulation est importante car elle permet de tester différents algorithmes du traitement des signaux visuels. Par ailleurs, on verra que dans certains cas, les expressions (4.12) et (4.14) peuvent donner lieu, après simplification, à des expressions analytiques élégantes ayant des propriétés remarquables. Ce sont précisément ces différents traitements et propriétés qui seront décrits dans les paragraphes suivants.

4.3 TRAITEMENTS DES SIGNAUX TEMPORELS : DEUX APPROCHES

4.3.1 Approche par codage du retard : Capteur OSCAR

Depuis maintenant plus de 15 ans, en s'appuyant sur la découverte de micromouvements rétiniens chez la mouche (Franceschini and Chagneux [1997]) ou sur l'araignée (Land [1969]), différents traitements des signaux visuels issus de mouvement de balayage rétinien ont été proposés. Chronologiquement, quatre études ont déjà mis en exergue les avantages liés à un micro-mouvement rétinien appliqués sur un système visuel. Ces quatre études ont déjà donné lieu à quatre types de capteur à micro-balayage rétinien :

- un balayage périodique à vitesse constante combiné avec une détection du mouvement a permis à un robot mobile d'éviter des obstacles frontaux placés dans une partie du champ visuel où par définition le flux optique est faible (Mura and Franceschini [1996]). Le même micro-mouvement de balayage a aussi été mis en oeuvre sur un capteur optique à base de MEMS de manière à améliorer sa résolution par un facteur 6 (Hoshino et al. [2000]).
- un balayage de type impulsionnel couplé à un filtrage temporel des signaux visuels de type passe-haut a permis à un robot mobile de détecter la présence de fronts de contraste placés dans le champ visuel de son capteur à balayage (Mura and Shimoyama [1998]).

- un balayage de type circulaire (2D) a permis d'améliorer la résolution spatiale d'un capteur optique (limité par l'écart entre les pixels) en transformant, grâce au balayage actif des axes visuels, l'information spatiale en information temporelle (Landolt and Mitros [2001]). Le même mode de balayage a aussi été utilisé comme détecteur de front (Ando et al. [1997]).
- un balayage périodique dit à vitesse variable (Viollet and Franceschini [1999a]) qui a permis à un robot aérien (OSCAR) de localiser un objet contrasté avec une précision bien meilleure que celle imposée par l'espacement entre deux photorécepteurs adjacents.

Le premier capteur décrit dans ce chapitre est appelé OSCAR ("Optical Scanner for the Control of Autonomous Robots") s'appuie sur des études menées au laboratoire en électrophysiologie, comportement et micro-optique. En 1997, Franceschini et Chagneux (Franceschini and Chagneux [1997]) ont découvert que des muscles miniatures présents dans l'oeil composé de la mouche sont à l'origine de micromouvements de balayage rétinien. La figure 65 schématise une micro-translation de la rétine de l'oeil composé qui a pour conséquence de faire tourner simultanément les axes visuels de chaque photorécepteur.



FIGURE 65.: Représentation schématique d'une micro-translation de la rétine d'amplitude ϵ qui a pour effet de faire tourner simultanément tous les axes visuels d'un angle $\Delta \xi$.

Nous avons vu dans le chapitre 2.1.1 que la mouche est dotée de neurones détecteurs élémentaire de mouvement (DEM) sensibles à la *vitesse* de défilement des objet sur sa rétine (flux optique). En modélisant et en construisant un capteur à balayage inspiré de celui de la mouche, couplé à un traitement des signaux visuels de type DEM, nous avons pu obtenir un capteur optique capable de *localiser* un bord ou une barre contrastés avec une résolution meilleure que celle dictée par le simple espacement entre deux pixels (propriété d'*hyperacuité* (Westheimer [1981])). Sur la base d'une hypothèse inspirée des micro-mouvements rétiniens de la mouche qui consistait à considérer un balayage à vitesse variable des axes visuels selon une loi en exponentielle, nous avons considéré que la position angulaire Ψ_c^i du i^{ème} axe visuel peut s'écrire de la manière suivante :

$$\Psi_{c}^{i}(t) = \begin{cases} \Delta\xi(1 - e^{(-\frac{t}{\tau})}) & \text{pour } t \in \{0, 50\text{ms}\} \\ \Delta\xi - \alpha t & \text{pour } t \in \{50\text{ms}, 100\text{ms}\} \end{cases}$$
(4.15)

La vitesse angulaire ω des axes visuels s'écrit donc :

$$\omega(t) = \frac{d\Psi_{c}^{i}(t)}{dt} = \begin{cases} \frac{\Delta\xi}{\tau} e^{(-\frac{t}{\tau})} & \text{pour } t \in \{0, 50\text{ms}\} \\ -\alpha & \text{pour } t \in \{50\text{ms}, 100\text{ms}\} \end{cases}$$
(4.16)

A partir de la définition de la vitesse angulaire ω de rotation des axes visuels, on peut définir le retard Δt qui correspond, pour une vitesse ω donnée, au temps nécessaire pour parcourir l'angle interrécepteur $\Delta \varphi$ (constant) :

$$\Delta t = \frac{\Delta \varphi}{\omega} \tag{4.17}$$

Il est intéressant de noter que la vitesse angulaire ω peut être considérée comme à l'origine d'un flux optique de rotation pure (cf. équation 2.14). Par conséquent, si ω est constante (i.e., vitesse de balayage constante) alors tous les objets contrastés généreront un Δ t identiques quelle que soit leur distance. Inspiré par les micromouvements rétiniens de la mouche, nous avons imposé une vitesse de balayage ω *variable* qui a pour effet de "coder" la *position* angulaire d'un objet contrasté par une vitesse de balayage ω . En d'autres termes, à chaque position angulaire de l'objet va correspondre un retard Δ t, donc une vitesse angulaire ω . La figure 66 illustre ce principe basé sur le codage d'une position angulaire par une vitesse.

La figure 66 peut laisser supposer que la mesure du retard Δt par seuillage rend cette mesure très sensible au contraste m de l'objet. En effet, pour une position angulaire donnée, un objet de contraste égal à 40% donnera un retard plus grand qu'un contraste égal à 100%. La figure 67a illustre ce phénomène. Pour le contrer, nous avons mis en oeuvre un contrôle automatique de gain dont la fonction est de maintenir l'enveloppe (amplitude) d'un signal constant quelque soit ses variations. La figure 67b montre l'intérêt de l'utilisation du contrôle automatique de gain dont la mise en oeuvre en version analogique ou numérique est largement décrite dans la littérature.

La figure 68 montre la version du capteur OSCAR dans sa version cylindrique horizontale. Ce capteur est composé d'une lentille derrière laquelle sont placées deux photodiodes mises en vibration grâce à un actionneur piezo-électrique de type bender de chez PI (pour plus de détails voir l'article en annexe). Ce type d'actionneur présente l'avantage d'avoir une très grande bande-passante (360Hz à vide) autorisant une commande en boucle ouverte pour la mise en oeuvre de notre loi de balayage



FIGURE 66.: Simulation de la réponse de deux photorécepteurs adjacents dont les axes visuels séparés d'un angle $\Delta \varphi$ balayent périodiquement un front de contraste selon la loi donnée par les équations (4.15) et (4.16) (a) Fonction erreur correspondant au signal de sortie S_{ph,1} du photorécepteur 1 (courbe noire) et S_{ph,2} du photorécepteur 2 (courbe violette). Durant une période de 100ms, ces fonctions erreurs sont translatées périodiquement entre les position O et O' et rencontrent un front de contraste placé à trois positions angulaires différentes notées 1, 2 et 3 (traits pointillés verticaux). (b) Loi de balayage en position (courbe noire) et en vitesse (courbe rouge). Les trois barres verticales indiquent la vitesse angulaire à laquelle le front de contraste est détecté par le photorécepteur 1. (c,d,e) Signaux de sortie des deux photorécepteurs pour les trois positions angulaires du front de contraste. (f,g,h) Signaux de sortie dérivés faisant apparaitre le retard Δt mesuré par seuillage dont la valeur varie nettement en fonction de la position angulaire du front. Amplitude du balayage égale à $2\Delta \varphi$ avec $\Delta \varphi = 2, 8^\circ$. D'après Viollet and Franceschini [2010]

particulière, en exponentielle décroissante. Néanmoins ce type d'actionneur requiert une tension d'alimentation relativement élevé (60V) qui nous a conduits à la conception et à la réalisation d'un circuit de commande spécifique de seulement 1,5g (cf. Viollet and Franceschini [2010]).

Nous avons caractérisé le capteur OSCAR en le plaçant à diverses distances (entre 0,5m et 2,5m) devant différents objets (barre de 1,5cm de large ou front) ayant de divers contrastes (10%, 40% et 85%. Les caractéristiques obtenues (cf. article) montre une bonne robustesse du capteur à la distance et au contraste avec cependant des variations sur la position correspondant au zéro. La propriété la plus remarquable de ce capteur réside dans son *hyperacuité*, c'est-à-dire sa précision en localisation ici 70 fois meilleure que son angle interrécepteur $\Delta \varphi = 2$,8°. La figure 69 présente en fonction du temps la position angulaire d'un moteur pas à pas sur lequel le capteur OSCAR est monté et l'évolution du signal de sortie du capteur correspondant à la mesure du retard Δt . Le moteur pas à pas est ici commandé en mode micro-pas correspondant à un déplacement angulaire de 0,04°. A chaque micro-pas est associée une variation du retard 0,04°, confirmant la propriété remarquable d'hyperacuité du capteur OSCAR, dont la résolution se voit ici améliorée d'un facteur 70. (2,8/0,04 = 70).

4.3.2 Nouvel éclairage sur le capteur OSCAR

Dans son travail de thèse, Lubin Kerhuel (Kerhuel [2009]) a jeté un éclairage nouveau sur le fonctionnement du capteur OSCAR en ne considérant pas uniquement l'effet de la phase aller de la loi de balayage mais en considérant l'effet des deux phases, aller et retour. Il a pu montrer que le principe d'OSCAR peut fonctionner



FIGURE 67.: Robustesse de la mesure du retard au contraste grâce à un contrôle automatique de gain. (a) Effet d'une variation du contraste d'un front placé à la position 2 (cf.66). (b) Grâce au contrôle automatique de gain, le retard est constant malgré une forte variation du contraste de l'objet, de 0,4 à 1. D'après Viollet and Franceschini [2010].



FIGURE 68.: Capteur OSCAR à micro-balayage rétinien basé sur un rétine de deux photodiodes placées derrière une lentille fixe et montées à l'extrêmité d'un barreau piezo de manière à générer la loi de balayage à vitesse variable. D'après Viollet and Franceschini [2010].



FIGURE 69.: Illustration de l'hyperacuité du capteur OSCAR placé devant un front de contraste (contraste 85%). A chaque micro-pas angulaire de 0,04° on décèle une nette variation du retard Δt. La résolution du capteur OSCAR pour la localisation d'un front est par conséquent améliorée par un facteur 70 grâce à la vibration rétinienne à vitesse variable. D'après article Sensor et Actuator.

avec d'autres lois de balayage que la loi en exponentielle , donc peut s'affranchir quasiment de la forme d'onde de la loi de balayage périodique.

La figure 70 montre un exemple de simulation de la rotation des axes visuels selon une loi en rampe (i.e., à vitesse constante). Les photorécepteurs font face à un front de contraste placé à 5 positions angulaires différentes ($\psi_c = -2, 5^\circ; -1, 5^\circ; 0^\circ; 2, 5^\circ; 1, 5^\circ$) D'après les travaux précédents sur le capteur OSCAR on doit s'attendre en appliquant l'équation 4.17 à mesurer un retard Δt constant, ce qui est bien le cas dans les figures 70f à 70j. Or les figure 70k à 700 montrent aussi clairement que le retard Δt après seuillage entre les signaux *dérivés* de chaque photorécepteur n'est pas constant.

La simulation de la figure 70 est incomplète. Sur cette simulation, on ne considère en effet que la phase "aller" du balayage, en prenant en compte les effets des transitoires. La même simulation présentée sur la figure 71 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 de la figure 70. 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.

