



HAL
open science

Microdrones bio-inspirés

Julien Serres, Stéphane Viollet, Franck Ruffier

► **To cite this version:**

Julien Serres, Stéphane Viollet, Franck Ruffier. Microdrones bio-inspirés : Doter nos futurs robots aériens de l'agilité des insectes. Les Techniques de l'Ingenieur, 2017, pp.S7717 V1. hal-01574508

HAL Id: hal-01574508

<https://amu.hal.science/hal-01574508>

Submitted on 18 Aug 2017

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

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

Copyright

Ref. S7717
Microdrones bio-inspirés
Doter nos futurs robots aériens de l'agilité des insectes

Julien SERRES^{1*}, Stéphane VIOLLET^{2*}, and Franck
RUFFIER^{3*}

¹*Maître de Conférences, Aix-Marseille Université,*

²*Directeur de recherche CNRS*

³*Chargé de recherche CNRS*

** Aix Marseille Univ, CNRS, ISM, Marseille, France*

June 9, 2017

Résumé

Aujourd'hui, les insectes volants sont perçus comme étant de véritables aéronefs minuscules et agiles, équipés d'un cerveau parcimonieux, capables de naviguer à vue en environnements imprévisibles. Comprendre le fonctionnement de tels petits animaux permettrait de résoudre les différentes problématiques inhérentes à la miniaturisation des drones. Robotiser un drone de ~ 1 kg est envisageable en miniaturisant l'avionique existante, mais au détriment de leur autonomie en vol. En revanche, robotiser un drone de ~ 1 g à ~ 100 g nécessite une démarche innovante s'inspirant des insectes volants sur le plan de leur système de propulsion basé sur des ailes battantes, ou de leur système sensori-moteur basé principalement sur la vision pour se stabiliser, s'orienter, naviguer, ou bien encore voir et éviter les obstacles.

Abstract

These days, flying insects are seen as genuinely agile aircraft fitted with a parsimonious brain capable of visually navigating in unpredictable environments. Understanding, how such tiny animals work, would allow engineers to figure out different issues in relation with drones miniaturization. To turn a drone into a robot of ~ 1 kg, conventional avionics can be employed by miniaturizing avionic systems, but at the expense of their flight autonomy. However, turning a drone into a robot of a mass between ~ 1 g and ~ 500 g requires an innovative approach taking inspiration from flying insects both with regard to their flapping wings propulsion system and their visio-sensory system mainly based on motion in order to orientate in space, to navigate, or to see and avoid obstacles.

Ref. S7717

Microdrones bio-inspirés

Doter nos futurs robots aériens de l'agilité des insectes

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 difficiles 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 méthodes de fusion multi-sensorielle et de complexité calculatoire adaptée aux ressources embarquées.

1.1 Typologie des microdrones

Nous décrivons dans cette partie quelques-unes des plate-formes aériennes qui ont été utilisées pour robotiser des micro-aéronefs. Un micro-aéronef (ou microdrone) peut être défini comme un engin volant autonome dont l'envergure est inférieure à 0,15 m, la masse est inférieure à 100 g, et dont l'autonomie de vol serait d'au moins de 15 minutes. Face à de telles contraintes, encore peu réalisables aujourd'hui, de nombreux laboratoires de recherche académiques développent actuellement des plate-formes aériennes originales (mais de taille généralement beaucoup plus grande, et surtout plus lourde) pour explorer les possibilités de robotisation des microdrones. En effet, les connaissances acquises sur les aéronefs grandeur nature et les drones actuels ne sont pas immédiatement transposables sur des engins volants ultra-miniaturisés.

1.1.1 L'aéroglesseur : un véhicule aérien

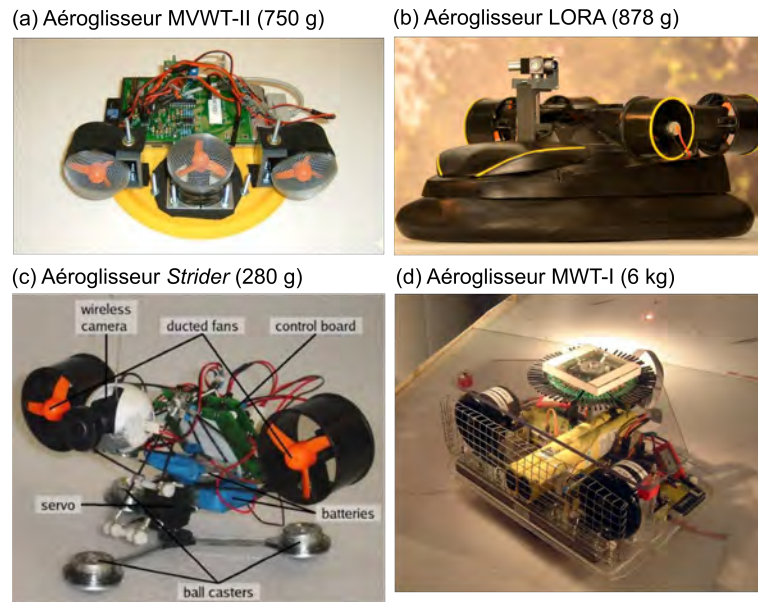


FIGURE 1.1 : (a) Aéroglesseur sous-actionné MVWT-II (2004) : masse 750 g, diamètre 0,2 m, vitesse maximale 2,5 m/s [1]. Crédit : Richard Murray, CALTECH.(b) Aéroglesseur totalement actionné LORA développé par le CNRS/Aix-Marseille Université (2014) : masse 878 g, dimensions 0,36x0,21x0,17 m, vitesse maximale 3 m/s. Extrait de [2] sous licence CC-BY. (c) Aéroglesseur *Strider* (2010) en contact avec le sol sur 3 billes, et développé par l'Université de Barcelone. D'une masse de 280 g pour une longueur $\sim 0,16$ m, il peut se déplacer jusqu'à 3 m/s. Extrait de [3] sous licence CC-BY. (d) Aéroglesseur sous actionné MVWT-I (2004-2011) en contact avec le sol au moyen de patins : masse 6 kg, dimensions 0,37x0,27 m, vitesse maximale 1,5 m/s [1, 4]. Crédit : Sawyer B. Fuller, CALTECH.

De nombreuses plate-formes de type aéroglesseur ont été récemment développées dans le but de se rapprocher des conditions de vol des microdrones dans le plan horizontal (Fig. 1.1). En effet, l'aéroglesseur est seulement doté de 3 degrés de liberté du plan horizontal, contre 6 pour un micro-aéronef en vol libre. Travailler sur un aéroglesseur permet donc de s'affranchir simultanément des contraintes d'une stabilisation en *attitude* mais aussi d'une stabilisation en *altitude* pour mieux se concentrer sur les problématiques de contrôle de la vitesse d'avance et d'évitement d'obstacles latéraux. Deux types d'aéroglesseur ont été utilisés, soit ceux équipés d'un cousin d'air, leur permettant ainsi de voler à ~ 2 mm au-dessus du sol (Figs. 1.1a-b), soit ceux

équipés de patins ou billes en contact avec le sol pour pouvoir glisser sur une surface parfaitement plane (Figs. 1.1c-d).

Pour développer des algorithmes de guidage dans le plan horizontal, l'Institut de Technologie de Californie (CALTECH) a conçu plusieurs aéroglisteurs depuis le début des années 2000. La toute première version nommée MVWT-I (pour Multi-Vehicle Wireless Testbed, Mark I, Fig. 1.1d) est un aéroglisteur de 6 kg en contact avec le sol au moyen de patins [5, 1, 4], et une seconde version plus légère et plus rapide (MVWT-II, Fig. 1.1a) évoluant sur un coussin d'air [1]. Seule la version MVWT-I fut équipée d'un oeil panoramique de 64 pixels pour développer des algorithmes bio-inspirés basés sur la vision du mouvement [4].

Une équipe de l'Université de Barcelone a également conçu un robot aéroglisteur beaucoup plus léger (280 g, Fig. 1.1c) monté sur billes pour développer des algorithmes bio-inspirés basés sur la vision du mouvement [3]. Néanmoins, les trois aéroglisteurs sur les figures 1.1a,c,d sont actionnés à l'aide de seulement deux propulseurs arrière, faisant de ces robots des plateformes sous-actionnées. C'est pourquoi, l'équipe Biorobotique de l'Institut des Sciences du Mouvement (CNRS/Aix-Marseille Université) a développé un robot aéroglisteur totalement actionné, dénommé LORA [6, 2]. Le robot LORA est équipé de deux propulseurs latéraux supplémentaires pour lui permettre de découpler sa dynamique d'avance de sa dynamique latérale (Fig. 1.1b). Cette plateforme robotique est ainsi holonome dans le plan, et possède aussi une dynamique de lacet découplée des dynamiques de translation, en plus d'une stabilisation naturelle en roulis et en tangage, mais aussi en altitude.

1.1.2 Voilures fixes et dirigeables

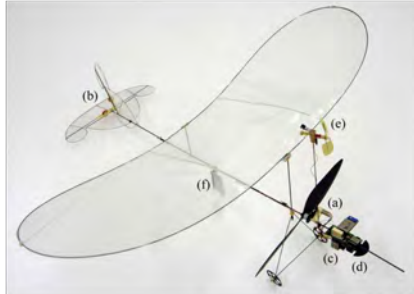
Une particularité des plateformes aériennes est qu'elles sont holonomes en vol libre et peuvent donc subir tout type de perturbations aérodynamiques (vent, effet de sol...). Néanmoins, elles sont majoritairement sous-actionnées, leurs mouvements de translation ne peuvent donc pas être découplés de leurs mouvements de rotation : autrement dit, il faut tourner pour aller de côté. Au cours des 10 dernières années, l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) a développé de nombreuses plateformes volantes équipées de capteurs bio-inspirés pour étudier le potentiel de différentes tâches de navigation incluant l'évitement d'obstacles par la vision du mouvement [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13] : un dirigeable de 180 g permettant de travailler avec une importante autonomie de vol (Fig. 1.2a), un avion miniature de seulement 10 g pour le vol à l'intérieur des bâtiments (Fig. 1.2b), ou bien encore une aile volante de ~ 400 g pour voler à travers les canyons urbains à 15 m/s

(Fig. 1.2c). Le point commun de toutes ces plate-formes aériennes est qu'elles sont sous-actionnées.

(a) Dirigeable (180 g)



(b) Micro avion (10 g)



(c) Aile volante (407 g)



FIGURE 1.2 : Micro-aéronefs sous actionnés développés par l'Ecole Polytechnique de Lausanne (EPFL). (a) Dirigeable d'une masse de 180 g, il peut se déplacer jusqu'à 1 m/s et dispose d'une autonomie de 3 heures [14]. Copyright Springer, 2006. (b) Avion miniature MicroCeline MC2, modèle commercialisé par DIDEL SA, d'une masse de 10 g, il peut se déplacer jusqu'à 1,5 m/s pour une autonomie de 10 minutes [15, 9]. Crédits : EPFL (<http://lis.epfl.ch/microflyers/>) et DIDEL SA (<http://www.didel.com/>). Légende : *a*) moteur plus hélice, *b*) gouvernail et élévateur, *c*) micro caméra ventrale plus gyromètre de tangage, *d*) micro caméra frontale plus gyromètre de lacet, *e*) anémomètre, *f*) batteries lithium polymère. (c) Aile volante dotée du pilote automatique *OptiPilot*. D'une masse de 407 g pour une envergure de 0,8 m, il peut voler jusqu'à 20 m/s avec une autonomie de 30 minutes [10]. Copyright Springer, 2009.

1.1.3 Voilures tournantes

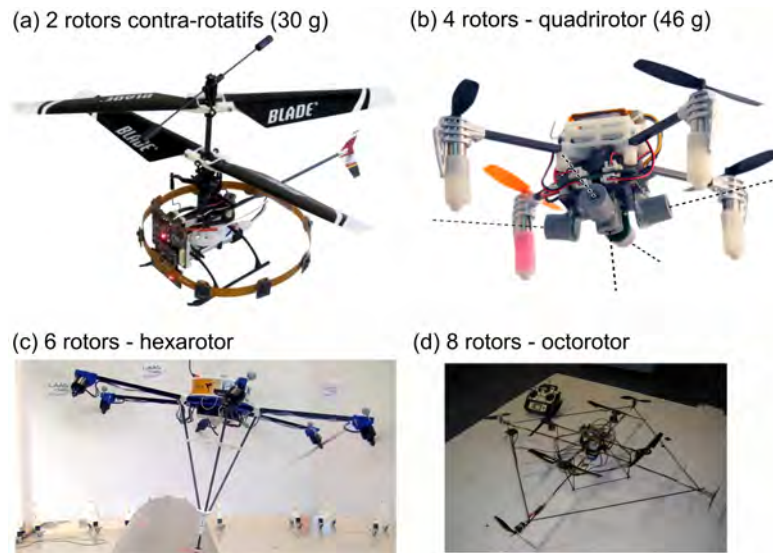


FIGURE 1.3 : (a) Micro hélicoptère à voilure contrarotative de type Blade[®] mCX2 (2013). D'une envergure de 0,19 m pour une masse de 30 g, il est équipé d'un anneau supportant des capteurs de mouvement [11, 16]. Crédits : Harvard Microrobotics Laboratory (<http://micro.seas.harvard.edu/>) et Centeye Inc. (<http://www.centeye.com/>). (b) Micro quadrotor construit à l'Ecole Polytechnique de Lausanne (EPFL) (2013). D'une envergure de 0,12 m pour une masse de 46 g, il est équipé dans sa partie ventrale de 5 capteurs de flux optique [12, 13]. Crédit : EPFL. (c) Hexacoptère TiltHex à rotors inclinés développé par le LAAS-CNRS (2017). Cette configuration permet de rendre l'hexacoptère totalement actionné [17, 18]. Crédits : Antonio Franchi et Markus Ryll, équipe RIS du LAAS-CNRS (<http://homepages.laas.fr/afranchi/robotics/>; contact : antonio.franchi@laas.fr). (d) Octocoptère non coplanaire (2007), développé par le laboratoire Heudiasyc dont le but est de rendre le drone totalement actionné [19]. Crédit : Université Technologique de Compiègne/CNRS, UMR 7253, Heudiasyc (<http://www.hds.utc.fr/>).