En résumé, un traitement des signaux visuels basés sur un filtrage passe-haut associé à un seuillage des signaux visuels permet de remonter à une information de position angulaire d'un bord contrasté et ce, que le la loi de balayage soit à vitesse variable en exponentielle décroissante (Viollet and Franceschini [1999a], Viollet and Franceschini [1999b] et Viollet and Franceschini [2001]), en triangle ou en sinus (Kerhuel [2009]). Néanmoins, l'amplitude de balayage doit être relativement importante (supérieure à l'angle $\Delta \varphi$) et la loi de balayage ne peut être quelconque. Dans le paragraphe suivant, nous allons montrer qu'un traitement basé sur l'amplitude des signaux peut permettre d'améliorer encore la précision et la linéarité du capteur : c'est le capteur appelé VODKA (Vibrating Optical Device for the Kontrol of Autonomous-robots).

4.3.3 Approche par traitement de l'amplitude : Capteur VODKA

Nous décrivons ici un nouveau capteur, appelé VODKA, dont la linéarité et précision en localisation sont grandement améliorées par rapport à OSCAR. Nous verrons aussi que le principal avantage du traitement du capteur VODKA est de s'affranchir de la forme de la loi de balayage. Par contre, si les performances de VODKA sont excellentes pour la localisation d'un front, elles peuvent être encore améliorées pour la détection d'une barre.

Capteur VODKA pour la localisation d'un front

Considérons un front de contraste dont la position angulaire est notée ψ_c et dont la différence de luminance est définie de la manière suivante :

$$I(\Psi) = \begin{cases} I_1 & \Psi < 0\\ I_2 & \Psi \ge 0 \end{cases}$$
(4.18)



FIGURE 70.: Planche de signaux simulés P_h et P'_h 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 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 (Ph₁ et Ph₂). L'écart temporel entre Ph₁ et Ph₂ 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 un filtre passe-bande (dérivateur analogique et passe-bas numérique). La mesure Δt (réalisée ici avec un seuil 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 : $\Delta \rho = 2.6^\circ$; $\Delta \phi = 2.87^\circ$; Amplitudebalayage = 6° . D'après Kerhuel [2009].

Le signal de sortie $Ph(\Psi_c)$ d'un photorécepteur se calcule en convoluant la sensibilité angulaire $s(\Psi)$ avec $I(\Psi)$:

$$Ph(\Psi_{c}) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(\Psi) \cdot I(\Psi - \Psi_{c}) \, d\Psi$$
(4.19)



FIGURE 71.: Planche de signaux simulés P_h et P'_h 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 70, sauf que le balayage qui est ici périodique. Les axes optiques se translatent à vitesse constante dans des aller-retour successifs. Les zones grises et blanches identifient les deux phases de balayage. Paramètres optiques de la simulation : $\Delta \rho = 2.6^{\circ}$; $\Delta \phi = 2.87^{\circ}$; Amplitudebalayage = 3°. D'après Kerhuel [2009].

Par conséquent, le signal de sortie d'un photorécepteur placé devant un front s'écrit :

$$\begin{split} \text{Ph}(\Psi_c) &= I_1 \int_{-\infty}^{\Psi_c} s(\Psi) \ d\Psi + I_2 \int_{\Psi_c}^{+\infty} s(\Psi) \ d\Psi \\ &= I_1 \int_{-\infty}^{\Psi_c} s(\Psi) \ d\Psi - I_2 \int_{-\infty}^{\Psi_c} s(\Psi) \ d\Psi + I_2 \int_{-\infty}^{\Psi_c} s(\Psi) \ d\Psi + I_2 \int_{\Psi_c}^{+\infty} s(\Psi) \ d\Psi \\ &= (I_1 - I_2) \int_{-\infty}^{\Psi_c} s(\Psi) \ d\Psi + I_2 \int_{-\infty}^{+\infty} s(\Psi) \ d\Psi \\ &= \frac{I_1 - I_2}{2} \text{erf}\left(\frac{2\sqrt{\ln(2)}}{\Delta\rho}\Psi_c\right) + \frac{I_1 + I_2}{2} \end{split}$$
(4.20)

Si l'on considère un oeil élémentaire constitué de deux photorécepteurs séparés d'un angle $\Delta \phi$ et soumis à un mouvement périodique de micro-balayage (micro-vibration) noté Ψ_{mod} , alors les signaux de sortie des deux photorécepteurs notés P_{h1} et P_{h2} s'écrivent respectivement :

$$Ph_{1}(\Psi(t)) = Ph\left(\Psi_{c}(t) + \Psi_{mod}(t) - \frac{\Delta\phi}{2}\right)$$

$$Ph_{2}(\Psi(t)) = Ph\left(\Psi_{c}(t) + \Psi_{mod}(t) + \frac{\Delta\phi}{2}\right)$$
(4.21)

Avec Ψ_{mod} une loi de modulation (vibration rétinienne) sinusoïdale définie par :

$$\Psi_{\text{mod}} = \operatorname{Asin}(2\pi f_{\text{mod}} t) \tag{4.22}$$

Comme décrit dans (Juston et al. [2011] et Kerhuel et al. [2012]), il est possible de localiser un front de contraste avec une précision bien meilleure que celle imposée par l'angle $\Delta \varphi$ et d'obtenir une propriété d'hyperacuité en appliquant la relation suivante :

$$\theta_{\text{mesure}} = \kappa \frac{Ph_{1\text{demod}} - Ph_{2\text{demod}}}{Ph_{1\text{demod}} + Ph_{2\text{demod}}}$$
(4.23)

Comme montré dans le figure 72, les signaux Ph_{1demod} et Ph_{2demod} correspondent aux signaux de sortie du traitement servant à démoduler les les signaux P_{h1} et P_{h2} .

On peut montrer alors que l'équation 4.23 se simplifie remarquablement de la manière suivante (pour les plus de détails, cf. thèse L. Kerhuel) :

$$\theta_{\text{mesure}} = K \cdot \tanh\left(\frac{4\log(2)\Delta\phi}{\Delta\rho^2}\Psi_c\right) \tag{4.24}$$

La figure 73 montre un exemple de caractéristique statique mesurée pour un front (toit d'un immeuble) visé par le capteur à une distance de 56m (cf. article Juston et al IEEE Sensor pour plus de détails).



FIGURE 72.: Schéma de principe du traitement des signaux visuels du capteur VODKA. Les signaux sont tout d'abord filtrés par un filtre passe-bande analogique puis par un filtre numérique sélectif centré sur la fréquence de modulation f_{mod} et enfin démodulés par un redresseur suivi d'un filtre passe-bas (fréquence de coupure 10Hz). D'après Kerhuel et al. [2012].



FIGURE 73.: Caractéristique statique mesurée de la sortie du capteur de type VODKA placé face à un front de contraste naturel (ici le toit d'un immeuble situé à une distance de 56m). L'orientation du capteur en élévation était modifiée par pas de 0,025°. L'encart à droite montre clairement la résolution du capteur qui égale la résolution d'un micro-pas angulaire. On peut donc dire que le capteur a une résolution 160 fois meilleure que sa résolution statique imposée par l'angle interrecepteur Δφ. D'après Juston et al. [2011].

Capteur VODKA pour la localisation d'une barre

Considérons non plus un front de contraste mais une barre dont la position angulaire est notée ψ_c et dont la différence de luminance est définie de la manière suivante :

$$I(\Psi) = \begin{cases} I_1 & |\Psi| < L/2\\ I_2 & |\Psi| \geqslant L/2 \end{cases}$$
(4.25)

avec L la largeur de la barre centré sur la position angulaire Ψ_c et I₁ la luminance de la barre par rapport à la luminance du fond I₂. Le signal de sortie Ph(Ψ_c) d'un photorécepteur se calcule à partir de l'équation 4.19, ce qui donne :

$$\begin{aligned} \mathsf{Ph}(\Psi_{c}) &= \mathrm{I}_{2} \int_{-\infty}^{\Psi_{c} - \frac{L}{2}} \mathrm{s}(\Psi) \ d\Psi + \mathrm{I}_{1} \int_{\Psi_{c} - \frac{L}{2}}^{\Psi_{c} + \frac{L}{2}} \mathrm{s}(\Psi) \ d\Psi \\ &+ \mathrm{I}_{2} \int_{\Psi_{c} + \frac{L}{2}}^{+\infty} \mathrm{s}(\Psi) \ d\Psi \\ &= (\mathrm{I}_{1} - \mathrm{I}_{2}) \int_{\Psi_{c} - \frac{L}{2}}^{\Psi_{c} + \frac{L}{2}} \mathrm{s}(\Psi) \ d\Psi + \mathrm{I}_{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \mathrm{s}(\Psi) \ d\Psi \\ &= \frac{\mathrm{I}_{1} - \mathrm{I}_{2}}{2} \left(\mathrm{erf} \left(\frac{2\sqrt{\ln(2)}}{\Delta\rho} * (\Psi_{c} + \frac{L}{2}) \right) \right) \\ &- \mathrm{erf} \left(\frac{2\sqrt{\ln(2)}}{\Delta\rho} * (\Psi_{c} - \frac{L}{2}) \right) \right) + \mathrm{I}_{2} \end{aligned}$$
(4.26)

A partir de l'équation 4.14, il n'est malheureusement pas possible d'obtenir une expressions simplifiée telle que nous l'avions obtenue pour le front. La figure 4.26 montre un exemple de caractéristique statique de localisation d'une barre noire de 8mm de large placée à 70cm du capteur. La courbe bleue montre que même un développement limité d'ordre élevé (ordre 8) ne permet pas de linéariser la réponse, même aux petits angles.

4.4 RÉSUMÉ

Ce chapitre a résumé les divers travaux que nous avons menés depuis 1997 sur les micro-mouvements rétiniens et leur rôle possible dans le phénomène d'hyperacuité et d'amélioration de la détection d'objets plus fins que l'espacement entre deux pixels adjacents. Le but est ici de montrer l'évolution entre une première approche basée sur un traitement du retard *temporel* engendré par ces micro-mouvements vers une approche basée sur le traitement de *l'amplitude* des signaux visuels. Cette dernière approche issus des travaux de thèse de Lubin Kerhuel et de Raphaël Juston a d'ailleurs permis d'améliorer grandement la robustesse et la précision de la localisation d'un objet contrasté. Des travaux récents (Juston et al. [2013]) ont montré que l'étude de la phase du signal de modulation mesurée par les photorécepteurs permettait d'obtenir une grande robustesse pour détecter (discriminer) la présence d'une barre par rapport à celle d'un front (détection du type d'objet). Ces travaux ouvrent une voie très prometteuse vers un oeil doté d'une vision centrale de type



FIGURE 74.: Caractéristique statique mesurée de la sortie du capteur de type VODKA placé face à une barre de 8mm à une distance de 70cm. La courbe rouge est la caractéristique mesurée tandis que la bleue est le modèle linéarisé d'ordre 8. L'écart angulaire entre les deux point de rebroussement permet d'estimer $\Delta \varphi$ avec une bonne précision ($\Delta \varphi$ mesuré avec une méthode optique est de 4°.

fovéa, ayant une très bonne acuité pour la localisation d'objets, et une vision périphérique de résolution beaucoup plus grossière pour la simple détection d'objets contrastés. Les applications sont nombreuses, tant en robotique qu'en vision industrielle où nous explorons les possibilités de remplacer la vibration mécanique appliquée sur la rétine par la modulation d'un rayonnement émis ou réfléchi par l'objet à localiser.

5 DISCUSSION

| MATIÈF | ES | |
|--------|--|----|
| 5.1 | Rôle des micro-mouvements rétiniens 89 | |
| 5.2 | Sensibilité angulaire gaussienne des photorécepteurs | 90 |
| | | |

5.3 Découplage oeil-tête 91

Dans ce chapitre, j'ai souhaité aborder trois points de discussion en relation directe avec les chapitres précédents concernant la stabilisation du regard et les micromouvements rétiniens.

5.1 RÔLE DES MICRO-MOUVEMENTS RÉTINIENS

Dans son article de synthèse sur le rôle des micro-mouvements rétiniens de l'oeil camérulaire (Martinez-Conde et al. [2004]), Susana Martinez-Conde rappelle le premier rôle des micro-mouvements rétiniens chez les vertébrés qui est d'empêcher les neurones traitant l'information visuelle de s'adapter car ces micro-mouvements génèrent en permanence des transitoires inhibant le phénomène de "fondu". En d'autres termes, les micro-mouvements rétiniens permettent de générer des signaux transitoires capables de franchir le premier filtrage temporel, de type passe-bande, existant dans la rétine des vertébrés telle la salamandre entre les bâtonnets et les cellules bipolaires et horizontales de la rétine (Armstrong-Gold and Rieke [2003]) ainsi que chez les invertébrés comme la mouche où une fonction de type passe-haut a été clairement identifiée dans la lamina (Zettler and Järvilehto [1971]) comme on peut le constater dans la figure 77.

Ainsi, le filtrage passe-haut est une fonction fondamentale car il permet d'une manière générale :

- de supprimer la composante continue du signal visuel due à l'éclairage ambiant,
- de séparer les transitions de contraste ON et OFF

Le filtrage passe-haut permet aussi d'une manière plus spécifique de dériver les signaux visuels issus de la convolution avec la sensibilité angulaire gaussienne d'un photorécepteur, de manière à faire apparaître des propriétés remarquables liées au traitement de l'amplitude des signaux générés par un micro-mouvement rétinien quelconque (cf. paragraphe 4.3.3). Nous avons vu aussi qu'un traitement basé sur la mesure du *retard* entre deux signaux de photorécepteurs adjacents permettait de mesurer une *vitesse* angulaire de défilement, tandis qu'un traitement basé sur *l'amplitude* permettait de mesurer une *position* angulaire. Il semblerait donc judicieux d'étudier un traitement mixte, basé à la fois sur la mesure du retard et sur le traitement de l'amplitude, de manière à obtenir un capteur visuel capable de mesurer



FIGURE 75.: Fonction de filtrage passe-haut mesurée par électrophysiologie dans l'oeil composé de la drosophile. La signal mesuré au point C est obtenue en réponse à une stimulation impulsionnelle de 0,65s appliquée au point A par une microélectrode en contact avec la cornée de l'oeil. Adapté de Heisenberg [1971].

tout aussi bien des vitesses (flux optique) que des positions angulaires, donc des vitesses de défilement extrêmement faibles, telles que celles présentes au voisinage du foyer d'expansion du flux optique de translation.

Pour résumer, les micro-mouvements rétiniens présentent de nombreux avantages car ils permettent :

- de voir et localiser des objets, sans mouvement du support mécanique de l'oeil. Par exemple, lors d'une phase de vol stationnaire où, par définition, l'engin volant doit rester au point fixe, donc ne générer aucun mouvement. C'est seulement au niveau de l'oeil et grâce à la vibration rétinienne que le mouvement est généré.
- de détecter des mouvements infiniment faibles tels que ceux rencontrés au voisinage du foyer d'expansion
- de créer une zone fovéale sans avoir à répliquer un traitement complexe et sans avoir à augmenter la densité des photorécepteurs

5.2 SENSIBILITÉ ANGULAIRE GAUSSIENNE DES PHOTO-RÉCEPTEURS

Le deuxième point de discussion concerne la sensibilité angulaire gaussienne des photorécepteurs. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 3.3, le flou gaussien est à l'origine de propriétés optiques remarquables telle que l'hyperacuité. Chez l'insecte, la courbe de sensibilité gaussienne est obtenue par un phénomène de diffraction (cf.

paragraphe 2.1.1) tandis que dans nos capteurs optiques, cette même courbe peut être obtenue par une légère défocalisation de la lentille. Des travaux récents (Luke et al. [2010]) ont montré qu'un capteur optique peut localiser une barre de 3cm de diamètre avec hyperacuité, sur la base unique d'un recouvrement des sensibilités angulaires gaussiennes sans aucun micro-mouvement rétinien. Cependant, nos capteurs à vibration rétinienne sont capables de localiser des objets bien plus fins (diamètre de 1mm à une distance de 50cm par exemple) avec une caractéristique statique impaire permettant de mettre en oeuvre un asservissement visuel capable de maintenir un objet au milieu du champ visuel du capteur. A noter qu'un capteur optique avec une caractéristique statique paire (Luke et al. [2010]) ne permet pas la mise en oeuvre d'un tel asservissement. La sensibilité angulaire gaussienne, ou flou gaussien, est une caractéristique primordiale de nos capteurs détecteurs de mouvement et de localisation d'objet. Elle renforce le caractère non-intuitif d'une solution bio-inspirée qui conduit à appliquer un flou et à faire vibrer une rétine pour localiser un objet avec grande précision : deux phénomènes qui vont habituellement à l'encontre de bonnes propriétés pour un capteur optique.



FIGURE 76.: Illustration de la mesure faite par Karl Götz en 1964, (grâce à une expérience de comportement basée sur la réponse optomotrice de la mouche Drosophile), des deux paramètres optiques clés caractérisant un oeil composé à savoir l'angle interommatidial $\Delta \varphi$ et l'angle d'acceptance $\Delta \rho$. D'après Götz [1964].

5.3 DÉCOUPLAGE OEIL-TÊTE

Le troisième point de discussion concerne la nécessité de découpler le système visuel de son support et de le stabiliser de manière à ce que l'orientation du regard

devienne une référence absolue. On peut se demander quel est l'intérêt de stabiliser activement un oeil si ce dernier dispose d'un grand champ visuel lui permettant a priori de ne jamais perdre l'objet d'intérêt. Dans son article de 1991 (Ballard [1991]), Ballard donne tout un argumentaire en faveur de la stabilisation du regard car sans cette stabilisation le système visuel serait confronté à la résolution de problèmes complexes à multiple degrés de liberté. Ainsi, même si l'on dispose d'un grand champ visuel, il est peut-être judicieux de ne pas allouer les mêmes ressources de traitement à l'ensemble du champ visuel mais seulement à une petite partie appelée fovéa. Cette stratégie permet de diminuer grandement les ressources nécessaires au traitement des signaux visuels. De cette manière, le champ visuel de l'oeil est constitué :

- d'une vision fovéale associée à un point de fixation pour tout ce qui concerne la localisation, le suivi et l'identification de cibles
- d'une vision périphérique associée à la détection de mouvement par exemple.

Par conséquent, il devient nécessaire de mettre en œuvre des mécanismes performants de stabilisation du regard permettant à celui-ci de se verrouiller sur une cible, tout en compensant les perturbations générées par la locomotion ou le vol par exemple. Ces mécanismes résultent souvent d'une fusion entre actions de type "feedforward" et commande en boucle fermée. Il est intéressant de noter que la vision fovéale ne se rencontre pas uniquement chez les vertébrés (avec leur oeil camérulaire) mais aussi chez les insectes (avec leur oeil composé) et en particulier chez la mouche (Collett and Land [1975], Franceschini [1975]) ou encore chez les arachnides dont la paire d'yeux frontaux présentent une bien meilleure acuité que les yeux latéraux (Barth [2002]). Enfin, la vision fovéale peut être envisagée en l'associant aux saccades oculaires, servant à orienter le plus vite possible la fovéa en direction de l'objet d'intérêt et impliquant de ce fait, la mise en en oeuvre d'actionneurs à la fois rapides et précis en guise de muscles oculomoteurs.



FIGURE 77.: Exemple d'un oeil composé artificiel disposant d'une fovéa (zone rouge) pour la localisation et le suivi de cibles, et d'une vision périphérique à grand champ visuel pour la détection du mouvement ou de présence d'un objet contrasté.

6 PROJET DE RECHERCHE

MATIÈRES

- 6.1 Capteurs optiques innovants 93
- 6.2 Pilotage par le regard de robots aériens autonomes 96
- 6.3 Réflexes oculomoteurs pour la stabilisation du système visuel chez l'insecte ailé 97

Dans le chapitre 1, j'ai tenté d'illustrer combien la nature et notamment les insectes pouvaient être riches d'enseignements et de connaissances, et souvent donner lieu à des technologies innovantes dont on n'aurait pas eu l'idée sans ces travaux de recherche en neuroéthologie et en neuroanatomie.

La démarche Biorobotique consiste à élucider le fonctionnement de mécanismes sensori-moteurs naturels, puis à les mettre en œuvre à bord de robots physiques qui, une fois confrontés à un environnement réel, sont aptes à confirmer ou à infirmer ce que nous prétendons avoir compris chez l'animal. Ainsi, par itération, nous faisons avancer notre compréhension de ces mécanismes sensorimoteurs. Cette démarche, je compte la poursuivre en orientant mon projet de recherche autour des 3 axes suivants :

- Capteurs optiques innovants pour la détection du mouvement et la localisation d'objets
- Pilotage par le regard de robots aériens autonomes
- Réflexes oculomoteurs pour la stabilisation du système visuel chez l'insecte ailé

6.1 CAPTEURS OPTIQUES INNOVANTS

Depuis leur découverte par Nicolas Franceschini et Roger Chagneux voici une quinzaine d'années, les micro-mouvements rétiniens présents dans l'oeil composé de la mouche n'ont cessé d'attirer notre attention. Nous avons montré ces dernières années que ces micro-mouvements rétiniens peuvent, lorsqu'ils sont appliqués sur une rétine artificielle, donner naissance à certaines propriétés optiques remarquables telles que :

- la détection d'objets plus fins que l'angle interrécepteur (angle entre les axes optiques de deux photorécepteurs adjacents)
- la localisation d'un objet contrasté (front ou barre) avec une précision bien meilleure que l'angle interrécepteur.

Ces dix dernières années, nous avons concentré notre effort de recherche sur la théorie, la modélisation et la simulation de micro-mouvements rétiniens périodiques de formes diverses. Ces études se sont concrétisées par des publications dans des re-

vues scientifiques majeures concernant les capteurs : « Sensors and Actuators A» et "IEEE Sensors Journal". Par ailleurs, durant la thèse de Lubin Kerhuel, nous avons poursuivi l'étude de ces micro-mouvements et proposé un nouveau traitement breveté qui permet d'exploiter non seulement une loi de micro-balayage rétinien arbitraire (périodique ou non) mais aussi d'améliorer par un facteur exceptionnel de 900 la capacité à localiser un bord contrasté avec seulement deux photorécepteurs. L'étude des micro-mouvements rétiniens est loin d'arriver à son terme, ces micromouvements devraient même nous permettre de concevoir de nouveaux capteurs optique de position ayant à la fois une très bonne résolution et une faible latence sans pour autant utiliser des rétines complexes comportant plusieurs millions de pixels. Je pense aussi poursuivre une voie de recherche concernant la localisation de marqueurs actifs (Leds scintillantes par exemple) ainsi que la différenciation frontbarre grâce à la micro-vibration rétinienne. Ce dernier point, abordé dans la thèse de Raphaël Juston, a conduit à de nouveaux résultats théoriques et expérimentaux prometteurs, dont un brevet pour la conception de nouveaux types capteurs optiques de position angulaires qui seront dotés d'une zone fovéale ayant une très bonne acuité et d'une zone périphérique ayant une résolution beaucoup plus grossière mais suffisante pour la détection de contraste (cf. figure 79). Le but étant ici d'obtenir un comportement de suivi de cible et d'interception impliquant poursuite fine et saccade de correction, le tout réalisé par un micro-robot aérien libre de tout mouvement.



FIGURE 78.: Représentation schématique d'un oeil composé cylindrique (d'après le projet CURVACE) dont une zone centrale du champ visuel sera dotée d'hyperacuité grâce à une micro-vibration active et dont la vision prériphérique servira à la détection d'objets contrastés. D'après projet CURVACE.

Toujours dans une optique de mettre en oeuvre des capacités de localisation précises de cibles, des études récentes (Nordström et al. [2006]) ont montré qu'il existe notamment chez la mouche *Eristalis tenax* des neurones à petit champ visuel sensibles uniquement au déplacement de cible sous-tendant un angle très faible (0,8° x 0,2°). Point intéressant, ces neurones répondent aussi bien pour une cible se déplaçant sur un fond texturé ou un fond uniforme. Ces travaux pose une question fondamentale : quels sont les traitements visuels de bas niveau à mettre en oeuvre pour obtenir une telle robustesse et une telle sélectivité.



FIGURE 79.: a) Représentation du champ visuel du neurone STMD chez *Eristalis tenax*. Cette cartographie montre clairement une préférence du neurone pour des cibles se déplaçant vers le bas dans une zone frontale haute du champ visuel de l'oeil composé. b) Photographie d'un neurone STMD (Small Target Motion Detector Neuron) du cerveau d'une mouche *Eristalis tenax*. D'après Nordström et al. [2006].