Les aéronefs à voilures tournantes (Fig. 1.3a-b) sont généralement des véhicules aériens sous-actionnés : seuls 4 des 6 degrés de liberté sont commandables (l'amplitude de la poussée vectorielle et les trois couples), ainsi les aéronefs opèrent des mouvements de roulis ou de tangage pour se mouvoir en translation. De nombreux projets ont été développés au cours des 10 dernières années sur des micro-hélicoptères à rotors coaxiaux à voilure

contrarotative, comme les projets : MICOR (~ 100 g) [20, 21], CoaX (~ 200 g) [22], muFly (~ 80 g) [23], ainsi que des quadrirotors de différentes tailles : STARMAC II (~ 1100 g) [24], X4-flyer (~ 550 g) [25], (~ 520 g) [26], X4-flyer (~ 850 g) [27], X4-MaG (~ 310 g) [28], et un micro quadrirotor (46 g) [12, 13]. Pour découpler les mouvements de rotation des mouvements de translation, une solution a consisté dans un premier temps à équiper un quadrirotor de 4 rotors supplémentaires placés dans le plan vertical (Fig. 1.3d) [19]. Ce drone peut alors être qualifié d’octocoptère totalement actionné [19]. Cette solution étant peu compacte, les travaux actuels s’orientent vers des versions d’hexacoptères à rotors inclinés (Fig. 1.3c) [17, 18]. Une telle configuration géométrique à 6 rotors inclinés permet sur un plan théorique de découpler tous les degrés de liberté du drone en mixant la poussée de chacun des rotors [29, 30].

Le TiltHex est la nouvelle plate-forme aérienne équipée de 6 rotors développée au LAAS-CNRS, Toulouse [17, 18]. Grâce à l’orientation de ses 6 hélices non coplanaires, cet hexacoptère peut contrôler indépendamment ses 6 degrés de liberté, c’est-à-dire, à la fois en position et en orientation, et cela de manière complètement indépendante. Cette capacité unique fait de la plate-forme TiltHex [17, 18], une plate-forme aérienne idéale pour la manipulation et l’interaction d’objets, un domaine de recherche dans lequel les chercheurs du LAAS-CNRS sont extrêmement actifs dans le cadre du projet européen H2020 AeROArms (<https://aeroarms-project.eu/>).

1.1.4 Micro-robots volants de la taille d’un insecte

L’ornithoptère *Microbat* possédait une envergure de $\sim 0,15$ m pour une masse de 12,5 g [31]. Il est néanmoins le tout premier ornithoptère radioguidé capable de voler librement durant six minutes. D’autres équipes ont tenté de miniaturiser des robots volants (e.g., configuration quadrirotor sur Fig. 1.3b) pour véritablement atteindre la taille d’un insecte volant, comme le projet *Mesicopter* [32] proposé par l’Université de Stanford (Fig. 1.4a). Ce micro quadrirotor de très petite taille (envergure du cadre $\sim 15 \cdot 10^{-3}$ m pour une masse de ~ 1 g) constitue une véritable prouesse de construction micro-mécanique (Fig. 1.4a). Enfin d’autres projets visent à reproduire, sous la forme d’un micro robot volant de la taille d’un insecte ailé, l’actionnement et le cycle de battements des ailes. Le premier projet d’importance fut le projet *Micromechanical Flying Insect* (MFI) (Fig. 1.4b) entre 1998 et 2003 à l’Université de Californie, Berkeley [33]. Le micro robot volant MFI avait alors une envergure de $25 \cdot 10^{-3}$ m pour une masse de 100 mg, malheureusement il ne pouvait pas encore décoller en dépit d’une paire d’actionneurs piézo-électriques (11 mg) développant jusqu’à 476 W/kg pour une fréquence de

battement d'ailes de 275 Hz [34]. Plus récemment, le projet *RoboBee* (d'une envergure de $30 \cdot 10^{-3}$ m pour une masse de 80 mg) développé par l'équipe de Robert Wood entre 2009 et 2013 à l'Université d'Harvard [35, 36, 37], possède une paire d'ailes battant jusqu'à 120 Hz et s'actionnant indépendamment l'une de l'autre au moyen d'actionneurs piezo-électriques consommant 240 W/kg via une alimentation filaire (Fig. 1.4c). Le micro robot volant *RoboBee* est capable de décoller puis d'opérer un vol stationnaire incluant les manoeuvres de base démontrant sa contrôlabilité en vol [37]. Les informations d'orientation et de position du *RoboBee* indispensables à sa stabilisation sont acquises par un système de capture du mouvement basé sur des caméras VICONTM grâce à des marqueurs réfléchissant installés à bord du micro-robot.

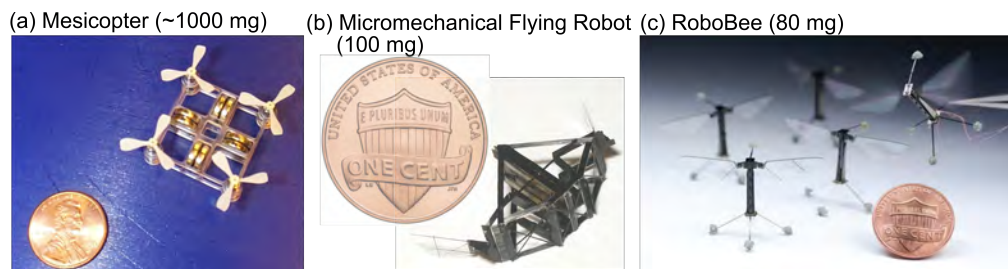


FIGURE 1.4 : Différents projets de micro robots volants. La pièce de monnaie américaine de 1 cent donne l'échelle (son diamètre est de $19 \cdot 10^{-3}$ m). (a) Le projet *Mesicopter* de l'Université de Stanford avec ses hélices, au profil optimisé de $15 \cdot 10^{-3}$ m de diamètre, motorisées par des moteurs brushless, arbore une masse totale ~ 1 g [32]. Crédit : Ilan Kroo (<http://aero.stanford.edu/mesicopter/>). (b) Le *Micromechanical Flying Insect* (MFI) possède une paire d'ailes battant jusqu'à une fréquence de 250 Hz grâce à un actionneur piézoélectrique central (11 mg) [33]. Crédit : Ronald S. Fearing (<http://robotics.eecs.berkeley.edu/>). (c) *RoboBee* doté d'une paire d'ailes morphologiquement bio-inspirées [37]. Chaque aile est mise en mouvement indépendamment par son propre actionneur piezo-électrique et un mécanisme passif sub-millimétrique officiant comme liaison mécanique entre l'aile et l'actionneur. 5 *RoboBees* sont montrés sur cette photo, démontrant ainsi la capacité à construire facilement ce prototype de manière reproductible [37]. Crédit : Kevin Ma et Pakpong Chirarattananon, Harvard Microrobotics Laboratory (<http://micro.seas.harvard.edu/>).

1.2 Capteurs bio-inspirés pour les microdrones

1.2.1 Capteurs inertiels : balanciers et antennes

Les balanciers

Des nombreuses modalités sensorielles (notamment chez l'insecte mais pas seulement) utilisent les poils et les soies méchanorécepteurs pour être sensible à la grandeur utile, notamment le gyromètre inertielle de la mouche, l'accéléromètre angulaire du système vestibulaire des vertébrés, ou bien encore les détecteurs de flot d'air [38, 39].

Les diptères possèdent une unique paire d'ailes antérieures mais sur la partie postérieure de leur thorax (Fig. 1.5), il existe une paire d'organes « vestigiaux », appelés les balanciers sensibles aux vitesses angulaires mécaniques de rotation, dont la fonction sensorielle s'apparente à celle d'un véritable gyromètre appelé également *rate-gyro* [40]. Oscillant à la même fréquence que les ailes mais en opposition de phase, ils sont sensibles à la force d'inertie de Coriolis et leurs plans de battement subissent une déformation lorsque la mouche effectue une rotation selon chacun de ses trois degrés de liberté en rotation.

Tout comme les ocelles, formant un triangle sur la tête de l'insecte (Fig. 1.5c), 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 °/s peut être compensée par une rotation inverse de la tête. De nombreuses études ont essayé de déterminer si les balanciers sont plus sensibles à une accélération ou une vitesse angulaire [40]. Il semble très probable que les balanciers soient sensibles à une vitesse angulaire [41]. 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'ailes arrières, le Strepsiptera a perdu sa paire d'ailes antérieures. Pix *et al.* ont montré que la paire d'organes restant chez le mâle a la même fonction que les balanciers des diptères [42].

Depuis une vingtaine d'années sur le plan technologique, poussée principalement par l'industrie du jeu et de la téléphonie mobile, la technologie Micro ElectroMechanical Systems (MEMS) 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 portables et autres tablettes graphiques jusqu'aux robots mobiles de tous types pour lesquels la mesure de l'attitude est primordiale, voire vi-

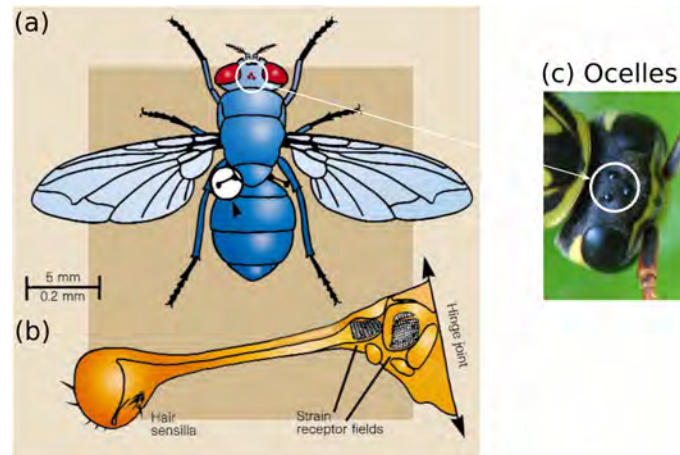


FIGURE 1.5 : (a) Illustration des balanciers de la mouche. Ces derniers oscillent en opposition de phase par rapport aux ailes. Lors de toute rotation du corps de l'animal en tangage, roulis ou lacet, les forces d'inertie de Coriolis produisent une déflexion du plan d'oscillation de chacun des balanciers. (b) 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. D'après [40], reproduit avec autorisation de Macmillan Publishers Ltd. Copyright ©(1998) Nature, une revue de Nature Publishing Group. Tous droits réservés. (c) Vue de dessus d'une tête d'une guêpe *Poliste* de Wikimedia commons (Photo prise par Assafn (2008) sous licence CC-BY-SA 3.0). Les ocelles (groupement de 3 petits yeux) forment un triangle sur la partie dorsale de la tête de l'insecte.

tale (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. Les principes sur lesquels reposent ces capteurs sont très similaires à ceux des balanciers existants chez les diptères.

Les antennes

Les antennes des insectes contiennent des organes complexes, appelés organes de Johnston (Fig. 1.6), dont la fonction et les traitements sensori-moteurs réalisés sont encore mal compris et certainement sous-estimés. Dans leur revue sur les capteurs des insectes et leurs fonctions, Taylor et Krapp décrivent de manière détaillée l'anatomie et la manière dont des antennes pourraient être impliquées dans les boucles sensori-motrices stabilisant le vol de l'animal [43].

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 [44]. Cette hypothèse est potentiellement réfutable car, même si l'organe de Johnston (Fig. 1.6b) présent 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 serait donc plus probable que les antennes des papillons soient sensibles aux accélérations angulaires de grande amplitude.

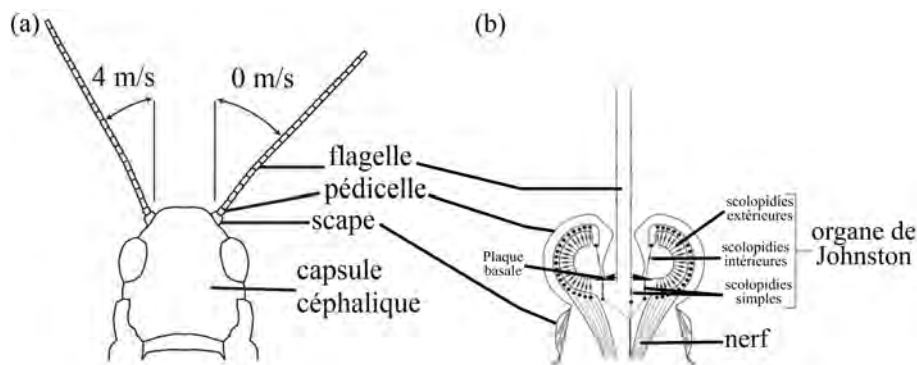


FIGURE 1.6 : (a) Anatomie de l'antenne du criquet *Schistocerca*. Plus l'insecte vole vite (e.g., 4 m/s), plus les antennes s'orientent vers l'avant pour venir minimiser la traînée en comparaison avec la position des antennes au repos (e.g., 0 m/s). Redessiné d'après [45]. (b) Description de l'organe de Johnston qui se trouve à l'intérieur du pédicelle. Redessiné d'après [46].

Dans leurs parties communes, les antennes sont composées d'un scape, d'un pédicelle et d'une flagelle (Fig. 1.6b). Les articulations entre le scape 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 air de l'insecte. En effet lors du vol, les antennes s'orientent automatiquement de manière à minimiser la force de traînée aérodynamique s'appliquant sur leurs flagelles. Il existerait 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 semblerait 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 [43].