Enfin, avec une volonté forte de faire sortir un jour nos capteurs du laboratoire, ces derniers devront avoir une même sensibilité et ce, en dépit des fortes variations d'éclairement rencontrées en environnements intérieurs et extérieurs. Maints travaux ont montré que les photorécepteurs des rétines d'invertébrés et de vertébrés ont une fonction auto-adaptative leur permettant d'être sensibles à des variations de luminance (contraste) dans une gamme d'éclairement. La figure 80 montre un exemple de caractéristiques statiques des cellules horizontales de la rétine de la tortue (Normann and Perlman [1979]).

Nous avons utilisé et validé l'utilisation de pixels auto-adaptatifs de type Delbrück (Delbruck and Mead [1994]) pour nos capteurs de flux optique (Viollet et al. [2010]



FIGURE 80.: Caractéristiques statiques des cônes de la rétine de la tortue montrant les capacité d'adaptation à des variations du niveau d'éclairement car la même courbe de sensibilité en fore de S est reproduite dans une grande gamme d'éclairement (6 décades). D'après Normann and Perlman [1979].

et Expert et al. [2011]). Cependant ce type de circuit présente l'inconvénient d'introduire une dynamique d'adaptation locale qui ne permet pas de maintenir une gamme de variation constante quel que soit le niveau d'éclairement. Une autre approche consiste à s'inspirer des résultats obtenus par électrophysiologie sur la rétine des vertébrés (tortues, lapin, singe) où la courbe statique de réponse des cellules ganglionnaires à une variation de contraste suit une loi dite de Naka-Rushton. Peu d'études ont montré que ce type de réponse pouvait être mise en oeuvre sur une rétine artificielle réalisée en VLSI analogique. Nous avons lancé en 2012 une collaboration avec le Centre de Physique des Particules de Marseille, la réalisation d'un premier circuit qui intègre les deux types de photorécepteurs : les premiers dits de Delbrück et les seconds dits de Naka-Rushton.

6.2 PILOTAGE PAR LE REGARD DE ROBOTS AÉRIENS AU-TONOMES

Stimulés par l'idée que tout système visuel (de l'homme, des animaux et des robots) risque à chaque instant d'être fortement déstabilisé par la locomotion du système qui le porte (par suite du mouvement des pattes, des ailes ou des roues) alors même qu'il a besoin, pour fonctionner correctement, d'une stabilisation performante, nous avons conçu un système oculomoteur neuromimétique doté d'un « réflexe vestibulo-oculaire ». Il est composé d'un oeil à micro-balayage, d'un micro-gyromètre et d'un capteur proprioceptif de position angulaire :

- Le micro-gyromètre est dérivé du système inertiel de la mouche (balancier) et de l'homme (canaux semi-circulaires). Il fournit une mesure de la vitesse angulaire du support de l'oeil (c'est-à-dire de la tête).
- Le capteur proprioceptif de position angulaire est lui aussi dérivé des organes prosternaux situés à la base de la tête de la mouche et permet à cette dernière de mesurer la position angulaire de sa tête par rapport à son corps.

Nous avons aussi formalisé, par une approche cybernétique basée sur la théorie des systèmes, une stratégie de pilotage innovante et extrêmement biomimétique à savoir : le pilotage par le regard. En effet, il semble qu'une stratégie qui consiste à s'orienter en fonction de l'orientation du regard a été choisie par maintes espèces (mouche, pigeon, chat, guêpe) et semble offrir de nombreux avantages, dont la capacité à verrouiller le cap par la vision uniquement (sans utilisation de compas, par exemple). Des travaux récents (Blaj and van Hateren [2004], Zeil et al. [2008] et Boeddeker and Hemmi [2009]) ont montré que cette stratégie est employée chez certains insectes ailés (mouche, guêpe), non seulement capables de stabiliser parfaitement leur tête - donc leur vision - mais aussi de changer d'orientation (de cap) en réalisant tout d'abord une saccade de la tête (saccade visuelle) qui a pour effet de réaligner automatiquement le corps en direction du regard. La figure 81 montre des saccades de l'oeil et du corps réalisées par le robot OSCAR 2 décrit dans le chapitre 3.

Fort de cette expérience et en s'appuyant sur les briques technologiques développées dans le cadre du projet CURVACE, à savoir un oeil composé artificiel, et dans le cadre du projet ANR EVA, à savoir un prototype d'engin à ailes battantes, tous les éléments sont présents pour lancer un projet d'entomoptère autonome doté d'un capteur de type oeil composé monté sur un cou, afin de stabiliser tout le système visuel. Ce type de projet ne peut naître que d'une collaboration étroite entre mécaniciens, automaticiens, roboticiens et électroniciens qui donnera lieu à la mise en place d'un second projet EVA en réponse à un appel à projet ANR.

6.3 RÉFLEXES OCULOMOTEURS POUR LA STABILISATION DU SYSTÈME VISUEL CHEZ L'INSECTE AILÉ

Toujours dans un objectif de mener, au sein d'une même équipe, à la fois des expériences de robotique et des expériences sur l'animal afin de confronter en permanence ces deux univers, j'ai encadré en 2009 un stagiaire issue de la troisième année de l'école normale supérieure de Cachan (département Biochimie - Génie Biologique). Cet étudiant a commencé à travailler sur la caractérisation des réflexes de stabilisation du système visuel chez l'insecte ailé (mouche, abeille, guêpe) en vol au point fixe. Ce travail a donné lieu à une communication à la conférence Neurocomp. Suite à ma mobilité de 5 mois à Canberra en Australie, début 2010, j'ai pu travailler sur un sujet similaire avec l'un des plus grands spécialistes du domaine, à savoir le Professeur Jochen Zeil (travail publié dans J. of Exp. Biol.). J'ai décidé de poursuivre des expériences sur la stabilisation de la tête chez l'insecte ailé en encadrant un stagiaire (5ème année de l'INSA Lyon) à partir de Mars 2011 et en construisant


FIGURE 81.: Le robot OSCAR 2 est 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 première cible, puis à chaque seconde, un offset important ($\pm 10^\circ$) est ajouté au signal Cd (voir figure schéma bloc) 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'oeil 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 au robot de se verrouiller sur la nouvelle cible malgré une consigne de saccade oculaire légèrement erronée ($\pm 10^\circ$ au lieu de $\pm 11^\circ$. D'après (Kerhuel [2009]).

un tout nouveau générateur de roulis pour insecte basé sur mon expérience acquise en Australie (cf. figure 82). Nous avons obtenu des résultats très prometteurs sur le syrphe, qui nous poussent, à poursuivre nos expérimentations pour quantifier la bande passante des réflexes de stabilisation de la tête chez cette mouche (capable de vol stationnaire) et mieux modéliser la contribution de chaque modalité sensorielle (visuelle et inertielle) à cette stabilisation.



FIGURE 82.: Générateur de roulis permettant d'étudier en condition d'éclairement maitrisé et dans l'obscurité les mouvements de compensation de la tête par rapport au corps chez l'insecte.

BIBLIOGRAPHIE

- Albus, J. and Hong, T. (1990). Motion, depth, and image flow. In *Robotics and Automation*, 1990. *Proceedings.*, 1990 *IEEE International Conference on*, pages 1161–1170 vol.2. (Cité page 30.)
- Ando, S., Nakamura, T., and Sakaguchi, T. (1997). Ultrafast correlation image sensor : concept, design, and applications. In *Proc. International Conference on Solid State Sensors and Actuators TRANSDUCERS '97 Chicago*, volume 1, pages 307–310. (Cité page 77.)
- Armstrong-Gold, C. E. and Rieke, F. (2003). Bandpass filtering at the rod to secondorder cell synapse in salamander (ambystoma tigrinum) retina. *The Journal of Neuroscience*, 23(9) :3796–3806. (Cité page 89.)
- Ballard, D. H. (1991). Animate vision. *Artificial Intelligence*, 48(1):57 86. (Cité page 92.)
- Barron, J. L., Fleet, D. J., and Beauchemin, S. S. (1994). Performance of optical flow techniques. *INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTER VISION*, 12:43–77. (Cité page 29.)
- Barth, F. (2002). *A Spider's World : Senses and Behavior*. Springer Berlin / Heidelberg. (Cité page 92.)
- Beaudot, W. (1996). Adaptive spatiotemporal filtering by a neuromorphic model of the vertebrate retina. In *Image Processing*, 1996. *Proceedings.*, *International Conference on*, volume 1, pages 427 –430 vol.1. (Cité page 35.)
- Berry, R., van Kleef, J., and Stange, G. (2007). The mapping of visual space by dragonfly lateral ocelli. *Journal of Comparative Physiology A : Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 193 :495–513. 10.1007/s00359-006-0204-8. (Cité page 36.)
- Blaj, G. and van Hateren, J. H. (2004). Saccadic head and thorax movements in freely walking blowflies. J Comp Physiol A Neuroethol Sens Neural Behav Physiol, 190(11) :861–868. (Cité aux pages 57 et 97.)
- Blanes, C. (1991). *Guidage visuel d'un robot mobile autonome d'inspiration bionique*. PhD thesis, Grenoble : Thèse INPG. (Cité page 30.)
- Boeddeker, N. and Hemmi, J. M. (2009). Visual gaze control during peering flight manoeuvres in honeybees. *Proceedings of the Royal Society B : Biological Sciences*, pages –. (Cité aux pages 52 et 97.)
- Borst, A. (2000). Models of motion detection. Nat Neurosci. (Cité page 29.)

- Borst, A. (2009). Drosophila's view on insect vision. *Curr Biol*, 19(1) :R36–R47. (Cité aux pages 6, 18 et 19.)
- Campbell, F. W. and Gubisch, R. W. (1966). Optical quality of the human eye. *The Journal of Physiology*, 186(3) :558–578. (Cité aux pages 16 et 17.)
- Chahl, J. and Mizutani, A. (2012). Biomimetic attitude and orientation sensors. *Sensors Journal*, *IEEE*, 12(2) :289–297. (Cité page <u>36</u>.)
- Collett, T. S. and Land, M. F. (1975). Visual control of flight behaviour in the hoverfly syritta pipiens l. *Journal of Comparative Physiology A : Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 99(1) :1–66. (Cité page 92.)
- Delbruck, T. and Mead, C. (1994). Adaptive photoreceptor with wide dynamic range. In *Circuits and Systems*, 1994. *ISCAS '94.*, 1994 *IEEE International Symposium on*, volume 4, pages 339–342 vol.4. (Cité aux pages 33, 35 et 95.)
- Donner, K. and Hemilä, S. (2007). Modelling the effect of microsaccades on retinal responses to stationary contrast patterns. *Vision Res*, 47(9) :1166–1177. (Cité page 17.)
- Duparre, J., Wippermann, F., Dannberg, P., and Brauer, A. (2008). Artificial compound eye zoom camera. *Bioinspiration & Biomimetics*, 3(4):046008 (6pp). (Cité aux pages 26 et 27.)
- Expert, F., Viollet, S., and Ruffier, F. (2011). Outdoor field performances of insectbased visual motion sensors. *Journal of Field Robotics*, 28(4) :529–541. (Cité aux pages 33, 34, 35 et 96.)
- Floreano, D., Pericet-Camara, R., Viollet, S., Ruffier, F., Brückner, A., Leitel, R., Buss, W., Menouni, M., Expert, F., Juston, R., Dobrzynski, M. K., L'Eplattenier, G., Recktenwald, F., Mallot, H. A., and Franceschini, N. (2013). Miniature curved artificial compound eyes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(23) :9267–9272. (Cité aux pages 28 et 29.)
- Franceschini, N. (1975). Sampling of the visual environment by the compound eye of the fly : Fundamentals and applications. In Snyder, A. and Menzel, R., editors, *Photoreceptor Optics*, pages 98–125. Springer Berlin Heidelberg. (Cité page 92.)
- Franceschini, N. (1985). Early processing of colour and motion in a mosaic visual system. *Neurosc. Res. Suppl*, 2:517–549. (Cité page 20.)
- Franceschini, N. and Chagneux, R. (1997). Repetitive scanning in the fly compound eye. In *Göttingen Neurobiology Report*, volume 2. Thieme. (Cité aux pages 69, 70, 76 et 77.)
- Franceschini, N. and Kirschfeld, K. (1971). Etude optique in vivo des elements photorecepteurs dans l'oeil composé de drosophila. *Kybernetik*, 9 :159–182. (Cité page 72.)