Jusqu'à présent, il n'existe pas de capteur artificiel de vitesse air se basant sur le principe biologique décrit dans ce paragraphe. Cependant, des pistes peuvent être creusées notamment au niveau de l'organe de Johnston qui, par sa sensibilité extrême basée sur une micro-vibration des antennes [44], ouvre des perspectives intéressantes pour l'étude de nouveaux types d'anémomètre sensible aux basses vitesses contrairement aux tubes Pitot.

1.2.2 Capteurs optiques : œil composé et ocelles

Œil composé

Chaque insecte possède une paire d'yeux composés, chacun dénombrant de quelques dizaines d'ommatidies (ommatidie = petit œil élémentaire), chez certaines fourmis, jusqu'à 30.000 chez les grosses libellules. Chaque ommatidie découpe l'espace en de petits champs de vision de quelques degrés seulement (Fig. 1.7). Le nombre d'ommatidies définit donc le nombre de pixels de l'image globale, qui couvre quasiment 4π stéradians et même parfois davantage par suite d'un recouvrement binoculaire. Seul la présence du cou crée une zone aveugle chez l'insecte. Chez les diptères, les signaux visuels produits par chaque cellule d'une ommatidie (photorécepteurs) sont traités en parallèle à travers une série de ganglions optiques, puis intégrés à large champ dans le ganglion optique appelé *lobula plate* puis dans le réseau de neurones du complexe moteur ainsi que du système nerveux central. Au total, les diptères possèdent environ un million de neurones.

Chaque ommatidie est coiffée d'une microlentille (ou « facette »), dont le diamètre est $\sim 30 \mu m$, focalise la lumière sur un petit groupe de cellules visuelles (8 ou 9 selon l'insecte), qui sont de véritables neurones photorécepteurs responsables de la phototransduction. Une dépolarisation (tension électrique) est ainsi générée dans chaque cellule dont l'amplitude (de 0 à 60 mV) croît avec le logarithme de l'éclairement. La sensibilité optique S est définie par l'équation suivante [47] :

$$S = 0,62 \cdot D^2 \cdot \Delta\rho^2 \cdot P_{abs} \quad (1.1)$$

avec D le diamètre de la lentille, $\Delta\rho$ l'angle d'acceptance (largueur a mi-hauteur de la courbe de sensibilité angulaire d'une ommatidie [48, 49], Fig. 1.7), et P_{abs} la proportion de photons absorbés. Il est à noter que cette équation (Eq. (1.1)) peut être exprimée aussi sous une forme plus précise [50] :

$$S = \left(\frac{\pi}{4}\right)^2 \cdot D^2 \cdot \left(\frac{d}{f}\right)^2 \cdot \left(\frac{k \cdot l}{2,3 + k \cdot l}\right) \quad (1.2)$$

avec d le diamètre d'un rhabdomère (guide d'onde optique comprenant le ou les photorécepteurs, Fig. 1.7), l la longueur d'un rhabdomère, f la distance focale et k le coefficient d'absorption des pigment visuels.

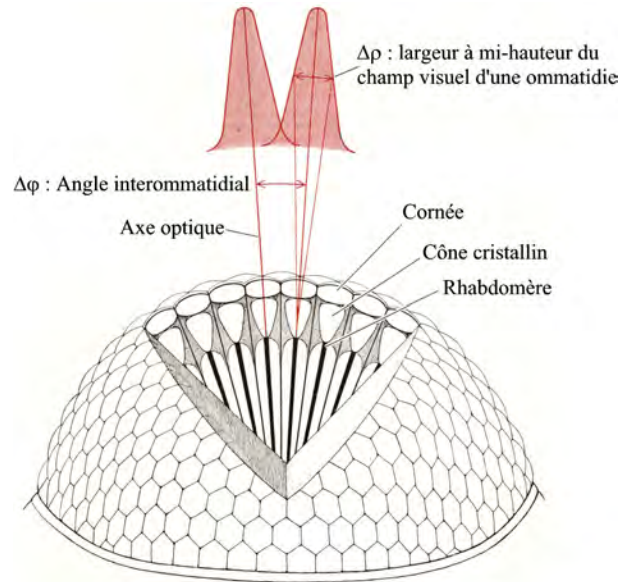


FIGURE 1.7 : Un oeil composé est formé par la juxtaposition de petits yeux élémentaires, les ommatidies. L'agencement des ommatidies est caractérisé par l'angle inter-ommatidial $\Delta\varphi$, qui varie d'une région à l'autre de l'oeil. Il est plus fin dans les régions frontales ($\sim 1^\circ$) que dans les régions latérales ou ventrales ($\sim 2^\circ$ à $\sim 4^\circ$). La directivité d'un photorécepteur est caractérisée par une gaussienne de largeur à mi-hauteur $\Delta\rho$ du même ordre de grandeur que $\Delta\varphi$. D'après [48], reproduit avec autorisation. Copyright ©(1977) Scientific American, un département de Nature America Inc. Tous droits réservés.

D'après l'équation 1.1, 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 ($D \simeq 2000 \mu m$, $\Delta\rho = 1,2 \cdot 10^{-4} rad$, $P_{abs} = 0,31$) est égale à $0,01 \mu m^2 \cdot sr$ 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 $4200 \mu m^2 \cdot sr$. Ce qui signifie que si le crustacé et l'homme regardait la même scène avec des conditions d'éclairage identiques, l'oeil du crustacé capturerait 420.000 fois plus de photons par seconde que l'oeil de l'Homme.

Les équations 1.1 et 1.2 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 large). Car contrairement à l'oeil composé, les angles inter-photorécepteurs $\Delta\varphi$ (échantillonnage spatial angulaire entre deux photorécepteurs) et d'acceptance $\Delta\rho$ sont quasiment les mêmes dans un oeil caméculaire (i.e., oeil à lentille unique comme l'oeil de l'Homme) et ne peuvent pas être ajustés indépendamment l'un de l'autre.

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, de par leurs petits angles inter-photorécepteurs $\Delta\varphi$ du fait qu'ils soient en si grand nombre. Néanmoins, en termes de sensibilité, l'oeil de l'Homme est loin d'avoir la meilleure si on la compare à celles des animaux comme certains crustacés vivant 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 appelé aussi $F - number$, 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 toute la lumière pénétrant dans une ommatidie se focalise à l'entrée du rhabdomère (Fig. 1.7), il faut que le F-number soit supérieur à 2 [51]. 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.

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 des capteurs visuels de demain. En effet, il est 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 mouvements 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 les réponses du groupe VS4-VS7 sont maximisées pour des rotations autour de l'axe de roulis. Les rotations privilégiées par les neurones VS coïncident avec des axes de rotation proches de l'horizon là où le mouvement de translation généré par exemple par des nuages peut être très faible mais où le mouvement de rotation reste invariant. Inversement, les mouvements de translations privilégiés correspondent pour les neurones Hx à des zones visuelles ventrales où le défilement visuel est maximum pour une hauteur donnée [52].

Ocelles

Les ocelles sont des capteurs optiques placés sur la partie dorsale de la tête des insectes formant un triangle (Fig. 1.5c). Extérieurement, ils se distinguent par 3 larges lentilles (de diamètre $100\ \mu\text{m}$ à $500\ \mu\text{m}$, 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 commencé à livrer un de leurs secrets vers 1980 seulement quand on a montré qu'ils permettaient à certains insectes (les libellules) de détecter l'horizon [43]. Ces insectes le font grâce à une rétine ocellaire très sensible au proche ultraviolet, 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 [53]. Il est aussi intéressant de noter que le traitement neuronal associé aux ocelles est plus rapide que celui associé à l'oeil composé car Roland Hengstenberg a montré que le réflexe de compensation de la tête est plus rapide lorsqu'il implique uniquement les ocelles [54]. Cependant, il faut nuancer ce résultat car Roland 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 lié aux ocelles et à comprendre les mécanismes neuronaux sous-jacents. Il semble que chez la libellule [55], 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. Enfin, des travaux récents [56] 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). Des ocelles artificielles ont été conçues et montées à bord d'un quadrirotor pour mesurer la vitesse angulaire de roulis en complément du gyromètre [57]. Mais la plupart du temps, la stabilisation en assiette (tangage et roulis) des drones et des micro-aéronefs se fait au moyen d'une centrale inertielle combinant à la fois inclinomètre 3 axes, gyromètre 3 axes et magnétomètre 3 axes.

1.2.3 Capteurs de flux optique

Définition du flux optique

Au cours de son déplacement, un agent (animal, robot) va induire un mouvement relatif des objets environnants. Chaque objet présentant un contraste optique va défilé sur la rétine (naturelle ou artificielle) de l'agent avec une vitesse angulaire caractéristique. Ce champ de vecteurs des vitesses angulaires ainsi formé s'appelle le flux optique (ou défilement optique) [58, 59, 60, 61, 52].

On introduira deux types de flux optique, celui généré, et celui mesuré :

- Le flux optique généré ω par le déplacement propre de l'agent qui s'évalue dans le repère inertiel,
- Le flux optique mesuré visuellement ω_{meas} par l'agent lui-même muni d'un appareillage optique (un oeil, une caméra ou des photodiodes...) grâce à la présence de contrastes visuels dans l'environnement.

Le flux optique généré $\vec{\omega}$ par le déplacement propre de l'agent peut être décrit comme la somme de deux composantes distinctes définies par [61] (Eq. 1.3) c'est-à-dire le flux optique de translation $\vec{\omega}_T$ (Eq. 1.4) et le flux optique de rotation $\vec{\omega}_R$ (Eq. 1.5).

$$\vec{\omega} = \vec{\omega}_T + \vec{\omega}_R \quad (1.3)$$

Le flux optique de translation $\vec{\omega}_T$ (exprimé en rad/s) se définit comme suit :

$$\vec{\omega}_T = -\frac{\vec{V} - (\vec{V} \cdot \vec{d}(\Psi, \Theta)) \cdot \vec{d}(\Psi, \Theta)}{D(\Psi, \Theta)} \quad (1.4)$$

et le flux optique de rotation $\vec{\omega}_R$ se définit comme suit :

$$\vec{\omega}_R = -\vec{\Omega} \otimes \vec{d}(\Psi, \Theta) \quad (1.5)$$

où \vec{d} est un vecteur unitaire orienté vers la direction du regard pointant vers l'objet (Fig. 1.8), \vec{V} est le vecteur vitesse de translation par rapport à l'objet, $\vec{\Omega}$ est le vecteur vitesse de rotation par rapport à l'objet, et $D(\Psi, \Theta)$ est la distance de l'objet perçu suivant la direction du regard.

Par exemple, dans le plan vertical, le flux optique de translation ω_T dépendra de la vitesse linéaire V exprimée dans le repère inertiel, de la distance

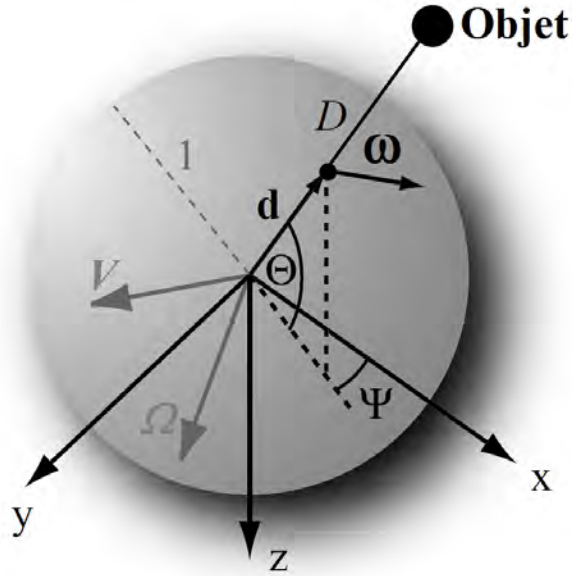


FIGURE 1.8 : La direction portée par le regard est indiquée par le vecteur unitaire \vec{d} , qui est une fonction de l'angle d'azimut Ψ et de l'angle d'élévation Θ . La distance de l'objet suivant la direction $\vec{d}(\Psi, \Theta)$ est notée $D(\Psi, \Theta)$. Le vecteur de flux optique $\vec{\omega}$ est tangentiel à la surface de la sphère, ici représentée par une sphère de rayon unité pour simplifier la représentation graphique. Les vecteurs \vec{V} et $\vec{\Omega}$ représentent respectivement la translation et la rotation du regard par rapport à l'objet.

de visée au sol D_φ et de l'angle d'élévation entre la direction de déplacement et la direction de regard φ , comme suit :

$$\omega_T = \frac{V}{D_\varphi} \cdot \sin(\varphi) \quad (1.6)$$

En revanche, le flux optique de rotation ω_R dépendra uniquement de la vitesse angulaire mécanique subie par l'agent par rapport à l'objet visuel en question.

Capteur de flux optique local

Depuis les travaux de Werner Reichardt et Bernhard Hassenstein (voir article de synthèse [62]) sur la vision du mouvement chez l'insecte, nous savons que cette vision de mouvement est intimement liée à la mesure du flux optique par des neurones détecteurs spécialisés tout d'abord de manière très local puis à large champ. Indépendamment de la manière dont le flux optique est

mesuré, en particulier le flux optique de translation, ce dernier présente des propriétés remarquables car il dépend du rapport entre la vitesse d'avance de l'observateur et la distance aux objets : c'est une *vitesse angulaire*. Par conséquent, le flux optique peut se caractériser mathématiquement comme un champ de vecteurs [61], a donné lieu à maints algorithmes [63] et capteurs pour le mesurer. Les capteurs du flux optique local basés sur un corrélateur (e.g., [64]) et sur un schéma appelé "temps de passage" (ou *time of travel* en anglais) ont donné lieu à de nombreuses applications robotiques [65, 66].

Contrairement à une démarche basée sur des traitements d'images gourmands en ressources calculatoires et au nombre important de pixels impliqués, la mesure locale du flux optique présente deux avantages :

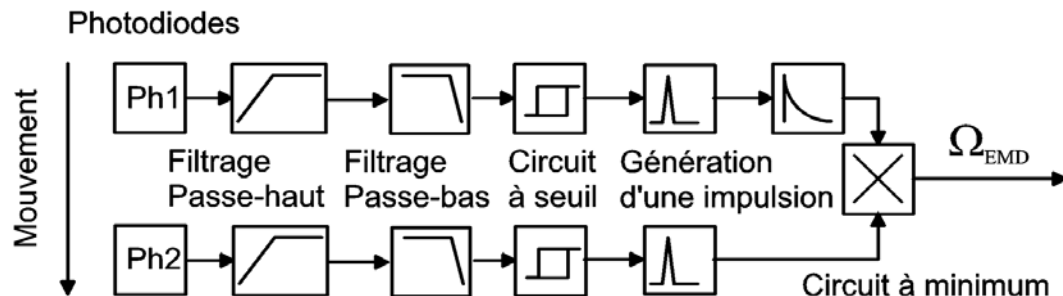


FIGURE 1.9 : Étapes opto-électroniques du traitement du Détecteur Élémentaire de Mouvement (DEM) original complètement analogique [67, 68, 65]. Le DEM calcule le flux optique Ω_{EMD} à partir des signaux des deux photorécepteurs Ph1 et Ph2, qui se trouvent naturellement décalés d'un temps Δt . L'impulsion de longue durée sur la voie 1 est réalisée par le filtrage passe-bas d'une impulsion de courte durée. Le circuit à minimum est réalisé au moyen de diodes.

- il est bien adapté au pilotage visuel de véhicules aériens naviguant très proche des obstacles ($< 1\text{m}$) pour l'évitement d'obstacles, le suivi de terrain, ou bien encore le décollage et l'atterrissage [69],
- il est lié à une vision dite "de bas niveau" nécessitant relativement peu de ressources calculatoires (pas besoin de reconnaître des formes), contrairement aux démarches basées sur le traitement d'images, souffrant d'autant plus de complexité que l'environnement visuel est riche en contraste pour mettre en correspondance les différentes formes [70].

A l'instar du neurone détecteur élémentaire de mouvement H1 répondant à la stimulation lumineuse sur seulement 2 photorecepteurs, la première version analogique du capteur de mouvement de type "temps de passage", appelé

Détecteur Elementaire de Mouvement (DEM), délivre un signal de sortie sous la forme d'une impulsion dont l'amplitude est proportionnelle à la vitesse de défilement d'un contraste [68, 71, 72] (Fig. 1.9). De plus, ce capteur 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 [73] 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 lamina [74].

Détaillons maintenant l'ensemble des 9 étapes du traitement local DEM originel utilisant deux photorécepteurs adjacents (2 purement optiques décrites sur la Fig. 1.7 et 7 opto-électroniques décrites sur la Fig. 1.9) :

- Échantillonnage spatial, caractérisé par l'angle inter-récepteur $\Delta\varphi$: Les informations d'intensité lumineuse spatiale en fonction de φ (position angulaire de n'importe quel point de la scène visuelle par rapport à l'axe optique) sont échantillonnées par 2 photorécepteurs séparés spatialement d'un angle $\Delta\varphi$ (Fig. 1.7).
- 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, caractérisée par l'angle d'acceptance $\Delta\rho$ (Fig. 1.7).

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 :

$$\Delta t = \frac{1}{\omega} \cdot \Delta\varphi \quad (1.7)$$

De ce fait, le décalage spatial $\Delta\varphi$ est transformé en un décalage temporel Δt . Ainsi, le signal visuel produit 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.

- 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 luminosité de l'environnement (Ph1 et Ph2 sur la Fig. 1.9),

- Filtrage passe-haut temporel du 1er ordre (fréquence de coupure 16 Hz), à l'aide d'un circuit RC sur chacune des deux voies pour éliminer la composante continue,
- Filtrage passe-bas temporel du 3ème ordre (fréquence de coupure 28,5 Hz), à l'aide de circuits RC sur chacune des voies pour éliminer le bruit (notamment la composante alternative à 100 Hz provenant de l'éclairage ambiant d'intérieur),
- Circuit à seuil pour séparer les transitions de contraste 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 Ph1 et Ph2 et de créer deux sous-voies ON et OFF par voie photoréceptrice (non représenté sur la Fig. 1.9). Ainsi, les étapes suivantes du traitement DEM sont réalisées à la fois pour les voies ON et pour les voies OFF sur chacune des voies photoréceptrices Ph1 et Ph2.
- Génération, sur la voie photoréceptrice Ph1, d'une exponentielle décroissante de longue durée (plusieurs centaines de milli-secondes approchant une fonction mathématique inverse) déterminant ainsi la gamme de retard Δt considérée, et par conséquent la gamme de mesure du DEM,
- Génération, sur la voie photoréceptrice Ph2, d'une impulsion unitaire très courte, qui se trouve « naturellement » retardée d'un temps Δt ,
- Échantillonnage de l'exponentielle de la voie photoréceptrice Ph1 par l'impulsion générée sur la voie photoréceptrice 2 au moyen d'un circuit à diodes. Cela permet ainsi d'approximer l'amplitude du flux optique ω suivant l'équation (1.7).

Pour rendre ce traitement directionnel c'est à dire sensible au sens du mouvement (Ph1 vers Ph2, ou Ph2 vers Ph1) on peut effectuer ce même traitement dans les deux sens et ainsi obtenir une sortie pour chaque sens ; il s'agit ensuite d'utiliser la fonction maximum pour sélectionner et fusionner les 2 sorties [67, 68, 65, 75].

Œil composé artificiel

Un œil 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 œil camérulaire. Il est donc primordial de situer l'œil composé artificiel dans son contexte d'utilisation. Les applications potentielles sont pour l'instant principalement liées soit 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 a 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 potentiellement dangereux ne requiert pas non plus une très bonne acuité pourvu que ce soit un capteur de faible masse et de 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, a priori inconnu, en toute sécurité et de se stabiliser au point fixe (vol stationnaire) avec une grande précision. Ce sont précisément ce type de tâches robotiques qui ont été abordées dans le projet européen Curved Artificial Compound Eyes (CurVACE) (www.curvage.org) dont l'équipe Biorobotique de l'Institut des Sciences du Mouvement (CNRS/Aix-Marseille Université) fut un membre très actif [76].

Le but de ce paragraphe n'est pas de dresser une liste exhaustive de tous les yeux composés artificiels qui ont pu être construits jusqu'à présent, qu'ils s'agissent de réalisations technologiquement fonctionnelles (e.g., [77]) ou non (e.g., [78]). Par exemple et récemment, le groupe de John Rogers a réalisé un œil semi-sphérique, de 14 mm 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-lentilles de diamètre 800 μm [79]. La relative grande taille des ommatidies artificielles impose un angle inter-récepteur $\Delta\varphi = 8^\circ$ pour un angle d'acceptance $\Delta\rho = 11^\circ$, conférant à l'œil une résolution très grossière compensée en partie par une stratégie consistant à faire tourner le capteur par pas de $1,1^\circ$ de manière à reconstituer une image meilleure à partir d'un ensemble de sous-images ("dithering", [80]). Cette technique très contraignante limite fortement les applications possibles de ce type de capteur. De plus, les photodétecteurs de cet œil sphérique sont de simples photodiodes dépourvues de toute fonction auto-adaptative permettant de compenser localement de fortes variations d'éclairement.

Le projet Européen CurVACE a donné naissance pour la première fois à un capteur miniature de type œil composé, reprogrammable et capable de détecter et de mesurer des vitesses de défilement de contrastes sur cinq décades de luminance [76]. La figure 1.10a montre le capteur CurVACE dans sa version cylindrique. Ce capteur optique innovant est composé de 630 petits

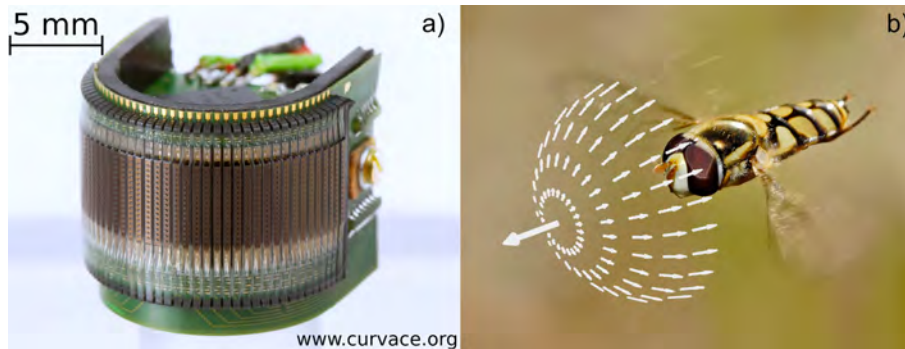


FIGURE 1.10 : (a) Premier œil composé courbe fonctionnel réalisé dans le cadre du projet européen CurvACE (www.curvace.org) [76]. Crédit : Floreano Dario. Ce capteur intègre une matrice de pixels auto-adaptatifs (630 pixels) et leurs micro-optiques de manière à former une juxtaposition de petits yeux élémentaires selon une courbe cylindrique. (b) Illustration d'une mouche syrpe en vol (Wikimedia commons) captant le flux optique. Photo prise par Fir0002/Flagstaffotos sous licence CC-BY.

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 15 mm de diamètre, une consommation de quelques milliwatts pour une masse ~ 2 g. Récemment, le tout premier micro-aéronef de 80 g à voilure tournante équipé d'un "twin" CurvACE, dénommé BeeRotor (Fig. 1.13a), a été capable de suivre un relief accidenté [81]. Une version élémentaire de l'œil CurvACE, appelée triplet car composée de 3 photorécepteurs et d'une micro-lentille, a permis de montrer qu'il était possible de mesurer l'orientation du triplet en mesurant le flux optique selon trois directions principales [82]. Ce type de capteur très minimaliste pesant quelques milligrammes pourrait trouver un vif intérêt pour les micro-aéronefs ou autres micro-insectes artificiels du futur (Fig. 1.4).

Capteur de position angulaire bio-inspiré

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 s'attendre à ce que l'acuité d'un œil composé soit relativement mauvaise comparée à celle d'un œil 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. Depuis les années 70, plusieurs études ont révélé qu'il existait des micro-mouvements rétiniens actifs chez la mouche mais leur fonction exacte et une corrélation de ces micro-mouvements avec le mouvement visuel restait encore à démontrer [83]. Cependant, plusieurs études qui ont reproduit ces micro-mouvements sur des capteurs visuels artificiels ont montré que ces capteurs étaient capables de localiser une cible avec une précision bien meilleure (jusqu'à 700 fois meilleure) que celle imposée par l'optique seule [83]. Une étude robotique récente a même démontré qu'il était possible grâce à cette hyperacuité de mesurer la position d'une cible sur un fond texturé et de mesurer visuellement la distance parcourue par un robot aérien au dessus d'un plan texturé [84].

1.3 Guidage par flux optique des microdrones

1.3.1 Projets de robotique aérienne d'inspiration biologique

Depuis le début des années 90, plusieurs auteurs ont tenté de rendre autonomes des micro-aéronefs en se tournant vers des traitements sensori-moteurs longuement éprouvés par la Nature [85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95].

Plus récemment, quelques auteurs ont mis en œuvre sur un avion ou sur un hélicoptère modèle réduit de plusieurs centaines de grammes, des pilotes automatiques basés sur le flux optique (mesure du flux optique à bord, [92, 10, 96], calcul du flux optique au sol [97, 98, 99]) pour effectuer des tâches de suivi de terrain, d'atterrissage voire d'appontage [99].

D'autres auteurs ont équipé un micro-aéronef à voilure fixe de moins de 100 g [94, 100] de capteurs de flux optique. Malgré leur succès, ces pilotes automatiques ne permettent pas encore d'automatiser toutes les tâches nécessaires au vol libre d'un micro-aéronef, comme le décollage, l'atterrissage précis, le vol dans une forêt d'obstacles, la réaction aux vents ni même le contrôle de la vitesse.

1.3.2 Vers l'utilisation du flux optique pour l'évitement local d'obstacles en robotique mobile

Durant les années 1980, quelques robots mobiles guidés par le flux optique sont apparus notamment grâce à la mise au point d'algorithmes de calcul du flux optique à partir de séquences d'images (e.g., [101, 102]) ou la mise

au point de capteurs de flux optique analogiques dédiés [67, 103]. Contrairement aux sonars, radars, ou lidars habituellement utilisés en robotique mobile, la vision du mouvement (ou flux optique) utilise des capteurs non-émissifs, ce qui les rend particulièrement intéressants pour une utilisation à bord de micro-aéronefs, qui souffrent de contraintes drastiques en termes d'énergie embarquée. La navigation par flux optique n'utilise pas de carte, car elle accomplit des tâches d'évitement d'obstacles sans avoir recours à une représentation interne de l'environnement ([104] pour une revue de travaux portant sur biologie/robotique ; [105] pour une revue de travaux uniquement portant sur la robotique).