- Franceschini, N., Riehle, A., and Nestour, A. L. (1989). *Facets of Vision*, chapter Directionally Selective Motion Detection by Insect Neurons, pages 360–390. Springer-Verlag. (Cité aux pages 20 et 30.)
- Frederiksen, R. and Warrant, E. J. (2008). The optical sensitivity of compound eyes : theory and experiment compared. *Biol Lett*, 4(6) :745–747. (Cité page 12.)
- Geiger, G. and Poggio, T. (1977). On head and body movements of flying flies. *Biological Cybernetics*, 25:177–180. 10.1007/BF00365214. (Cité page 56.)
- Gilbert, C. and Bauer, E. (1998). Resistance reflex that maintains upright head posture in the flesh fly neobellieria bullata (sarcophagidae). *Journal of Experimental Biology*, 201(19) :2735–44. (Cité page 49.)
- Götz, K. G. (1964). Optomotorische untersuchengen des visuellen systems einiger augnmuntanten der fruchfliege drosophila. *Kybernetik*, 2 :77–92. (Cité aux pages 73 et 91.)
- Hardie, R. C. (1984). Properties of photoreceptors r7 and r8 in dorsal marginal ommatidia in the compound eyes of musca calliphora. *Journal of Comparative Physiology A : Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 154 :157–165. 10.1007/BF00604981. (Cité aux pages 7 et 72.)
- Harrison, R. R. and Koch, C. (1999). A robust analog vlsi motion sensor based on the visual system of the fly. *Autonomous Robots*, 7 :211–224. 10.1023/A :1008916202887. (Cité page 29.)
- Hateren and Schilstra (1999). Blowfly flight and optic flow. ii. head movements during flight. *J Exp Biol*, 202 (Pt 11) :1491–1500. (Cité aux pages 50, 52 et 53.)
- Hausen, K. (1984). *Photoreception and vision in invertebrates,* chapter The lobulacomplex of the fly : structure, function and signifiance in visual behaviour, pages 523–559. Plenum. (Cité aux pages 18 et 20.)
- Heisenberg, M. (1971). Separation of receptor and lamina potentials in the electroretinogram of normal and mutant drosophila. *J Exp Biol*, 55(1):85–100. (Cité page 90.)
- Hengstenberg, R. (1988). Mechanosensory control of compensatory head roll during flight in the blowfly calliphora erythrocephala meig. *J. Comp Physiol A*, 163 :151–165. (Cité aux pages 50 et 51.)
- Hengstenberg, R. (1993). Multisensory control in insect oculomotor systems. *Rev Oculomot Res*, 5 :285–298. (Cité aux pages 35, 43, 49 et 50.)
- Hengstenberg, R. (1998). Biological sensors. controlling the fly's gyroscopes. *Nature*, 392(6678) :757–758. (Cité aux pages 38, 39 et 41.)

- Hengstenberg, R., Hausen, K., and Hengstenberg, B. (1982). The number and structure of giant vertical cells (vs) in the lobula plate of the blowfly<i>calliphora erythrocephala</i>. *Journal of Comparative Physiology A : Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 149 :163–177. 10.1007/BF00619211. (Cité page 18.)
- Hensler, K. and Robert, D. (1990). Compensatory head rolling during corrective flight steering in locusts. *Journal of Comparative Physiology A : Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 166(5) :685–693. (Cité aux pages 57 et 58.)
- Horridge, G. A. (1977). The compound eye of insects. *Scientific American*, 237 :108–120. (Cité page 4.)
- Hoshino, K., Mura, F., and Shimoyama, I. (2000). Design and performance of a microsized biomorphic compound eye with a scanning retina. *IEEE J. MEMS*, 9(1):32–37. (Cité page 76.)
- Jeong, K.-H., Kim, J., and Lee, L. P. (2006). Biologically inspired artificial compound eyes. *Science*, 312(5773):557–561. (Cité page 26.)
- Joesch, M., Schnell, B., Raghu, S. V., Reiff, D. F., and Borst, A. (2010). On and off pathways in drosophila motion vision. *Nature*, 468(7321) :300–304. (Cité page 30.)
- Juston, R., Kerhuel, L., Franceschini, N., and Viollet, S. (2013). Hyperacute edge and bar detection in a bioinspired optical position sensing device. *Mechatronics*, *IEEE/ASME Transactions on*, PP(99) :1–10. (Cité page 87.)
- Juston, R., Viollet, S., Kerhuel, L., and Franceschini, N. (2011). High performance optical angular position sensing at low-cost : A bio-inspired approach. In *Sensors*, 2011 *IEEE*, pages 378–381. (Cité aux pages 85 et 86.)
- Kerhuel, L. (2009). *Capteurs optiques minimalistes et réflexes oculomoteurs biomimétiques. Applications à la robotique aérienne*. PhD thesis, Univ. de Montpellier II, Information, Systèmes, Structures. (Cité aux pages 63, 65, 66, 75, 80, 82, 83, 84 et 98.)
- Kerhuel, L., Viollet, S., and Franceschini, N. (2007). A sighted aerial robot with fast gaze and heading stabilization. In *Intelligent Robots and Systems*, 2007. *IROS 2007*. *IEEE/RSJ International Conference on*, pages 2634–2641. (Cité aux pages 59 et 62.)
- Kerhuel, L., Viollet, S., and Franceschini, N. (2010). Steering by gazing : An efficient biomimetic control strategy for visually guided micro aerial vehicles. *Robotics, IEEE Transactions on*, 26(2) :307–319. (Cité aux pages 61, 63 et 65.)
- Kerhuel, L., Viollet, S., and Franceschini, N. (2012). The vodka sensor : A bio-inspired hyperacute optical position sensing device. *IEEE J. Sensor*, 12(2) :315–324. (Cité aux pages 60, 75, 85 et 86.)
- Kern, R., van Hateren, J. H., Michaelis, C., Lindemann, J. P., and Egelhaaf, M. (2005). Function of a fly motion-sensitive neuron matches eye movements during free flight. *PLoS Biol*, 3(6) :e171. (Cité page 50.)

- Kirschfeld, K. and Franceschini, N. (1969). Ein mechanismus zur steuerung des lichtflusses in den rhabdorneren des kimplexauges von musca. *Kybernetik*, 6 :13–22. (Cité page 6.)
- Ko, H. C., Stoykovich, M. P., Song, J., Malyarchuk, V., Choi, W. M., Yu, C.-J., Geddes III, J. B., Xiao, J., Wang, S., Huang, Y., and Rogers, J. A. (2008). A hemispherical electronic eye camera based on compressible silicon optoelectronics. *Nature*, 454(7205) :748–753. (Cité page 27.)
- Koenderink, J. J. and Doorn, A. J. (1987). Facts on optic flow. *Biological Cybernetics*, 56:247–254. 10.1007/BF00365219. (Cité page 29.)
- Krapp, H. and Wicklein, M. (2008). Central processing of visual information in insects. In Basbaum, V. E. I., Kaneko, A., Shepherd, G. M., Westheimer, G., Albright, T. D., Masland, R. H., Dallos, P., Oertel, D., Firestein, S., Beauchamp, G. K., Bushnell, M. C., Kaas, J. H., and Gardner, E., editors, *The Senses : A Comprehensive Reference*, pages 131 203. Academic Press, New York. (Cité aux pages 22 et 24.)
- Krapp, H. G. and Hengstenberg, R. (1996). Estimation of self-motion by optic flow processing in single visual interneurons. *Nature*, 384(6608) :463–466. (Cité aux pages 23 et 25.)
- Krapp, H. G. and Hengstenberg, R. (1997). A fast stimulus procedure to determine local receptive field properties of motion-sensitive visual interneurons. *Vision Res*, 37(2):225–234. (Cité page 23.)
- Labhart, T. (1980). Specialized photoreceptors at the dorsal rim of the honeybee's compound eye : Polarizational and angular sensitivity. *Journal of Comparative Physiology A : Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 141 :19–30. 10.1007/BF00611874. (Cité page 7.)
- Land, M. F. (1969). Movements of the retinae of jumping spiders (salticidae : dendryphantinae) in response to visual stimuli. *J Exp Biol*, 51(2) :471–493. (Cité aux pages 13 et 76.)
- Land, M. F. (1981). *Handbook of sensory physiology*, chapter Optics and vision in invertebrates, pages 471–592. Springer Berlin / Heidelberg. (Cité aux pages 12 et 15.)
- Land, M. F. (1997). Visual acuity in insects. *Annu Rev Entomol*, 42 :147–177. (Cité aux pages 8, 10, 12 et 16.)
- Land, M. F. and Nilsson, D.-E. (2012). *Animal eyes*. Oxford animal biology series. (Cité page 21.)
- Landolt, O. and Mitros, A. (2001). Visual sensor with resolution enhancement by mechanical vibrations. *Autonomous Robots*, 11(3):233–239. (Cité page 77.)
- Liske, E. (1977). The influence of head position on the flight behaviour of the fly, calliphora erythrocephala. *J. Insect Physiol*, 23:375–179. (Cité page 49.)

- Luke, G. P., Wright, C. H. G., and Barrett, S. F. (2010). A multi-aperture bio-inspired sensor with hyperacuity. *Sensors Journal*, *IEEE*, PP(99) :1. (Cité page 91.)
- Lurie, B. and Enright, P. (2000). *Classical feedback control with Matlab*. Control Engineering. Marcel Dekker. (Cité page 63.)
- Martinez-Conde, S., Macknik, S. L., and Hubel, D. H. (2004). The role of fixational eye movements in visual perception. *Nat Rev Neurosci*, 5(3):229–240. (Cité page 89.)
- Mura, F. and Franceschini, N. (1996). Obstacle avoidance in a terrestrial mobile robot provided with a scanning retina. In *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 47–52. (Cité page 76.)
- Mura, F. and Shimoyama, I. (1998). Visual guidance of a small mobile robot using active, biologically-inspired, eye movements. In *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 3, pages 1859–1864. (Cité page 76.)
- Mücke, A. and Franceschini, N. (1991). Procion staining : novel applications. In *Synapse-transmission-modulation : Proceedings of the 19th Göttingen Neurobiology Conference*. (Cité page 69.)
- Nordström, K., Barnett, P. D., and O'Carroll, D. C. (2006). Insect detection of small targets moving in visual clutter. *PLoS Biol*, 4(3) :e54. (Cité aux pages 94 et 95.)
- Normann, R. A. and Perlman, I. (1979). The effects of background illumination on the photoresponses of red and green cones. *J Physiol*, 286 :491–507. (Cité aux pages 95 et 96.)
- Paulk, A. and Gilbert, C. (2006). Proprioceptive encoding of head position in the black soldier fly, hermetia illucens (l.) (stratiomyidae). *J Exp Biol*, 209(Pt 19) :3913– 3924. (Cité page 49.)
- Pichon, J., Blanes, C., and Franceschini, N. (1989). Visual guidance of a mobile robot equipped with a network of self-motion sensors. In *Mobile robots, Wolfe WJ, Chun WH* (*Eds*) *S.P.I.E.* 1195. (Cité aux pages 30 et 31.)
- Pichon, J. M. (1991). *Guidage visuel d'un robot mobile autonome d'inspiration bionique*. PhD thesis, Grenoble : INPG. (Cité aux pages 29 et 73.)
- Pix, W., Zanker, J. M., and Zeil, J. (2000). The optomotor response and spatial resolution of the visual system in male xenos vesparum (strepsiptera). *J Exp Biol*, 203(Pt 22):3397–3409. (Cité page 39.)
- Preuss, T. and Hengstenberg, R. (1992). 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. (Cité page 42.)
- Pudas, M., Viollet, S., Ruffier, F., Kruusing, A., Amic, S., Leppävuori, S., and Franceschini, N. (2007). A miniature bio-inspired optic flow sensor based on low temperature co-fired ceramics (ltcc) technology. *Sensors and Actuators A : Physical*, 133(1):88 95. (Cité page 31.)

Rose, A. (1973). Vision human and electronic. Plenum Press. (Cité page 15.)