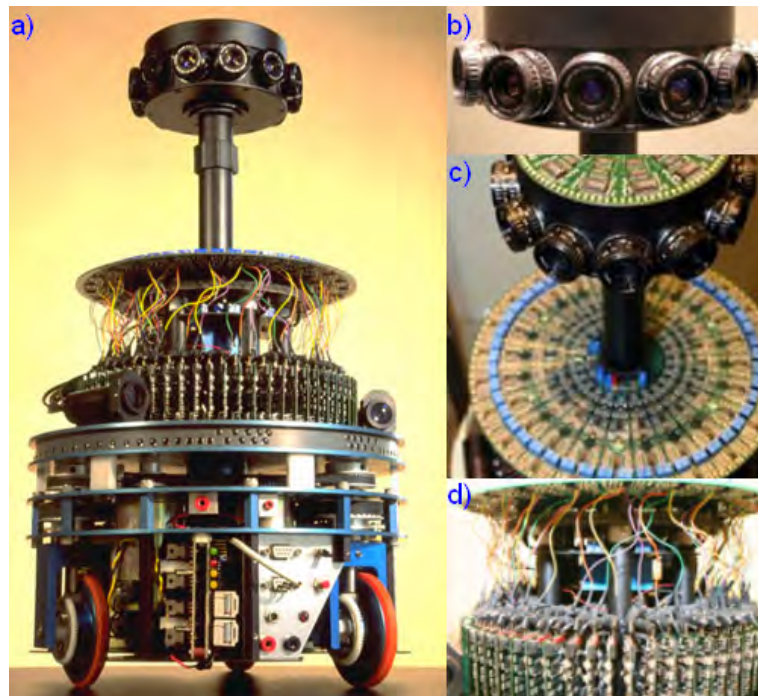


FIGURE 1.11 : (a) Robot-mouche doté d'un œil plan panoramique équipé d'une centaine de capteur visuel de mouvement tel un véritable œil composé artificiel (visible à mi-hauteur) pour "voir et éviter" les obstacles. Ce robot mobile complètement autonome pèse 12 kg, se déplace à 50 cm/s, et a été achevé en 1991 ([68] ; [66]). (b) et (c) Détecteur de cible lumineuse donnant un but à atteindre au robot. (d) Le robot-mouche est équipé d'un œil panoramique parcimonieux de 116 pixels représentant 114 capteurs locaux de flux optique ou DEM [67, 68, 71]. Copyright CNRS Photothèque / Nicolas Franceschini.

Le tout premier robot mobile du genre doté d'une navigation par flux

optique fut le robot-mouche (Fig. 1.11) [68, 65, 66]. Équipé d'un œil panoramique dans le plan horizontal, ce robot se déplaçait à une vitesse constante et relativement élevée (50 cm/s) tout en mesurant de façon panoramique le flux optique de translation engendré par sa locomotion. À la fin d'une translation élémentaire à vitesse constante, le robot s'arrêtait puis se dirigeait dans la direction résultant de la fusion analogique par réseau de résistance entre (i) la direction de la distance aux obstacles était la plus grande (i.e., méthode du minimum local de flux optique qui s'apparente à la méthode des potentiels) et (ii) la direction de la consigne de but (se diriger vers une source lumineuse) (Fig. 1.12). Les distances étaient directement évaluées sur la base du flux optique durant les phases de translation à vitesse constante : ainsi, l'amplitude du flux optique mesuré dans une direction donnée correspond à la présence d'un objet à une distance inversement proportionnelle à l'intérieur du cercle de vision suivant cette même direction.

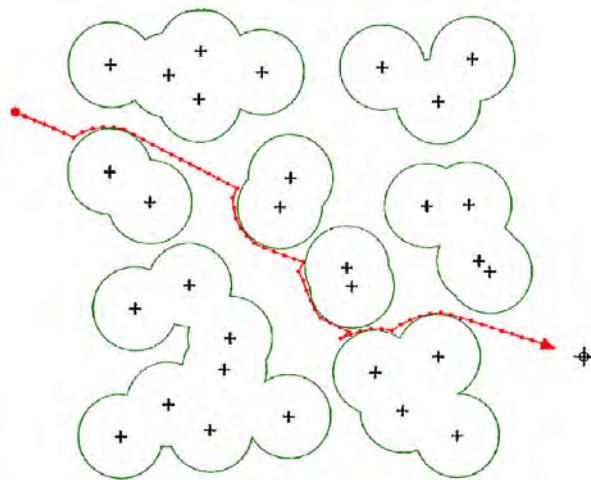


FIGURE 1.12 : Simulation du robot-mouche (Fig. 1.11) équipé de son œil panoramique bio-inspiré et d'un détecteur de cible lumineuse pour atteindre un but en adoptant un comportement de phototaxis positif (i.e., d'attraction vers une source lumineuse). Le robot-mouche est alors capable de traverser une forêt d'obstacles pour atteindre son but. Crédit : Nicolas Franceschini / Jean-Marc Pichon / Christian Blanes.

Le robot-mouche pouvait ainsi "connaître" dans quelle direction se situait l'objet le plus proche et choisir selon cette connaissance une direction d'avance appropriée pour rejoindre le but. Une telle stratégie de guidage visuel nécessite une avance à vitesse linéaire par rapport à l'environnement, à la fois connue et constante : un tel contrôle de la vitesse linéaire d'avance

est plus aisé à réaliser avec un robot mobile ayant un contact sans glissement avec le sol qu’avec un robot volant dont la vitesse peut toujours être perturbée par la présence d’un vent. C’est pourquoi la stratégie employée à bord du robot-mouche est peu adaptée aux robots volants car on ne peut pas garantir la régularité de la vitesse en vol libre du fait des perturbations aérodynamiques.

1.3.3 Suivi de couloir : stratégie d’équilibrage des flux optiques latéraux

Au début des années 1990, il a été montré que les abeilles utilisaient le flux optique latéral pour naviguer au sein d’un couloir étroit [106, 107]. En effet, lorsque les abeilles traversent un couloir étroit, elles ont tendance à suivre la ligne médiane du couloir. Ce comportement est qualifié de *réaction de centrage* de l’abeille et ne dépend pas des textures appliquées sur les parois du couloir. Lors de la mise en mouvement de l’une des parois, la trajectoire moyenne des abeilles se décalait latéralement s’éloignant de la paroi générant le flux optique le plus important. Les auteurs ont alors émis l’hypothèse d’équilibrage des flux optiques latéraux [106, 107]. Depuis ces premières observations sur les abeilles, plusieurs stratégies utilisant le flux optique ont été mises en évidence à la fois pour l’évitement d’obstacle mais aussi pour le contrôle de la vitesse [108].

La stratégie d’équilibrage des flux optiques latéraux fut rapidement appliquée en robotique mobile. Dès 1992, Coombs et Roberts l’ont mise en œuvre sur un robot mobile autonome, dénommé *bee-bot* [109]. Une paire de caméras fut montée à $\pm 30^\circ$ de part et d’autre de l’axe longitudinal du robot. Chaque caméra permettait de mesurer le flux optique latéral (droit ou gauche) ; la variation de cap du robot était ensuite contrôlée par la différence des flux optiques latéraux. Indépendamment de la vitesse du robot ($V_{bee-bot} = 0,1$ m/s) et de la largeur locale D du corridor, la variation de cap du robot devenait alors proportionnelle à la variation de distance $\Delta D = D_L - D_R$ du robot par rapport à la ligne médiane du corridor.

Au total, la stratégie d’équilibrage des flux optiques latéraux fut mise en œuvre à bord de nombreux robots mobiles terrestres ([109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120]), ou aériens (dirigeable : [88] ; aéroglisseur simulé : [121] ; hélicoptère simulé : [95] ; hélicoptère réel ; [118] ; drone à voilure fixe : [122]) circulant dans des corridors ou des canyons (naturels ou urbains). Des travaux visant à optimiser cette loi de contrôle ont récemment démontré que les réactions du robot étaient optimales pour une paire de caméras orientées à $\pm 45^\circ$ de part et d’autre de l’axe longitudinal du robot

[123]. La stratégie d'équilibrage des flux optiques latéraux permet à un robot de naviguer le long de la ligne médiane d'un corridor, qui est en soi une position d'équilibre instable car résultant de l'évitement simultané des murs droit et gauche. En présence d'une ouverture latérale, le robot s'engouffrera alors tout naturellement dans l'ouverture. De simples correcteurs proportionnels furent utilisés pour piloter le cap du robot [109, 110, 113, 95], ou bien encore des correcteurs proportionnel-dérivé (PD) pour stabiliser le robot en présence d'obstacles latéraux [112]. Par contre, l'introduction d'une action intégrale déstabilise la boucle d'équilibrage des flux optiques latéraux [112].

1.3.4 Suivi de paroi : stratégie de maintien d'un flux optique unilatéral

Santos-Victor et ses collaborateurs [111, 112] reprirent l'idée des deux caméras placées de façon divergente vers l'avant (cf. [109]) en dotant leur robot mobile, dénommé *Robee*, de nouveaux comportements. Pour gérer la présence d'ouverture latérale, *Robee* détectait l'annulation de l'un des deux flux optiques latéraux et changeait de stratégie. La stratégie de suivi de paroi avait pour but de maintenir le flux optique unilatéralement tout en faisant avancer le robot à vitesse constante. Le robot opérait alors un suivi de paroi à une distance "pré-définie" (définie comme le quotient vitesse/flux optique). La stratégie de maintien d'un flux optique unilatéral (soit droit, soit gauche) couplée à une vitesse d'avance constante fut testée sur de nombreux robots mobiles dans des arènes ou des corridors présentant soudainement une ouverture latérale [112, 113, 114, 100]. Pour stabiliser cette tâche de suivi de paroi, seuls des correcteurs proportionnel-dérivé (PD) ont été utilisés [112, 113, 100] du fait que la dynamique latérale pilotée par le couple de lacet présentait deux intégrations dans la chaîne directe. Le maintien du flux optique unilatéral fut appliqué sur des robots mobiles dont les vitesses d'avance "pré-réglées" étaient relativement faibles (8 cm/s chez [112]; 12 cm/s chez [113]; 10 cm/s chez [8]). De plus, malgré ces faibles vitesses d'avance, le choix d'un pilotage de cap pour effectuer un suivi de paroi générerait des trajectoires plus ou moins oscillantes.

1.3.5 Le pilotage de la vitesse d'avance par le maintien du flux optique bilatéral

Le robot *Robee* pilotait sa vitesse d'avance en maintenant le flux optique bilatéral (droit + gauche) égal à une consigne donnée par une table de correspondance en forme de sigmoïde [112]. Une telle table de correspondance

permet de limiter naturellement la vitesse du robot : le robot se déplaçait donc à une vitesse relativement faible (8 cm/s). Le contrôle de la vitesse d'avance, basé sur le maintien du flux optique bilatéral, fut testé sur de nombreux robots mobiles [112, 113, 124, 115, 117] dans des corridors rectilignes ou fuselés.

1.3.6 Stratégies d'évitement d'obstacles frontaux basées sur l'expansion de l'image

Dès 1994, Duchon et Warren critiquèrent la stratégie d'équilibre des flux optiques latéraux pour son incapacité à éviter les obstacles frontaux [110]. Pour surmonter cet inconvénient, ils placèrent sur leur robot mobile une caméra frontale, puis divisèrent son champ de vue (60°) en deux parties latérales pour calculer les flux optiques droit et gauche. Le champ visuel frontal permettait également de mesurer l'expansion de l'image pour calculer la divergence du flux optique (Eq. 1.8) [125, 126], cette dernière étant étroitement liée à l'estimation du temps avant impact, appelé aussi Time-To-Contact (TTC) :

$$\nabla\vec{\omega} = \frac{1}{TTC} \quad (1.8)$$

Lorsque ce dernier était trop faible, le robot s'arrêtait et tournait de 90° par rapport à la direction du TTC le plus élevé des deux parties latérales. La progression du robot était relativement lente (4 cm/s) à cause de la relative lenteur du calcul du flux optique obtenu par une méthode différentielle. L'utilisation des théorèmes de Stokes ou de Green pour le calcul de la divergence du flux optique a permis de développer des capteurs dédiés à la mesure du temps avant impact [127].

Des stratégies d'évitement d'obstacles frontaux basées sur le calcul de la divergence du flux optique (Eq. 1.8) furent testées sur de nombreux robots mobiles [110, 115, 119], un hélicoptère simulé [95], le robot aéroglisseur LORA simulé [128], des avions miniatures [94, 100], et un dirigeable miniature [3].

1.3.7 Stratégie de convergence visuo-motrice bio-inspirée

La stratégie de convergence visuo-motrice bio-inspirée [121, 129, 130] tente de reconstruire un observateur d'état du robot à partir d'un développement en série de Fourier du flux optique perçu de façon panoramique. Il se trouve que certains des coefficients de cette série de Fourier dépendent, par exemple, de la position latérale, de l'orientation ou de la vitesse du robot. Cette théorie fut récemment appliquée à un robot mobile équipé d'un capteur circulaire (40 flux optiques mesurés suivant différentes directions d'azimut) pouvant se

déplacer jusqu'à 21 cm/s tout en ajustant sa vitesse d'avance en fonction de la largeur locale d'un couloir variant entre 0,8 m et 2 m [120]. Ce robot mobile est alors aussi capable de se centrer dans un corridor d'une largeur ~ 1 m présentant un coude à 45° à mi-chemin [120]. La stratégie de convergence bio-inspirée fut aussi appliquée à un quadrirotor équipé d'un capteur circulaire permettant d'acquérir 20 points de mesure de flux optique suivant différents azimuts [131]. Le quadrirotor fut alors capable de franchir un couloir d'un mètre de large tout en régulant sa hauteur au sol au moyen d'un sonar [131].

Récemment, une preuve de stabilité théorique de la stratégie de convergence bio-inspirée a été démontrée [132, 133], en dépit de couloirs présentant des structures additionnelles telles que des poteaux, des cylindres ou bien encore des ouvertures latérales. Contrairement à la stratégie d'équilibre des flux optiques latéraux (voir §. 1.3.3), la stratégie de convergence bio-inspirée n'échoue pas lorsque l'un des deux murs est absent ou que des ouvertures sont présentes dans un couloir [132, 133].

1.3.8 Suivi de sol : stratégie de maintien de flux optique ventral

Des études comportementales chez l'abeille ont montré que cet insecte maintenait constant son flux optique ventral lors de l'atterrissage [134]. En modélisant les trajectoires d'atterrissage, les auteurs en sont venus à énoncer une "stratégie d'atterrissage" imposant deux règles devant être respectées pour réaliser un atterrissage automatique [135] : (i) maintenir un angle de descente constant, (ii) ajuster sa vitesse par rapport à l'air de façon à maintenir constante la vitesse de défilement de l'image sur la partie ventrale de l'œil. Sans préciser comment l'abeille pouvait bien faire pour respecter ces deux règles, ces auteurs les ont ensuite rejouées en boucle ouverte sur un bras robotisé sans malheureusement y associer ni les dynamiques ni les capteurs présents sur une abeille. Plusieurs auteurs ont essayé de maintenir le flux optique ventral en agissant sur la gouverne de profondeur d'un aéronef à voilure fixe, malheureusement avec un succès limité [89, 92, 94]. En effet, le couplage complexe des dynamiques d'un aéronef à voilure fixe, mais aussi son sous-actionnement, ne permettent pas de commander séparément la force de sustentation et la force propulsive.

Néanmoins, le pilote automatique *OptiPilot* [10, 96] a pu être mis en place avec succès sur un mini-avion à ailes fixes : il combine en grande partie (i) le maintien du flux optique fronto-ventral à un niveau constant pour contrôler l'altitude (ii) avec la détection d'une expansion de l'image frontale pour agir en roulis et donc en lacet pour éviter l'obstacle (Fig. 1.2c).

Le pilote automatique Optic flow based Control sysTem for Aerial VEhicles (OCTAVE) [93, 136] résout également en partie ces problèmes de sous-actionnement en s'appuyant sur un système beaucoup moins sous-actionné à savoir un micro-hélicoptère captif, également dénommé OCTAVE. Ce dernier est doté d'une boucle de régulation du flux optique ventral pilotant directement la force de sustentation, et donne ainsi naissance à de nombreux comportements recherchés dont l'atterrissage automatique [136, 137].

1.3.9 Expansion de l'image ventrale pour atterrir verticalement

La divergence du flux optique ventral peut être utilisée par les aéronefs à décollage vertical dit Vertical Take-Off and Landing aircraft (VTOL). Ce type d'aéronef est capable de décoller, de réaliser du vol stationnaire et d'atterrir verticalement. Si le robot est pourvu d'un capteur visuel dirigé vers le sol, l'expansion de l'image ventrale peut être calculée par la divergence du flux optique $\nabla\vec{\omega}$ (voir Eq. (1.8), exprimé en s^{-1}), qui est égale à :

$$\nabla\vec{\omega} = \omega_z = -\frac{V_z}{z} \quad (1.9)$$

avec z la hauteur de vol au dessus du sol, et V_z la vitesse de montée (l'axe orienté vers le haut). La divergence du flux optique (Eq. (1.8)) peut aussi être exprimée en termes de temps avant contact TTC (exprimé en secondes) [125] :

$$TTC = \frac{1}{\omega_z} = -\frac{z}{V_z} \quad (1.10)$$

L'expansion de l'image ventrale par la divergence du flux optique, ou le temps avant contact TTC, permet à un VTOL équipé d'une caméra pointant vers le sol et d'une centrale inertielle de décoller, de réaliser du vol stationnaire, ou d'atterrir verticalement sans mesure de hauteur de vol ni de vitesse verticale. Des méthodes contrôlant la réduction du temps avant contact ou bien, par maintien constant de la divergence du flux optique ont été utilisées récemment lors de tâches d'atterrissage de VTOL [27, 138, 139, 140, 141]. Une stratégie similaire semble employée dans une situation connexe lors de l'atterrissage de l'abeille sur une surface verticale ou inclinée [142]. Un atterrissage vertical automatique peut être également obtenu en utilisant la divergence du flux optique ventral perçu au-dessus d'une plate-forme en mouvement [27, 143]. Ce type de manoeuvre est appelé "appontage", et peut être utile pour faire atterrir un VTOL sur le pont d'un navire.

1.3.10 Le double régulation du flux optique

Le concept de "double régulation du flux optique" est lié à son incarnation sous la forme d'un mini robot aéroglisseur totalement actionné portant le nom de LORA (Fig. 1.1b) pour *Lateral Optic flow Regulation Autopilot* [144, 145, 6, 2]. Le pilote automatique LORA se compose de deux régulateurs de flux optique interdépendants, chacun contrôlant un degré de liberté en translation (X ou Y), chacun ayant sa propre consigne de flux optique (bilatéral ω_{setFwd} ou unilatéral $\omega_{setSide}$). Le flux optique bilatéral (droit + gauche) étant proportionnel à la vitesse d'avance V_f , le régulateur de flux optique bilatéral ajuste automatiquement la vitesse d'avance en fonction de la largeur locale du couloir D . Le flux optique unilatéral (droit ou gauche) étant à l'inverse de la distance à un mur y , le régulateur unilatéral ajuste automatiquement la distance au mur y le plus proche proportionnellement à la vitesse d'avance V_f (Eq. (1.11)), donc également à la largeur locale du couloir (Eq. (1.12)). La procédure de dimensionnement des correcteurs est décrite dans [145].

En régime permanent, et pour une largeur donnée de couloir D , le point de fonctionnement atteint par la double régulation de flux optique sera :

$$V_{f\infty} = \frac{\omega_{setSide} \cdot (\omega_{setFwd} - \omega_{setSide})}{\omega_{setFwd}} \cdot D \quad (1.11)$$

$$y_{\infty} = \frac{\omega_{setFwd} - \omega_{setSide}}{\omega_{setFwd}} \cdot D \quad (1.12)$$

Une double régulation du flux optique permet aussi bien d'obtenir un comportement de centrage ou un comportement de suivi de paroi en fonction du choix des consignes de flux optique [145, 2]. Récemment, le principe d'une double régulation du flux optique suivant le plan vertical a été testé sur un micro aéronef de 80 g à voilure tournante, dénommé BeeRotor (Fig. 1.13a) [81]. BeeRotor est équipé d'une troisième boucle de rétroaction permettant de réaligner le regard de son oeil quasi panoramique parallèlement à la surface suivie pour percevoir de manière anticipée toute variation du relief et ainsi basculer son tangage pour franchir des reliefs accidentés (Fig. 1.13b-c). BeeRotor évite donc les obstacles jonchant le sol sans accéléromètre, ni mesure inertielle, ni mesure de vitesse, ni mesure d'altitude pour ajuster sa position et son orientation par rapport au sol [81].

Récemment, dans le cadre d'un projet appelé "The Green Project" supervisé par James Marshall de l'Université de Sheffield, une double régulation de flux optique latéral contrôlant à la fois le positionnement latéral et la vitesse d'avance couplée à un régulateur de flux optique ventral pour le contrôle d'altitude ont été mis en oeuvre à bord d'un petit quadrirotor [146].

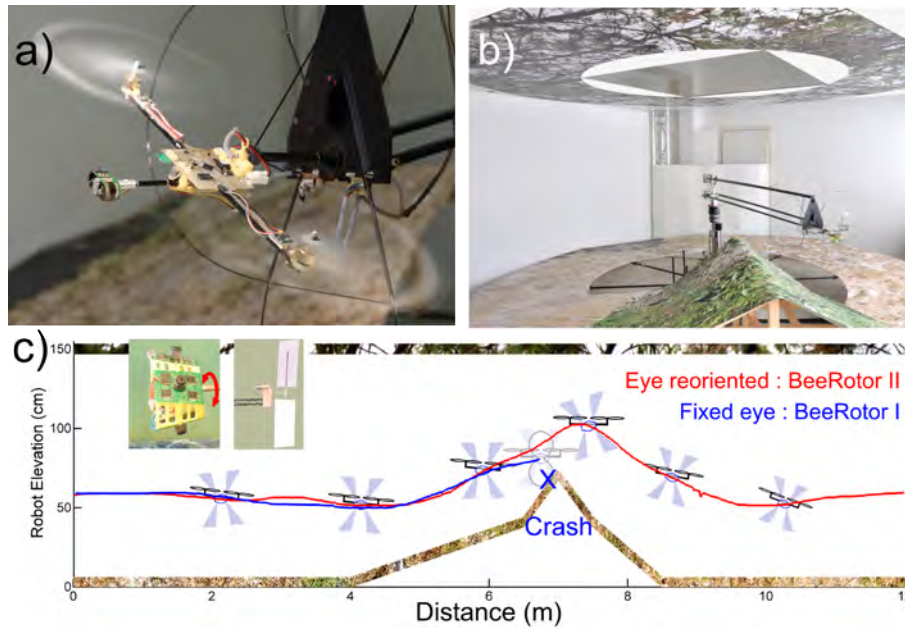


FIGURE 1.13 : (a) Robot BeeRotor I équipé d'une paire de capteurs CurvACE [76] permettant de voir un champ de vue vertical quasi panoramique. (b) Photographie du robot BeeRotor évoluant dans un environnement composé d'un plafond et d'un sol. (c) Trajectoires du robot BeeRotor II qui suit automatiquement le sol, grâce à son régulateur de flux optique ventral et d'un oeil fixe (courbe bleue) ou d'un oeil découplé s'orientant automatiquement et parallèlement au sol. Cette ré-orientation permet au robot de détecter de manière anticipée toute augmentation du flux optique ventral comme étant une élévation du relief. Extrait de [81] sous licence CC-BY.

Conclusion

Dans cet article, 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 stationnaires ou mobiles. La vision joue un rôle prépondérant pour stabiliser et guider l'animal. Il est surprenant 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 volants est principalement dédiée à la détection du mouvement, et cela grâce à des neurones spécialisés appelés

Détecteurs Élémentaires de Mouvement (DEM), où il est important d'avoir un temps de réponse rapide des photorécepteurs et de limiter les erreurs de mesure au moyen d'un filtrage spatial passe-bas. La détection du mouvement est intimement liée à la mesure du flux optique, qui s'apparente à la mesure d'une *vitesse angulaire* des contrastes optiques défilant sur la rétine.

Les robots actuels mesurent leur distance aux obstacles en utilisant des capteurs dits télémétriques (radars, lasers, lidars, sonars, proximètres infrarouges), plus ou moins précis mais surtout encombrants et gourmands en énergie, car émissifs. De nombreuses études sur les processus de vision passifs, menées côté vivant comme côté artificiel, ont permis d'avancer à grand pas dans la compréhension de la mesure du flux optique et de son utilisation pour le pilotage automatique d'agents aériens (mouche, libellule, microdrone, Homme...) ayant besoin de décoller, suivre le relief, "voir et éviter" les obstacles environnants, et enfin atterrir au sol ou sur le pont d'un navire en mouvement. 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.

Ainsi, de nombreux auteurs utilisent aujourd'hui des boucles visuo-motrices basées sur la mesure du flux optique pour piloter des robots terrestres ou aériens. Bien que les interactions entre ces multiples boucles visuo-motrices restent encore méconnues chez les animaux, leur usage réduit considérablement les ressources calculatoires et énergétiques des circuits, et par conséquent, leur taille, leur consommation énergétique, et leur masse. Ces boucles visuo-motrices biomimétiques sont appelées à avoir un succès grandissant pour le pilotage automatique des microdrones de demain.

Glossaire

CurvACE Curved Artificial Compound Eyes. 20, 21, 31

DEM Détecteur Élémentaire de Mouvement. 17–19, 23, 32

LORA Lateral Optic flow Regulation Autopilot. 2, 3, 27, 30

MEMS Micro ElectroMechanical Systems. 8, 9

OCTAVE Optic flow based Control sysTem for Aerial VEhicles. 29

TTC Time-To-Contact. 27, 29

VTOL Vertical Take-Off and Landing aircraft. 29

Bibliographie

- [1] Jin Z, Waydo S, Wildanger EB, Lammers M, Scholze H, Foley P, et al. MVWT-II : The second generation caltech multi-vehicle wireless test-bed. In : American Control Conference, 2004. Proceedings of the 2004. vol. 6. IEEE ; 2004. p. 5321–5326.
- [2] Roubieu FL, Serres JR, Colonnier F, Franceschini N, Viollet S, Ruffier F. A biomimetic vision-based hovercraft accounts for bees' complex behaviour in various corridorsThe following video shows the LORA robot visually guiding itself in various tunnels : www.dailymotion.com/embed/video/xuggrs. Bioinspiration & biomimetics. 2014 ;9(3) :036003.
- [3] i Badia SB, Bernardet U, Verschure PF. Non-linear neuronal responses as an emergent property of afferent networks : A case study of the locust lobula giant movement detector. PLoS Comput Biol. 2010 ;6(3) :e1000701.
- [4] Fuller SB, Murray RM. A hovercraft robot that uses insect-inspired visual autocorrelation for motion control in a corridor. In : Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2011 IEEE International Conference on. IEEE ; 2011. p. 1474–1481.
- [5] Aguiar AP, Cremean L, Hespanha JP. Position tracking for a nonlinear underactuated hovercraft : Controller design and experimental results. In : Decision and Control, 2003. Proceedings. 42nd IEEE Conference on. vol. 4. IEEE ; 2003. p. 3858–3863.
- [6] Roubieu FL, Serres J, Franceschini N, Ruffier F, Viollet S. A fully-autonomous hovercraft inspired by bees : wall following and speed control in straight and tapered corridors. In : Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2012 IEEE International Conference on. IEEE ; 2012. p. 1311–1318.