- Ruffier, F. and Franceschini, N. (2005). Optic flow regulation : the key to aircraft automatic guidance. *Robotics and Autonomous Systems*, 50(4) :177 – 194. <ce :title>Biomimetic Robotics</ce :title> <xocs :full-name>ISR Biomimetic Robotics</xocs :full-name>. (Cité page 31.)
- Ruffier, F., Viollet, S., Amic, S., and Franceschini, N. (2003). 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. (Cité aux pages 30 et 33.)
- Sandeman, D. and Markl, H. (1980). Head movements in flies (calliphora) produced by deflexion of the halteres. *J Exp Biol*, 85(1) :43–60. (Cité page 50.)
- Sane, S. P., Dieudonné, A., Willis, M. A., and Daniel, T. L. (2007). Antennal mechanosensors mediate flight control in moths. *Science*, 315(5813) :863–866. (Cité page 39.)
- Schilstra, C. and van Hateren, J. H. (1998). Stabilizing gaze in flying blowflies. *Nature*, 395(6703) :654. (Cité aux pages 50 et 55.)
- Schmitz, H. and Bleckmann, H. (1998). The photomechanic infrared receptor for the detection of forest fires in the beetle melanophila acuminata (coleoptera : Buprestidae). *Journal of Comparative Physiology A*, 182(5) :647–657. (Cité page 37.)
- Schmitz, H., Soltner, H., and Bousack, H. (2012). Biomimetic infrared sensors based on photomechanic infrared receptors in pyrophilous insects. *Sensors Journal, IEEE*, 12(2):281–288. (Cité page <u>38</u>.)
- Schuppe, H. and Hengstenberg, R. (1993). Optical properties of the ocelli of calliphora erythrocephala and their role in the dorsal light response. *Journal of Comparative Physiology A : Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 173 :143–149. 10.1007/BF00192973. (Cité aux pages 35 et 36.)
- Seitz, P. (1988). Optical superresolution using solid-state cameras and digita; signal processing. *Optical Engineering*, 27(7):277535–277535–. (Cité page 28.)
- Sicard, G., Bouvier, G., Fristot, V., and Lelah, A. (1999). An adaptive bio-inspired analog silicon retina. In *Solid-State Circuits Conference*, 1999. ESSCIRC '99. Proceedings of the 25th European, pages 306–309. (Cité page 35.)
- Snyder, A. W., Stavenga, D. G., and Laughlin, S. B. (1977). Spatial information capacity of compound eyes. *Journal of Comparative Physiology A : Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 116 :183–207. 10.1007/BF00605402. (Cité aux pages 9 et 11.)
- Song, Y. M., Xie, Y., Malyarchuk, V., Xiao, J., Jung, I., Choi, K.-J., Liu, Z., Park, H., Lu, C., Kim, R.-H., Li, R., Crozier, K. B., Huang, Y., and Rogers, J. A. (2013). Digital cameras with designs inspired by the arthropod eye. *Nature*, 497(7447) :95–99. (Cité page 28.)

- Stavenga, D. (2006). *Invertebrate vision*, chapter Invertebrate photoreceptor optics, pages 1–42. Cambridge. (Cité aux pages 5 et 12.)
- Stavenga, D. G. (2003). Angular and spectral sensitivity of fly photoreceptors. i. integrated facet lens and rhabdomere optics. *J Comp Physiol A Neuroethol Sens Neural Behav Physiol*, 189(1):1–17. (Cité aux pages 14 et 72.)
- Taylor, G. K. and Krapp, H. G. (2007). Sensory systems and flight stability : What do insects measure and why? In Casas, J. and Simpson, S., editors, *Insect Mechanics and Control*, volume 34 of *Advances in Insect Physiology*, pages 231 – 316. Academic Press. (Cité aux pages 35 et 44.)
- Viollet, S. and Franceschini, N. (1999a). 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. (Cité aux pages 77 et 82.)
- Viollet, S. and Franceschini, N. (1999b). 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. (Cité page 82.)
- Viollet, S. and Franceschini, N. (2001). Super-accurate visual control of an aerial minirobot. In *Autonomous minirobots for research and edutainment, AMIRE*. (Cité aux pages 31, 73, 74 et 82.)
- Viollet, S. and Franceschini, N. (2010). A hyperacute optical position sensor based on biomimetic retinal micro-scanning. *Sensors and Actuators A : Physical*, 160(1-2):60 68. (Cité aux pages 33, 79, 80 et 81.)
- Viollet, S., Ruffier, F., Ray, T., Menouni, M., Aub andpart, F., Kerhuel, L., and Franceschini, N. (2010). Characteristics of three miniature bio-inspired optic flow sensors in natural environments. In *Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM)*, 2010 Fourth International Conference on, pages 51–55. (Cité page 95.)
- Viollet, S. and Zeil, J. (2013). Feed-forward and visual feed-back control of head roll orientation in wasps (polistes humilis, vespidae, hymenoptera). *J Exp Biol*. (Cité page 52.)
- Webb, B. (2004). Neural mechanisms for prediction : do insects have forward models? *Trends Neurosci*, 27(5) :278–282. (Cité page <u>56</u>.)
- Westheimer, G. (1981). *Visual hyperacuity*. Sensory Physiology 1. Springer-Verlag. (Cité aux pages 69 et 77.)
- Yamashita, K., Murata, A., and Okuyama, M. (1997). Golay-cell type of miniaturized infrared sensor using si-diaphragm. In *Solid State Sensors and Actuators*, 1997. *TRANSDUCERS '97 Chicago.*, 1997 International Conference on, volume 2, pages 1067 –1070 vol.2. (Cité page 37.)

- Zeil, J., Boeddeker, N., and Hemmi, J. M. (2008). Vision and the organization of behaviour. *Curr Biol*, 18(8) :R320–R323. (Cité aux pages 52, 54 et 97.)
- Zettler, F. and Järvilehto, M. (1971). Decrement-free conduction of graded potentials along the axon of a monopolar neuron. *Zeitschrift für vergleichende Physiologie*, 75(4):402–421. (Cité page 89.)

Annexe

A SÉLECTION D'ARTICLES

B CURRICULUM VITÆ

Stéphane Viollet, Chargé de Recherche et Responsable d'équipe

Institut des Sciences du Mouvement (Biorobotique) / UMR 7287 CNRS/Aix-Marseille Université CP 910 - 163, Ave de Luminy 13288, MARSEILLE, France Tel/Mél : 04 91 82 83 68 / stephane.viollet@univ-amu.fr 40 ans.

Sujets de Recherche : Stabilisation visuelle, guidage visuo-inertiel, micro-mouvements rétiniens, réflexes oculomoteurs, stabilisation du regard, micro-robotique aérienne, vol stationnaire.

Diplome

2001 : Docteur de l'INPG, spécialité Electronique, Electrotechnique, Automatique et Traitement du signal Institut National Polytechnique de Grenoble, (mention très honorable avec félicitations du jury). Thèse effectuée au laboratoire CNRS de Neurobiologie de Marseille dans l'équipe Neurocybernétique dirigée par N. Franceschini.

| Soutenance : le 26 s | eptembre 2001, devant le jury composé de : |
|--|---|
| Président du jury : M. G. Bouvier, Professeur à l'Institut | |
| | National Polytechnique de Grenoble , |
| Rapporteurs externes : M. A. Bourjault, Professeur et directeur du Laboratoire | |
| | d'Automatique de Besançon, |
| | M. R. Zapata, Maître de Conférence à l'Université de Montpellier 2, |
| Directeur de thèse : M. N. Franceschini, Directeur de Recherche CNRS à | |
| | l'UMR "Mouvement et Perception" de Marseille (Equipe Biorobotique), |
| Examinateur : | M. J. Hérault, Professeur à l'Université Joseph Fourier |
| | de Grenoble. |

Expérience professionnelle

Oct 2003 : Chargé de Recherche CNRS dans l'équipe Biorobotique au sein de l'Institut des Sciences du Mouvement, Marseille, France.

2001-2003: Etude Post-Doctorale dans l'équipe Biorobotique.

1997-2001: Doctorant dans l'équipe Biorobotique.

Prix et récompenses

- 2011 : "IEEE Best student paper award First place" au congrés international IEEE Sensors, Limerick, Irlande.
- 2005 : Lauréat du prix LA RECHERCHE 2005, mention « mobilité » (N. Franceschini, S. Viollet, F. Ruffier).
- 2004 : " IEEE Best Vision Paper Finalist Award " au congrés ICRA, New Orleans, USA.
- 2003 : " IEEE Outstanding Paper Award " au congrés international ICAR, Coimbra, Portugal.
- 2002 : Prix de la meilleure thèse, Institut National Polytechnique, Grenoble,
 pour ma thèse préparée dans l'équipe Biorobotique
 du Laboratoire Mouvement et Perception, Marseille, et soutenue à l'INPG, Grenoble.

C RAYONNEMENT ET RESPONSABILITÉS SCIENTIFIQUES

C.1 RESPONSABILITÉS ADMINISTRATIVES ET SCIENTI-FIQUES

- Depuis 2009 : Responsable de l'équipe Biorobotique au sein de l'Institut des Sciences du Mouvement (UMR 6233), Marseille.
- Depuis 2009 : Membre du comité scientifique de pilotage du GDR Robotique.

C.2 JURY DE THÈSE

- Juillet 2012 : Examinateur de la thèse de Brahim Jawad (Ecoles de Mines de Nantes, Directeur de thèse : F. Boyer) : Modélisation de l'electro-location pour la bio-robotique
- Novembre 2010 : Examinateur de la thèse de Bruno Hérissé (Université de Nice, Directeur de thèse : T. Hamel) : Asservissement et Navigation d'un drone en environnement incertain par flot optique
- Novembre 2008 : Examinateur de la thèse de Hala Rifai (INPG, Directeur de thèse : N. Marchand) : Modélisation et commande d'un robot biomimétique volant.

C.3 PARTICIPATION À DES PROJETS

• Coordinateur du projet ANR IRIS (Appel à projet INS, 01/10/2012 - 01/03/2016) : Conception et réalisation de capteurs visuels bioinspirés intégrant des fonctions de mesure de flux optique et de localisation de cibles.

- Responsable scientifique d'un équipement d'excellence (EQUIPEX) financé dans le cadre du projet ROBOTEX (2011 2019). Mise en oeuvre d'une arène de vol pour robots aériens incluant un système de localisation 3D.
- Responsable pour la partie française (laboratoires ISM et CPPM) du projet européen ICT/FET open : CURVACE (01/10/2009 – 01/04/2013). Conception et réalisation d'un oeil composé artificiel.
- Responsable technique et scientifique pour l'équipe Biorobotique dans le projet ANR EVA (Entomoptère Volant Autonome) (01/01/2009 - 31/12/2012, appel à Projets Contenu et Interaction). Conception et réalisation d'un micro-capteur de flux optique.
- Responsable d'un projet ESA (Agence Spatiale Européenne) intitulé : Neuromorphic Computation of Optic flow data, European Spatial Agency (01/01/09 - 01/05/09, 4 mois). Etudes de stratégies biomimétiques pour l'atterrissage lunaire automatique.
- Responsable scientique du projet Wi-fly (07/07 07/09), Programme CNRS interdisciplinaire de recherche (PIR) Neuroinformatique. Le projet Wi-Fly est une étude sur la possibilité d'enregistrer des signaux électrophysiologiques sur un insecte sans liaison filaire ni source d'énergie embarquée.
- Responsable technique du projet ANR RETINAE (01/12/05 20/12/08). Conception et réalisation d'un robot aérien capable de maintenir son regard verrouillé sur une cible. Co-encadrement de la thèse de Lubin Kerhuel.
- Responsable technique d'un projet DGA REI (01/01/06 01/01/09). Etude de stratégies biomimétiques en robotique autonome.

Responsable technique du projet européen IST/FET MARVEL (1999 - 2003). Conception et réalisation d'un capteur de flux optique en collaboration avec l'université d'Oulu (Finlande).

D ENCADREMENT

Depuis le début de mon activité de chercheur post-doctoral, puis de Chargé de Recherche CNRS, j'ai co-encadré 4 stagiaires (diplôme de fin d'études), 1 doctorant (Lubin Kerhuel) et 1 ingénieur de valorisation. Je co-encadre actuellement 3 doctorants (Raphaël Juston, Frédéric Roubieu et Augustin Mannecy).