- [7] Zufferey JC, Floreano D. Toward 30-gram autonomous indoor aircraft : Vision-based obstacle avoidance and altitude control. In : Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE ; 2005. p. 2594–2599.
- [8] Zufferey JC, Floreano D. Toward 30-gram Autonomous Indoor Aircraft : Vision-based Obstacle Avoidance and Altitude Control. In : IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'2005) ; 2005. Sponsor : Swiss National Science Foundation.
- [9] Zufferey JC, Klaptocz A, Beyeler A, Nicoud JD, Floreano D. A 10-gram vision-based flying robot. *Advanced Robotics*. 2007 ;21(14) :1671–1684.
- [10] Beyeler A, Zufferey JC, Floreano D. Vision-based control of near-obstacle flight. *Autonomous robots*. 2009 ;27(3) :201–219.
- [11] Cherney R. Autonomous Micro-Aerial Vehicle Navigation Using a Custom Optic Flow Sensor Ring. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL), Lausanne, Suisse ; 2013.
- [12] Briod A, Zufferey JC, Floreano D. Optic-flow based control of a 46g quadrotor. In : Workshop on Vision-based Closed-Loop Control and Navigation of Micro Helicopters in GPS-denied Environments, IROS 2013. EPFL-CONF-189879 ; 2013. .
- [13] Briod A. Robust Autonomous Flight in Unstructured Environments. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL), N° 6072, Lausanne, Suisse ; 2014.
- [14] Zufferey JC, Guanella A, Beyeler A, Floreano D. Flying over the reality gap : From simulated to real indoor airships. *Autonomous Robots*. 2006 ;21(3) :243–254.
- [15] Zufferey JC, Klaptocz A, Beyeler A, Nicoud JD, Floreano D. A 10-gram microflyer for vision-based indoor navigation. In : Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE ; 2006. p. 3267–3272.
- [16] Moore RJ, Dantu K, Barrows GL, Nagpal R. Autonomous MAV guidance with a lightweight omnidirectional vision sensor. In : 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE ; 2014. p. 3856–3861.

- [17] Ryll M, GPFCEAGCF M, Franchi A. 6D Physical Interaction with a Fully Actuated Aerial Robot. In : Robotics and Automation (ICRA), 2017 IEEE International Conference on. IEEE ; 2017. .
- [18] Michieletto RM G, Franchi A. Control of Statically Hoverable Multi-Rotor Aerial Vehicles and Application to Rotor-Failure Robustness for Hexarotors. In : Robotics and Automation (ICRA), 2017 IEEE International Conference on. IEEE ; 2017. .
- [19] Hugo R, Sergio S, Anand S, Pedro C, Rogelio L. Modelling and real-time control stabilization of a new VTOL aircraft with eight rotors. In : 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE ; 2007. p. 147–152.
- [20] Bohorquez F, Samuel P, Sirohi J, Pines D, Rudd L, Perel R. Design, analysis and hover performance of a rotary wing micro air vehicle. *Journal of the American Helicopter Society*. 2003 ;48(2) :80–90.
- [21] Pines DJ, Bohorquez F. Challenges facing future micro-air-vehicle development. *Journal of aircraft*. 2006 ;43(2) :290–305.
- [22] Bouabdallah S, Siegwart R, Caprari G. Design and control of an indoor coaxial helicopter. In : 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE ; 2006. p. 2930–2935.
- [23] Bouabdallah S. Design and control of quadrotors with application to autonomous flying. *Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL)*, N° 3727, Lausanne, Suisse ; 2007.
- [24] Hoffmann GM, Huang H, Waslander SL, Tomlin CJ. Quadrotor helicopter flight dynamics and control : Theory and experiment. In : *Proc. of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*. vol. 2 ; 2007. p. 4.
- [25] Guenard N, Hamel T, Mahony R. A practical visual servo control for an unmanned aerial vehicle. *IEEE Transactions on Robotics*. 2008 ;24(2) :331–340.
- [26] Guerrero-Castellanos J, Marchand N, Hably A, Lesecq S, Delamare J. Bounded attitude control of rigid bodies : Real-time experimentation to a quadrotor mini-helicopter. *Control Engineering Practice*. 2011 ;19(8) :790–797.

- [27] Herissé B, Hamel T, Mahony R, Russotto FX. Landing a VTOL unmanned aerial vehicle on a moving platform using optical flow. *IEEE Transactions on Robotics*. 2012 ;28(1) :77–89.
- [28] Manecy A, Marchand N, Ruffier F, Viollet S. X4-MaG : a low-cost open-source micro-quadrotor and its Linux-based controller. *International Journal of Micro Air Vehicles*. 2015 ;7(2) :89–109.
- [29] Rajappa S, Ryll M, Bühlhoff HH, Franchi A. Modeling, control and design optimization for a fully-actuated hexarotor aerial vehicle with tilted propellers. In : 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE ; 2015. p. 4006–4013.
- [30] Ryll M, Bicego D, Franchi A. Modeling and control of FAST-Hex : a fully-actuated by synchronized-tilting hexarotor. In : Intelligent Robots and Systems (IROS), 2016 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE ; 2016. p. 1689–1694.
- [31] Sisirak T, Tai T, Ho CM. Microbat : A palm-sized electrically powered ornithopter. In : NASA/JPL Workshop on Biomimetic Robotics. Pasadena, California ; 2000. p. 14–27.
- [32] Kroo I, Kunz P. Mesoscale flight and miniature rotorcraft development,” in Fixed and Flapping Wing Aerodynamics for Micro Air Vehicle Applications. In : of Progress in Astronautics and Aeronautics. Citeseer ; 2001. .
- [33] Yan J, Wood RJ, Avadhanula S, Sitti M, Fearing RS. Towards flapping wing control for a micromechanical flying insect. In : Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on. vol. 4. IEEE ; 2001. p. 3901–3908.
- [34] Steltz E, Fearing RS. Dynamometer power output measurements of piezoelectric actuators. In : 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE ; 2007. p. 3980–3986.
- [35] Wood RJ. The first takeoff of a biologically inspired at-scale robotic insect. *IEEE transactions on robotics*. 2008 ;24(2) :341–347.
- [36] Duhamel PEJ, Pérez-Arancibia NO, Barrows GL, Wood RJ. Altitude feedback control of a flapping-wing microrobot using an on-board biologically inspired optical flow sensor. In : Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on. IEEE ; 2012. p. 4228–4235.

- [37] Ma KY, Chirarattananon P, Fuller SB, Wood RJ. Controlled flight of a biologically inspired, insect-scale robot. *Science*. 2013 ;340(6132) :603–607.
- [38] Droogendijk H. Bio-inspired MEMS flow and inertial sensors. Enschede; 2014. Available from : <http://doc.utwente.nl/89647/>.
- [39] Barth FG, Humphrey JA, Srinivasan MV. *Frontiers in sensing : from biology to engineering*. Springer Science & Business Media; 2012.
- [40] Hengstenberg R. Biological sensors : Controlling the fly's gyroscopes. *Nature*. 1998 ;392(6678) :757–758.
- [41] Northrop RB. *Introduction to dynamic modeling of neuro-sensory systems*. CRC Press; 2000.
- [42] Pix W, Zanker JM, Zeil J. The optomotor response and spatial resolution of the visual system in male *Xenos vesparum* (Strepsiptera). *Journal of Experimental Biology*. 2000 ;203(22) :3397–3409.
- [43] Taylor GK, Krapp HG. Sensory systems and flight stability : what do insects measure and why ? *Advances in insect physiology*. 2007 ;34 :231–316.
- [44] Sane SP, Dieudonné A, Willis MA, Daniel TL. Antennal mechanosensors mediate flight control in moths. *science*. 2007 ;315(5813) :863–866.
- [45] Gewecke M, Heinzel HG. Aerodynamic and mechanical properties of the antennae as air-current sense organs in *Locusta migratoria*. *Journal of Comparative Physiology A : Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*. 1980 ;139(4) :357–366.
- [46] Simpson SJ, Chapman RF. *The insects : structure and function*. Cambridge University Press; 2013.
- [47] Land MF. "Optics and Vision in Invertebrates,". In : Autrum H, editor. *Vision in Invertebrates, B : Invertebrate Visual Centers and Behavior I*, vol. VII/6B, *Handbook of Sensory Physiology*. Berlin : Springer-Verlag; 1981. .
- [48] Horridge GA. The compound eye of insects. *Scientific American*. 1977 ;237 :108–120.
- [49] Land MF. Visual acuity in insects. *Annual Review of Entomology*. 1997 ;42 :147–17.

- [50] Frederiksen R, Warrant EJ. The optical sensitivity of compound eyes : theory and experiment compared. *Biology letters*. 2008 ;4(6) :745–747.
- [51] Stavenga D. Angular and spectral sensitivity of fly photoreceptors. I. Integrated facet lens and rhabdomere optics. *Journal of Comparative Physiology A*. 2003 ;189(1) :1–17.
- [52] Krapp HG, Hengstenberg R, et al. Estimation of self-motion by optic flow processing in single visual interneurons. *Nature*. 1996 ;384(6608) :463–466.
- [53] Hengstenberg R. Multisensory control in insect oculomotor systems. *Rev Oculomot Res*. 1993 ;5 :285–298.
- [54] Schuppe H, Hengstenberg R. Optical properties of the ocelli of *Calliphora erythrocephala* and their role in the dorsal light response. *Journal of Comparative Physiology A*. 1993 ;173(2) :143–149.
- [55] Berry R, Van Kleef J, Stange G. The mapping of visual space by dragonfly lateral ocelli. *Journal of Comparative Physiology A*. 2007 ;193(5) :495–513.
- [56] Chahl J, Mizutani A. Biomimetic attitude and orientation sensors. *IEEE Sensors Journal*. 2012 ;12(2) :289–297.
- [57] Gremillion G, Humbert JS, Krapp HG. Bio-inspired modeling and implementation of the ocelli visual system of flying insects. *Biological cybernetics*. 2014 ;108(6) :735–746.
- [58] Gibson JJ. *The perception of the visual world*. Boston : Houghton Mifflin ; 1950.
- [59] Whiteside TC, Samuel G. Blur zone. *Nature*. 1970 ;225 :94–95.
- [60] Nakayama K, Loomis J. Optical velocity patterns, velocity-sensitive neurons, and space perception : a hypothesis. *Perception*. 1974 ;3(1) :63–80.
- [61] Koenderink JJ, Doorn AJ. Facts on optic flow. *Biological Cybernetics*. 1987 ;56 :247–254.
- [62] Borst A. Models of motion detection. *Nature neuroscience*. 2000 ;3 :1168–1168.

- [63] Barron JL, Fleet DJ, Beauchemin SS. Performance of optical flow techniques. *International journal of computer vision*. 1994;12(1) :43–77.
- [64] Harrison RR, Koch C. A robust analog VLSI motion sensor based on the visual system of the fly. *Autonomous robots*. 1999;7(3) :211–224.
- [65] Pichon JM. *Guidage visuel d’un robot mobile autonome d’inspiration biologique 1ère Partie*. Institut National Polytechnique de Grenoble (INP Grenoble); 1991.
- [66] Franceschini N, Pichon JM, C B. From insect vision to robot vision. *Philosophical Transaction : Biological Sciences*. 1992;337 :283–294.
- [67] Blanes C. *Appareil visuel elementaire pour la navigation a vue d’un robot mobile autonome*. Marseille : Master thesis in Neurosciences (DEA in French), Neurosciences, Univ. Aix-Marseille II; 1986.
- [68] Pichon JM, Blanes C, Franceschini N. Visual guidance of a mobile robot equipped with a network of self-motion sensors. In : *Proc. of SPIE Conf. on Mobile Robots IV*, W.J. Wolfe and W.H. Chun, Eds. Bellingham, U.S.A. : SPIE Vol. 1195; 1989. p. 44–53.
- [69] Serres J, Ruffier F. Optic Flow-Based Robotics. In : *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*. John Wiley & Sons, Inc.; 2016. p. 1–14.
- [70] Albus JS, Hong TH. Motion, depth, and image flow. In : *Robotics and Automation, 1990. Proceedings., 1990 IEEE International Conference on*. IEEE; 1990. p. 1161–1170.
- [71] Blanes C. *Guidage visuel d’un robot mobile autonome d’inspiration biologique 2nde Partie*. Thèse de doctorat, Grenoble : Institut National Polytechnique de Grenoble (INP Grenoble); 1991.
- [72] Ruffier F, Viollet S, Amic S, Franceschini N. Bio-inspired optical flow circuits for the visual guidance of Micro-Air Vehicles. In : *Proc. of IEEE Int. Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. Bangkok, Thailand; 2003. p. Vol. III, pp. 846–849.
- [73] Franceschini N, Riehle A, Nestour AL. In : *Directionally Selective Motion Detection by Insect Neurons*. D.G. Stavenga, R.C. Hardie, Eds., Springer, Berlin; 1989. p. 360–390.

- [74] Joesch M, Schnell B, Raghu SV, Reiff DF, Borst A. ON and OFF pathways in *Drosophila* motion vision. *Nature*. 2010;468(7321) :300–304.
- [75] Roubieu FL, Expert F, Sabiron G, Ruffier F. Two-Directional 1-g Visual Motion Sensor Inspired by the Fly’s Eye. *IEEE Sensors Journal*. 2013 March;13(3) :1025–1035.
- [76] Floreano D, Pericet-Camara R, Viollet S, Ruffier F, Brückner A, Leitel R, et al. Miniature curved artificial compound eyes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2013;110(23) :9267–9272.
- [77] Duparré J, Wippermann F, Dannberg P, Bräuer A. Artificial compound eye zoom camera. *Bioinspiration & biomimetics*. 2008;3(4) :046008.
- [78] Jeong KH, Kim J, Lee LP. Biologically inspired artificial compound eyes. *science*. 2006;312(5773) :557–561.
- [79] Song YM, Xie Y, Malyarchuk V, Xiao J, Jung I, Choi KJ, et al. Digital cameras with designs inspired by the arthropod eye. *Nature*. 2013;497(7447) :95–99.
- [80] Seitz P. Optical superresolution using solid-state cameras and digital signal processing. *Optical Engineering*. 1988;27(7) :277535–277535.
- [81] Expert F, Ruffier F. Flying over uneven moving terrain based on optic-flow cues without any need for reference frames or accelerometers. *Bioinspiration & biomimetics*. 2015;10(2) :026003.
- [82] Pericet-Camara R, Dobrzynski MK, Juston R, Viollet S, Leitel R, Mallot HA, et al. An artificial elementary eye with optic flow detection and compositional properties. *Journal of The Royal Society Interface*. 2015;12(109) :20150414.
- [83] Viollet S. Vibrating makes for better seeing : from the fly’s micro-eye movements to hyperacute visual sensors. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*. 2014;2.
- [84] Colonnier F, Manecy A, Juston R, Mallot H, Leitel R, Floreano D, et al. A small-scale hyperacute compound eye featuring active eye tremor : application to visual stabilization, target tracking, and short-range odometry. *Bioinspiration & biomimetics*. 2015;10(2) :026002.

- [85] Mura F, Franceschini N. Visual control of altitude and speed in a flying agent. In : From Animals to Animats III, D. Cliff et al., Eds. Cambridge, U.S.A : MIT Press ; 1994. p. 91–99.
- [86] Netter T, Franceschini N. Neuromorphic Optical Flow Sensing for Nap-of-the-Earth flight. In : Proc. of Conf. on Mobile Robots XIV, D. W. Gage and H. M. Choset, Eds. Bellingham, U.S.A. : SPIE Vol. 3838 ; 1999. p. 208–216.
- [87] Netter T, Franceschini N. A Robotic Aircraft that Follows Terrain Using a Neuromorphic Eye. In : Proc. of IEEE Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS). Lausanne, Switzerland : Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, Vol. 195 ; 2002. p. 129–134.
- [88] Iida F. Goal-directed navigation of an autonomous flying robot using biologically inspired cheap vision. In : Proceedings of the 32nd International Symposium on Robotics (ISR), pp. 1404-1409 ; 2001. .
- [89] Barrows GL, Neely C, Miller KT. Optic flow sensors for MAV navigation. In : Fixed and flapping wing aerodynamics for Micro Air Vehicle applications. Bellingham, U.S.A. : Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, Vol. 195 ; 2001. p. 557–574.
- [90] Neuman TR, Bulthoff H. Insect inspired visual control of translatory flight. In : Proc. of the ECAL 2001, Springer. Berlin ; 2001. p. 627–636.
- [91] Wu WC, Schenato L, Wood RJ, Fearing RS. Biomimetic Sensor Suite for Flight Control of a Micromechanical Flying Insect : Design and Experimental Results. In : Proceeding of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), Taipei, Taiwan ; 2003. p. 1146–1151.
- [92] Chahl JS, Srinivasan MV, Zhang SW. Landing Strategies in Honeybees and Applications to Uninhabited Airborne Vehicles. *Int J of Robotics Research*. 2004 ;23(2) :101–110.
- [93] Ruffier F, Franceschini N. Visually guided Micro-Aerial Vehicle : automatic take off, terrain following, landing and wind reaction. In : Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2004). New Orleans, USA ; 2004. p. 2339–2346.
- [94] Green WE, Oh PY, Barrows G. Flying Insect Inspired Vision for Autonomous Aerial Robot Maneuvers in Near-Earth Environments. In : Proceeding of IEEE International Conference of Robotics and Automation (ICRA 2004). New Orleans, USA ; 2004. p. 2347–2352.

- [95] Muratet L, Doncieux S, Briere Y, Meyer JA. A contribution to vision-based autonomous helicopter flight in urban environments. *Robotics and Autonomous Systems*. 2005;50(4) :195–209.
- [96] Zufferey JC, Beyeler A, Floreano D. Autonomous flight at low altitude using light sensors and little computational power. *International Journal of Micro Air Vehicles*. 2010;2(2) :107–117.
- [97] Garratt MA, Chahl JS. Vision-based terrain following for an unmanned rotorcraft. *Journal of Field Robotics*. 2008;25(4-5) :284–301.
- [98] Herisse B, Hamel T, Mahony R, Russotto FX. A nonlinear terrain-following controller for a VTOL unmanned aerial vehicle using translational optical flow. In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA '09*; 2009. .
- [99] Herisse B, Hamel T, Mahony R, Russotto FX. Landing a VTOL Unmanned Aerial Vehicle on a Moving Platform Using Optical Flow. *IEEE Transactions on Robotics*. 2012 February;28(1) :77.
- [100] Zufferey JC, Floreano D. Fly-inspired visual steering of an ultralight indoor aircraft. *IEEE Transactions on Robotics*. 2006;22(1) :137–146.
- [101] Lucas D, Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. In : *In proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*, (pp. 674-679), Vancouver, BC.; 1981. .
- [102] Horn BKP, Schunck B. Determining Optical Flow. *Artificial Intelligence*. 1981;17 :185–203.
- [103] Franceschini N, Ruffier F, Serres J, Viollet S. Optic flow based visual guidance : from flying insects to miniature aerial vehicles. In : Lam TM, editor. *Aerial vehicles. In-Tech*; 2009. p. 747–770.
- [104] Franz MO, Mallot HA. Biomimetic robot navigation. *Robotics and Autonomous Systems*. 2000;30 :133–153.
- [105] DeSouza GN, Kak AC. Vision for mobile robot navigation : a survey. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*. 2002;24(2) :237–267.
- [106] Kirchner WH, Srinivasan MV. Freely moving honeybees use image motion to estimate distance. *Naturwissenschaften*. 1989;76 :281–282.

- [107] Srinivasan MV, Lehrer M, Kirchner WH, Zhang SW. Range perception through apparent image speed in freely flying honeybees. *Visual Neuroscience*. 1991;6 :519–535.
- [108] Srinivasan MV. Honeybees as a model for the study of visually guided flight, navigation, and biologically inspired robotics. *Physiological reviews*. 2011 ;91(2) :413–460.
- [109] Coombs D, Roberts K. Bee-bot : using peripheral optical flow to avoid obstacles. In : In *SPIE : Vol. 1825. Intelligent robots and computer vision XI*, pp. 714-721 ; 1992. .
- [110] Duchon AP, Warren WH. Robot navigation from a Gibsonian viewpoint. In : In *proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, (pp. 2272-2277), San Antonio, Texas, USA ; 1994. .
- [111] Santos-Victor J, Sandini G, Curotto F, Garibaldi S. Divergent stereo in autonomous navigation : learning from bees. In : In *proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 434-439), NY, USA. ; 1993. .
- [112] Santos-Victor J, Sandini G, Curotto F, Garibaldi S. Divergent stereo in autonomous navigation : from bees to robots. *International Journal of Computers Vision*. 1995 ;14 :159–177.
- [113] Weber K, Venkatesh S, Srinivasan MV. Insect inspired behaviours for the autonomous control of mobile robots. In : Srinivasan MV, Venkatesh S, editors. *From living eyes to seeing machines*. Oxford : Oxford University Press ; 1997. p. 226–248.
- [114] Dev A, Krose B, Groen F. Navigation of a mobile robot on a temporal development of the optic flow. In : In *proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 558-563, Grenoble, France ; 1997. .
- [115] Baratoff G, Toepfer C, Neumann H. Combined space-variant maps for optical flow navigation. *Biological Cybernetics*. 2000 ;83(3) :199–209.
- [116] Carelli R, Soria C, Nasisi O, Freire E. Stable AGV corridor navigation with fused vision-based controls signals. In : In *proceedings the 28th IEEE Conference of Industrial Electronics Society (IECON)*, vol. 3, pp. 2433-2438, Sevilla, Spain. ; 2002. .

- [117] Argyros AA, Tsakiris DP, Groyer C. Biomimetic centering behavior for mobile robots with panoramic sensors. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Special issue on "Mobile robots with panoramic sensors", K Daniilides and N Papakolopoulos (Eds). 2004 ;11 :21–30.
- [118] Hrabar S, Sukatme GS, Corke P, Usher K, Roberts J. Combined optic-flow and stereo-based navigation of urban canyons for a UAV. In : In proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 3309-3316, Edmonton, Alberta, Canada ; 2005. .
- [119] Kahlouche S, Achour K. Optical flow based robot obstacle avoidance. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2007 ;4(1) :13–16.
- [120] Humbert JS, Hyslop H, Chinn M. Experimental validation of wide-field integration methods for autonomous navigation. In : In proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 2144-2149, San Diego, USA ; 2007. .
- [121] Humbert JS, Murray RM, Dickinson MH. Sensorimotor convergence in visual navigation and flight control systems. In : In proceedings of the 16th IFAC World Congress, Prague, Czech Republic ; 2005. .
- [122] Griffiths S, Saunders J, Curtis A, Barber B, McLain T, Beard R. Maximizing miniature aerial vehicles - obstacle and terrain avoidance for MAVs. *IEEE Robotics and Automation Magazine*. 2006 ;13 :34–43.
- [123] Hrabar S, Sukatme GS. Optimum camera angle for optic flow-based centering response. In : In proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 3922-3927, Beijing, China. ; 2006. .
- [124] Srinivasan MV, Chahl JS, Weber K, Venkatesh S, Nagle MG, Zhang SW. Robot navigation inspired by principles of insect vision. *Robotics and Autonomous Systems*. 1999 ;26 :203–216.
- [125] Lee DN. A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision. *Perception*. 1976 ;5(4) :437–459.
- [126] Murray D, Bradshaw K, Mclauchlan P, Reid I, Sharkey P. Driving saccade to pursuit using image motion. *International Journal of Computer Vision*. 1995 ;16 :205–228.

- [127] Ancona N, Poggio T. Optical flow from 1D correlation : application to a simple time-to-crash detector. Memo no. 1375, AI Laboratory, MIT, Cambridge, MA,USA ; 1993.
- [128] Serres JR, Ruffier F. Biomimetic autopilot based on minimalistic motion vision for navigating along corridors comprising u-shaped and s-shaped turns. *Journal of Bionic Engineering*. 2015 ;12(1) :47–60.
- [129] Humbert JS, Frye MA. Extracting Behaviorally Relevant Retinal Image Motion Cues via Wide-Field Integration. In : *Proc. of the American Control Conference*. Minneapolis, MN, USA ; 2006. .
- [130] Humbert JS, Hyslop AM. Bioinspired visuomotor convergence. *IEEE Transactions on Robotics*. 2010 ;26(1) :121–130.
- [131] Conroy J, Gremillion G, Ranganathan B, Humbert J. Implementation of wide-field integration of optic flow for autonomous quadrotor navigation. *Autonomous robots*. 2009 ;27(3) :89198.
- [132] Keshavan J, Gremillion G, Escobar-Alvarez H, Humbert J. A μ analysis-based, controller-synthesis framework for robust bioinspired visual navigation in less-structured environments. *Bioinspiration & biomimetics*. 2014 ;9(2) :025011.
- [133] Keshavan J, Gremillion G, Alvarez-Escobar H, Humbert JS. Autonomous Vision-Based Navigation of a Quadrotor in Corridor-Like Environments. *International Journal of Micro Air Vehicles*. 2015 ;7(2) :111–123.
- [134] Srinivasan MV, Zhang SW, Lehrer M, Collett TS. Honeybee navigation en route to the goal : visual flight control and odometry. *J Exp Biol*. 1996 ;199 :237–244.
- [135] Srinivasan MV, Zhang SW, Chahl J, Barth E, Venkatesh S. How Honeybees make grazing landings on flat surfaces. *Biological Cybernetics*. 2000 ;83(3) :171–183.
- [136] Ruffier F, Franceschini N. Optic flow regulation : the key to aircraft automatic guidance. *Robotics and Autonomous Systems*. 2005 ;50(4) :177–194.
- [137] Franceschini N, Ruffier F, Serres J. A Bio-Inspired Flying Robot Sheds Light on Insect Piloting Abilities. *Current Biology*. 2007 ;17(4) :329–335.

- [138] Izzo D, Croon GD. Landing with time-to-contact and ventral optic flow estimates. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 2012;35(4) :1362–1367.
- [139] Kendoul F. Four-dimensional guidance and control of movement using time-to-contact : Application to automated docking and landing of unmanned rotorcraft systems. *The International Journal of Robotics Research*. 2014;33(2) :237–267.
- [140] Alkowitz MT, Becerra VM, Holderbaum W. Body-centric modeling, identification, and acceleration tracking control of a quadrotor UAV. *International journal of modelling, identification and control*. 2015;24(1) :29–41.
- [141] de Croon GC. Monocular distance estimation with optical flow maneuvers and efference copies : a stability-based strategy. *Bioinspiration & biomimetics*. 2016;11(1) :016004.
- [142] Baird E, Boeddeker N, Ibbotson MR, Srinivasan MV. A universal strategy for visually guided landing. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2013;110(46) :18686–18691.
- [143] Serra P, Cunha R, Hamel T, Cabecinhas D, Silvestre C. Landing on a moving target using image-based visual servo control. In : *Decision and Control (CDC), 2014 IEEE 53rd Annual Conference on*. IEEE ; 2014. p. 2179–2184.
- [144] Serres J, G M, Ruffier F, Franceschini N. A bee in the corridor : centering and wall-following. *Naturwissenschaften*. 2008;95 :1181–1187.
- [145] Serres J, Dray D, Ruffier F, Franceschini N. A vision-based autopilot for a miniature air vehicle : joint speed control and lateral obstacle avoidance. *Autonomous Robots*. 2008;25 :103–122.
- [146] Sabo CM, Cope A, Gurney K, Vasilaki E, Marshall J. Bio-inspired visual navigation for a quadcopter using optic flow. In : *AIAA Infotech@ Aerospace* ; 2016. p. 0404.