D.1 DOCTORANTS

- 2006 2009 : Co-encadrement avec Nicolas Franceschini de Lubin Kerhuel dont le sujet de thèse concernait les mouvements oculaires, et plus précisément la fusion des nombreux réflexes oculaires : réflexe saccadique, réflexe vestibulooculaire, réflexe de stabilisation du regard, réflexe de poursuite fine, avec reconstitutions robotiques sur un micro-œil. Ce travail de thèse s'est soldé par un publication dans la conférence majeure de robotique IEEE IROS, deux publications de rang A (IEEE Trans. on robotics et IEEE Sensors) ainsi que deux brevets européens.
- 2009 2013 : Encadrement de Raphaël Juston dans le cadre du projet européen CURVACE. Ce sujet concerne l'étude des micro-mouvements rétiniens appliqués à oeil composé artificiel de manière à améliorer l'acuité de ce dernier (hyperacuité). Un démonstrateur robotique est aussi prévu afin de montrer les performances de l'oeil pour la stabilisation en vol stationnaire d'un micro-aéronef.
- 2009 2012 : Co-encadrement avec Franck Ruffier de Frédéric Roubieu dans le cadre du projet ANR EVA (Entomoptère Volant Autonome). Mise en oeuvre de boucles sensori-motrices bio-inspirées pour le pilotage d'un aéroglisseur autonome dans un couloir.
- 2011 2014 : Co-encadrement et co-financement avec Nicolas Marchand (Gipsa-Lab, Grenoble) d'Augustin Mannecy. Pilotage biomimétique d'un micro aéronef libre capable de vol stationnaire de grande précision.

D.2 STAGIAIRES

• Février 2012 - Juin 2012 : Encadrement de Waël Njah (5ème année de l'ESISAR, Valence) dans le cadre de l'Open-Lab avec PSA : Interface intelligente pour l'au-

tomobile.

- Juin 2012 Aout 2012 : Encadrement de Lucas Baldo (4ème année ENSE3, Grenoble) : Banc de mesure de force de poussée d'un système à ailes battantes.
- Mai 2012 Juin 2012 : Encadrement de Romain Vidovic (Master 1 Neurosciences, Marseille) : Rôle de l'entrée visuelle dans la stabilisation de la tête chez l'insecte en vol.
- Septembre 2011 Février 2012 : Encadrement d'Antoine Bongard (4ème année de l'Université Technologique de Compiègne, spécialité mécanique). Etude aérodynamique d'une aile battante pour micro-aéronef.
- Mars Juillet 2011 : Encadrement d'Alice Julien-Laferriere (5ème année INSA, Lyon), étude des réflexes oculomoteurs chez l'insecte ailé.
- Mars Aout 2009 : Encadrement de Thomas Ray (5ème année ISEN, Toulon), Caractérisation de capteurs de flux optique Biomimétiques sous différentes luminosités.
- Mars Juillet 2009 : Encadrement de Charles Thurat (3ème année ENS Cachan), étude des réflexes oculomoteurs chez l'insecte ailé.
- Juillet 2007 : Co-encadrement (avec Laurent Goffart, INCM, Marseille) de Ousmane Dieng, dernière année ENSERB, Bordeaux, modélisation de saccades oculaires.
- 2006, un stagiaire (Master Recherche de l'Université Technologique, Belfort)
- 2006, un stagiaire (IUT GEII 2ème année, Marseille)
- 2002, un stagiaire (IUT GEII 2ème année, Marseille)
- 2002, un stagiaire (ingénieur 3ème année ENSERG, Grenoble)

Enfin, en 2005, j'ai co-encadré avec Nicolas franceschini un ingénieur de valorisation travaillant sur l'application des micromouvements rétiniens de la mouche à un système de détection d'obstacles pour les hélicoptères.

E PUBLICATIONS

E.1 JOURNAUX INTERNATIONAUX À COMITÉ DE LECTURE

- D. Floreano, R. Pericet-Camara, **S. Viollet** *et al.* (2013) Miniature curved artificial compound eyes, PNAS, vol. 110, nb. 23, pp. 9267-9272.
- **S. Viollet** and J. Zeil (2013). Feed-forward and visual feed-back control of head roll orientation in wasps (Polistes humilis, Vespidae, Hymenoptera), J. of Experimental Biology, vol. 216, pp. 1280-1291.
- R. Juston, L. Kerhuel, N. Franceschini and S. Viollet (2013). Hyperacute edge and bar detection in a bio-inspired optical position sensing device, IEEE Transactions on Mechatronics, doi: 10.1109/TMECH.2013.2265983, in press.
- L. Kerhuel, S. Viollet and N. Franceschini (2012). The VODKA sensor : a bioinspired hyperacute optical position sensing device. IEEE Sensors Journal, vol. 12, no. 2, pp. 315-324.
- F. Expert, S. Viollet and F. Ruffier (2011). Indoor and Outdoor performances of insect-based visual motion sensors, Journal of Field Robotics, vol. 28, pp. 529-541.
- S. Viollet, F. Ruffier, T. Ray, M. Menouni, F. Aubépart, L. Kerhuel and N. Franceschini (2011) Performances of Three Miniature Bio-inspired Optic Flow Sensors under Natural Conditions, Sensors and Transducers, vol. 9, pp. 151-159.
- S. Viollet and N. Franceschini (2010) A hyperacute optical position sensor based on biomimetic retinal micro-scanning, Sensors and Actuators A : Physical, Vol. 160, pp. 60- 68.
- 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, Vol. 26, pp. 307-319.
- N. Franceschini, S. Viollet, F. Ruffier and J. Serres (2008) Neuromimetic Robots inspired by Insect Vision, Advances in Science and Technology Vol. 58 (2008) pp 127-136, online at http://www.scientific.net.
- M. Pudas, S. Viollet, F. Ruffier, A. Kruusing, S. Amic, S. Leppävuori and N. Franceschini (2007) A miniature bio-inspired optic flow sensor based on low temperature co-fired ceramics (LTCC) technology, Sensors and Actuators A : Physical, Vol. 133, pp. 88-95.
- J. Serres, F. Ruffier, **S. Viollet** and N. Franceschini (2006) Toward optic flow regulation for wall-following and centring behaviours, International Journal of Avanced Robotic Systems, Vol. 3, No . 2, pp. 147-154.
- S. Viollet and N. Franceschini (2005) A high speed biomimetic gaze control system based on a vestibulo-ocular reflex, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 50, No. 4, pp. 147-161.

- F. Ruffier, S. Viollet, N. Franceschini (2004) Two autopilots based on insect vision for aerial robots, Advanced Robotics, Vol.18, No. 8, pp. 771-786.

E.2 JOURNAUX NATIONAUX À COMITÉ DE LECTURE

 J. Serres, S. Viollet, L. Kerhuel et N. Franceschini (2009) Régulation de vitesse d'un micromoteur à courant continu sans capteur au moyen d'un microcontrôleur dsPIC programme par une passerelle Matlab/Simulink, La Revue 3EI, Vol. 56, pp. 66-74, ISSN 1252-770X.

E.3 CONFÉRENCES INTERNATIONALES À COMITÉ DE LEC-TURE

- A. Manecy, N. Marchand and S. Viollet (2013) Decoupling the eye : a key toward robut hovering for sighted aerial robots, EuroGNC conference, Delft, Netherlands.
- F. L. Roubieu, J. Serres, N. Franceschini, F. Ruffier and **S. Viollet** (2012) A fully autonomous hovercraft inspired by bees : wall following ans speed control in straight and tapered corridors, IEEE RoBio, pp. 1311-1318.
- R. Juston, S. Viollet (2012) A Miniature Bio-Inspired Position Sensing Device for the Control of Micro-Aerial Robots, IEEE Internat. Conf. on Intelligent Robots and Systems IROS'2012, Vila Moura, Portugal, pp. 1118-1124.
- A. Manecy, S. Viollet, N. Marchand (2012) Bio-Inspired Hovering Control for an Aerial Robot Equipped with a Decoupled Eye and a Rate Gyro, IEEE Internat. Conf. on Intelligent Robots and Systems IROS'2012, Vila Moura, Portugal, pp. 1110-1117.
- F. Expert, S. Viollet, F. Ruffier (2011) A mouse sensor and a 2-pixel motion sensor exposed to continuous illuminance changes, IEEE Sensors 2011 conference, Limerick, Ireland, pp. 974-977.
- F. L. Roubieu, F. Expert, M. Boyron, B. Fuchslock, S. Viollet, F. Ruffier (2011) A novel 1-gram insect based device measuring visual motion along 5 optical directions, IEEE Sensors 2011 conference, Limerick, Ireland, pp. 687-690. Best Student Paper Award - First place.
- R. Juston, S. Viollet, L. Kerhuel and N. Franceschini (2011) High Performance Optical Angular Position Sensing at Low-cost : a Bio-inspired Approach, IEEE Sensors 2011 conference, Limerick, Ireland, pp. 378-381.
- S. Viollet, L. Kerhuel and N. Franceschini (2011) A hyperacute optical position sensing device based on eye tremor, in : European Conf. on Eye Movements, ECEM, Marseille, France.
- S. Viollet, L. Kerhuel and N. Franceschini (2011) Steering by Gazing : An Efficient Biomimetic Strategy for the Visual Stabilization of Micro-Air Vehicles, Workshop on bio-inspired robots, Nantes, France.

- L. Kerhuel, S. Viollet and N. Franceschini (2010) A hyperacute Vibrating Optical Device for the Control of Autonomous robots (VODKA), in : conf. on Simulation and Adaptive Behavior SAB, Workshop on Smarter Sensors, Easier Processing.
- S. Viollet, F. Ruffier, T. Ray, M. Menouni, F. Aubépart, L. Kerhuel and N. Franceschini (2010) Characteristics of three miniature bio-inspired optic flow sensors in natural environments. In Proc. of the IEEE Conf. on Sensors Technologies and Applications, Sensorcomm, Venise, Italia, pp. 51-55.
- F. Valette, F. Ruffier, S. Viollet and T. Seidl (2010) Biomimetic optic flow sensing applied to a lunar landing scenario. In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, ICRA '2010, Anchorage, USA, pp. 2253-2260.
- C. Thurat, S. Viollet and N. Franceschini (2009) Head compensation reflexes in flying insects. In Proc. of the Computational Neuroscience conf., Neurocomp'09, pp. 31, Bordeaux, France.
- 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.
- N. Franceschini, S. Viollet, F. Ruffier and J. Serres (2008) Neuromimetic Robots Inspired by Insects' Visuomotor Control Systems. In Proc. of the CIMTEC conference, Acireale, Sicily, Italy.
- L. Kerhuel, S. Viollet and N. Franceschini (2007) A sighted aerial robot with fast gaze and heading stabilization. In Proc. of the IEEE IROS 2007, 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.
- S. Viollet, J. Michelis and N. Franceschini (2006) Towards a bio-inspired, low-cost and non-emissive powerlines detector. Proceedings of the 32nd European Rotorcraft Forum ERF'32, Maastricht, Netherlands, Paper AD09.
- S. Viollet and N. Franceschini (2004) A miniature biomimetic gaze control system. In Proc of the IEEE ICRA 2004, New-Orleans, USA, pp. 504-510.
- S. Viollet, F. Ruffier, and N. Franceschini (2004) Visual stabilisation and guidance of micro aerial robots : a biomimetic approach. Proceeding of the 35th International Symposium on Robotics (ISR 2004), ref THS 31-4, Paris.
- F. Ruffier, S. Viollet, and N. Franceschini (2003) OSCAR and OCTAVE : Two bioinspired visually guided aerial micro-robots. IEEE Int Conference on Advanced Robotics ICAR 2003, Coimbra, Portugal, pp. 726-732.
- F. Ruffier, S. Viollet, S. Amic, and N. Franceschini (2003) Bio-inspired optic flow circuits for the visual guidance of micro-air vehicles. IEEE Int Symposium on Circuits and Systems ISCAS 2003, Bangkok, Thailande, pp. 846-849.
- S. Viollet, and N. Franceschini (2001) Super-accurate visual control of an aerial minirobot. Autonomous Minirobots for Research and Edutainment AMIRE, U. Rücckert, J. Sitte and U. Witkowski (Eds), Heinz Nixdorf Institute, Paderborn, Allemagne, ISBN 3-935433-06-9, pp. 215-224.
- S. Viollet, and N. Franceschini (1999) Biologically-Inspired Visual Scanning Sensor for Stabilization and Tracking. IEEE Internat. Conf. on Intelligent Robots and Systems IROS' 99, Kyongju, Corée, ISBN 0-7803-5184-X, pp. 204-209.

- S. Viollet, and N. Franceschini (1999) Visual servo system based on a biologicallyinspired scanning sensor Sensor fusion and decentralized control in Robotics II, G.T. McKee and P. Schenker (Eds.), SPIE vol. 3839, USA, ISBN 0-8194-3432-9, pp. 144-155.
- C. Savignac , B. Bergeon and S. Viollet (1998) Bumpless switching of two-degreeof-freedom generic controller. IEE Int. Conf. on Control' 98, Swansea, Royaume Uni.

E.4 CONFÉRENCES INTERNATIONALES SUR INVITATION ET SANS ACTES

- N. Franceschini, S. Viollet, et L. Kerhuel (2011) Biomimetic visual sensors and visuo-motor control systems : lessons from insects. Engineering Neo-Biomimetics
 Soft Materials and Soft Robotics, AIST Conf., Tsukuba, Japon.
- R. Pericet-Camara, S. Viollet, R. Leitel, H. Mallot, Dario Floreano (2011) CUR-VACE CURVed Artificial Compound Eyes. Poster contribution for FET 11 conference in Budapest, Hongrie.
- L. Kerhuel, **S. Viollet**, et N. Franceschini (2008) Insect-baze gaze contol system and heading stabilization. Int Conf on Invertebrate Vision, Bäckaskog Castle, Suède.
- L. Kerhuel, S. Viollet and N. Franceschini (2006) Insect Based Visual Processing for Micro-Flying Robots, Abstract pour la conférence Sensory Ecology, Lund, Suède.
- N. Franceschini, **S. Viollet** and F. Ruffier (2004) Insect based autopilots for microair vehicles. Int conf on insect's sensors and robotics, Brisbanne, Australie.
- S. Viollet, et N. Franceschini (2002) Visual/Inertial sensory fusion onboard a micro air vehicle. NASA Workshop on combating uncertainty with fusion, Woodshole, USA.
- **S. Viollet**, et N. Franceschini (2001) Sub-pixel accuracy in target fixation and tracking. Int Conf on Invertebrate Vision, Lund, Suède.

E.5 CONFÉRENCES NATIONALES AVEC ACTES ET SANS COMITÉ DE LECTURE

- S. Viollet, L. Kerhuel, et N. Franceschini (2009) Exercices de Biorobotique aérienne, Congrès Français de Mécanique (CFM'09), Session Biomécanique, Mécanique du Vivant, Biomimétisme.
- S. Viollet, L. Kerhuel, L. Goffart et N. Franceschini (2007) RETINAE : Reflex Tricks in Natural and Artificial Eyes. Colloque USAR-ANR sur les Technologies matérielles embarquées, Sophia-Antipolis.

- L. Kerhuel, S. Viollet, et N. Franceschini (2007) Stabilisation en lacet d'un robot aérien : fixation visuelle et réflexe vestibulo-oculaire ultra-rapide. Journées Nationales de la recherche en robotique, Obernai.
- F. Ruffier, S. Viollet, S. Amic et N. Franceschini (2003) Circuit de guidage visuels bio-inspirés pour mini-robot aérien. 2èmes Journées du RTP Micro-robotique, Bourges.
- S. Viollet, et N. Franceschini (2003) Stabilisation en lacet d'un micro-robot aérien par la vision. 2ème Journées Microdrones, Toulouse.
- S. Viollet, et N. Franceschini (2002) OSCAR, capteur visuel neuromimétique pour le contrôle de robots autonomes. 1ère Journée du RTP Micro-robotique, Rennes.
- N. Franceschini, T. Netter, S. Viollet, F. Ruffier et F. Aubépart (2002) Projet européen sur les micro-aéronefs : un défi transdisciplinaire, scientifique et technologique. Journées du programme interdisciplinaire ROBEA, LAAS, Toulouse, oct. 2002.
- N. Franceschini, T. Netter, **S. Viollet**, F. Ruffier et F. Aubépart (2002) Microdrones biomimétiques. Journées CNRS/DGA, Arcueil, nov. 2002.
- S. Viollet, et N. Franceschini (2000), Capteur visuel d'inspiration biologique pour la stabilisation en lacet d'un micro-aéronef. Neurosciences et Sciences pour l'Ingénieur NSI'2000. G. Vaucher (Ed), Dinard, France, pp. 153-156.
- S. Viollet, et N. Franceschini (1999) Fixation visuelle et poursuite fine d'une cible par un micro-aéronef captif. Journées Microsystèmes du CNRS, Paris, pp. 249-256.

E.6 CHAPITRES DE LIVRE

- S. Viollet, L. Kerhuel and N. Franceschini (2009) A novel biomimetic steering control system for sighted vehicles. Intelligent Aerial Vehicles, In-Tech, Vienna, Austria, pp. 653-670.
- N. Franceschini, F. Ruffier, J. Serres and S. Viollet (2008) Optic flow based visual guidance : from flying insects to miniature aerial vehicles in : Intelligent Aerial Vehicles, In-Tech, Vienna, pp. 747-770.
- N. Franceschini, S. Viollet, F. Ruffier et J. Serres (2008) Neuronics and Nanomechatronics, in : Nanomaterials and insect Biomimetics following the Sendai symposium on insect mimetics and nano materials. Masatsugu Shimomura, Tateo Shimozawa (Ed.), Tokyo : NTS Inc, pp. 1-18.
- N. Franceschini, S. Viollet(2008), F. Ruffier and J. Serres, Neuromorphic robots inspired by insect vision, In : Mining smartness from Nature, P. Vincenzini and S. Graziani (Eds.), Transtech Publ-Ltd, Switzerland.
- N. Franceschini et S. Viollet(2007) L'oeil frétillant d'OSCAR. Voir l'invisible, H. Fox-Keller et J. P. Jex (Eds), Omnisciences, Paris, pp. 214-215.
- N. Franceschini, S. Viollet, and T. Netter (2002) Vom Fliegenauge zur Roboter-Orientierung. Bionik, 2ème édition, W. Nachtigall (Ed), Springer, Berlin, Germany, ISBN 3-540-43 660-X, pp. 257-261.

- S. Viollet, and N. Franceschini (2002) Visual servo system based on a biologicallyinspired scanning sensor. Neurotechnology for Biomimetic Robots, J. Ayers, J. Davis and A. Rudolph (Eds), MIT Press, Cambridge, USA, ISBN 0-262-01193-X, pp. 57-71.
- S. Viollet, and N. Franceschini (2001) Aerial minirobot that stabilizes and tracks with a bio-inspired visual scanning sensor. Biorobotics, B. Webb and T. Consi (Eds), MIT Press, Cambridge, USA, ISBN 0-262-73141X, pp. 67-73.

E.7 BREVETS

- **S. Viollet**, Kerhuel, L. (2012), Method and device for measuring the angular position of an emitting or reflecting object with hyperacuity, May 18th 2012, EP12305554.
- Duparré, J., Bruckner, A., Wippermann, F., Zufferey, J. C., Floreano, D., Franceschini, N., S. Viollet, Ruffier F., (2009). Artificial compound eye and method for fabrication, Septembre, 30th 2009, EP09/012409.0.
- Kerhuel, L., Ruffier, F., S. Viollet, (2009).Method and device for measuring the angular velocity of a luminance transition zone and steering aid system for fixation and tracking a target comprising at least one such luminance transition zone, Décembre 15th2009, EP09306237.0.
- Kerhuel, L., S. Viollet, Franceschini., N, (2009). Method and device for measuring the angular position of a rectilinear contrasting edge of an object, and system for fixation and tracking a target comprising at least one such contrasting edge, Décembre 2009, EP09306239.
- N. Franceschini, S. Viollet et M. Boyron (2004), 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 (brevet CNRS 004 04352). Numéro de publication : EP1738135. Extension mondiale PCT WO2005111536.
- N. Franceschini, F. Ruffier, S. Viollet et M. Boyron (2002), Système d'assistance au pilotage de l'altitude et de la vitesse horizontale, perpendiculaire à l'aplomb, d'un aéronef et aéronefs équipés de ce système (brevet CNRS 02 11454). Numéro de publication : EP1540436. Extension mondiale PCT ZA200502033.

E.8 ÉDITION DE REVUES SCIENTIFIQUES

- Boyer, F. ; Stefanini, C. ; Ruffier, F. and S. Viollet (2012) Special issue featuring selected papers from the International Workshop on Bio-Inspired Robots (Nantes, France, 6–8 April 2011) Bioinspiration and Biomimetics, 7, 020201.
- S. Viollet and F. Ruffier (2009) Guest editorial : Visual Guidance systems for small unmanned aerial vehicles. Autonomous robots. Vol. 27, pp. 145-146.

E.9 SÉMINAIRES SUR INVITATION ET JOURNÉES

- S. Viollet (Novembre 2012). Biomimetic gaze control strategies for robotics. Forum annuel du GDR Vision, INT, Marseille.
- S. Viollet (Septembre 2012). Stratégies bio-inspirées de pilotage par le regard. Journées nationales de la robotique humanoïde, LIRMM, Montpellier.
- S. Viollet (Mars 2012). De la mouche au robot *et vice versa*. Séminaire dans le cadre des journées Recherche animale : Nouvelle tendance, Journées du groupement des Animalerie de Grenoble.
- R. Juston, S. Viollet (Janvier 2012). Capteur optique bio-inspiré doté d'hyperacuité. Séminaire dans le cadre du GT8 du GDR robotique sur invitation du Dr. Philippe Soueres.
- S. Viollet (Décembre 2011) Biomimetic gaze control strategies. Séminaire au Workshop on Mathematical Models of Cognitive architectures sur invitation du Dr. Viktor Jirsa.
- S. Viollet (Novembre 2011) Capteurs bio-inspirés pour l'automobile. Séminaire au centre de recherche du groupe PSA Vélizy sur invitation du département facteurs humains.
- S. Viollet (Septembre 2011) De l'animal au robot et vice versa. Séminaire dans le cadre du GT8 du GDR robotique sur invitation du Dr. Philippe Soueres.
- S. Viollet (Juin 2010) Steering by gazing. Séminaire de la Research School in Biological Sciences (Canberra, Australie) sur invitation du professeur Jochen Zeil.
- S. Viollet (Mai 2010) Steering by gazing. Séminaire au Brain Institute (Brisbane, Australie) sur invitation du professeur Mandyam Srinivasan.
- S. Viollet (Avril 2010) Steering by gazing. Séminaire à l'Université d'2Adélaide (Australie) sur invitation du professeur David O'Carroll.
- S. Viollet (Octobre. 2009) Stratégie biomimétique de pilotage automatique par le regard. Séminaire à Saint-Charles, Marseille, laboratoire de la Neurobiologie et de la Cognition (sur invitation de B. Poucet).
- S. Viollet (Octobre. 2008) Stratégie biomimétique de pilotage automatique par le regard. Séminaire à Jussieu, Paris, laboratoire ISIR (sur invitation de E. Pissaloux).
- S. Viollet (Mars. 2008) Système visuel biomimétique pour le verrouillage de cap d'un micro aéronef, Groupe de Travail sur les UAV, GDR MAC, Paris (sur invitation d Dr. Isabelle Fantoni).
- S. Viollet (Avril. 2008) Y a-t-il un pilote dans l'insecte? Conférence donnée lors du Printemps des chercheurs, Marseille.
- S. Viollet (sept. 2006) Micro-mouvements rétiniens. Equipe Dyva, INCM, Marseille (sur l'invitation du Dr F. Chavane)
- S. Viollet (sept. 2005) Présentation du projet ANR RETINAE. Equipe Dyva, INCM, Marseille (sur l'invitation du Dr F. Chavane)
- S.Viollet et F. Ruffier (oct. 2004) OSCAR et OCTAVE : Deux robots aériens biomimétiques. Institut de Recherche en Communications et en Cybernétique de

Nantes (IRCCyN), UMR 6597, CNRS/Ecole Centrale de Nantes/Univ. de Nantes/Ecole des Mines de Nantes, (sur l'invitation du Dr. F. Boyer).