



Des Propriétés Physiques du Monde à la Navigation Bioinspirée

Julien Serres

► To cite this version:

Julien Serres. Des Propriétés Physiques du Monde à la Navigation Bioinspirée. Automatique / Robotique. Aix Marseille Université, 2020. tel-03085410v2

HAL Id: tel-03085410

<https://theses.hal.science/tel-03085410v2>

Submitted on 6 Jan 2021

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.

AIX-MARSEILLE UNIVERSITÉ

ECOLE DOCTORALE

Sciences du Mouvement Humain ED463 - SMH

LABORATOIRE

Institut des Sciences du Mouvement Etienne-Jules Marey UMR7287

Habilitation à Diriger des Recherches

Section : CNU 74

Spécialité : Biorobotique

Julien SERRES

Des Propriétés Physiques du Monde à la Navigation Bioinspirée

Thesis: From Physical Properties of the World to the Bioinspired Navigation

Soutenue le 16/11/2020 devant le jury composé de :

Philippe GAUSSIER	Professeur Univ. de Cergy Pontoise, ETIS	Rapporteur
Pierre MORETTO	Professeur Univ. Toulouse, CRCA	Rapporteur
Dominique MARTINEZ	Directeur de Recherche CNRS LORIA, Nancy	Rapporteur
Myriam ZERRAD	Ingénieure de Recherche - HDR Univ. d'Aix-Marseille, Inst. Fresnel	Examinatrice
Bruno WATIER	Professeur Univ. Toulouse, LAAS	Examineur
Marc BENDAHAN	Professeur Univ. d'Aix-Marseille, IM2NP	Examineur
Christophe BOURDIN	Professeur Univ. d'Aix-Marseille, ISM	Tuteur
Nicolas FRANCESCHINI	Directeur de Recherche CNRS Univ. d'Aix-Marseille, ISM	Invité



Cette oeuvre est mise à disposition selon les termes de la [Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International](#).

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

Georges-Louis Leclerc, Comte de Buffon
[1707-1788]

Naturaliste français, Membre de la Royal Society
L'Histoire Naturelle, générale et particulière,
avec la description du Cabinet du Roi
Tome IV (Quadrupèdes I) : Discours sur la nature
des Animaux, Les Animaux domestiques, 1753
p. 369

« Le simple est toujours faux. Ce qui ne l'est pas est inutilisable. »

Paul Valéry [1871-1945]
Poète et philosophe français
Œuvres II (1942), Ed. Gallimard, Coll.
« Bibliothèque de la Pléiade », 1960
p. 864

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

Woody Allen [1935-]
Comédien et réalisateur américain

« En essayant continuellement on finit par réussir. Donc : plus ça rate, plus on a de chance que ça marche. »

Les Shadoks de Jacques Rouxel [1931-2004]
Animateur et producteur de dessins animés

Résumé

La Biorobotique vise non seulement à élucider les mécanismes sensorimoteurs des animaux, mais aussi à les incarner de manière parcimonieuse à bord de robots bio-inspirés, qui sont alors de véritables preuves de concept évoluant en environnement réel. Cette démarche permet ainsi de confirmer ou d'infirmer ce que nous pensons avoir compris du fonctionnement animal. Ainsi, par une interaction entre différents champs scientifiques, la Biorobotique fait simultanément avancer la compréhension des mécanismes sensorimoteurs des animaux, mais aussi fournit aux robots l'agilité des animaux par un couplage sensorimoteur plus *écologique* avec l'environnement. Après une synthèse de mes travaux de recherche sur le guidage visuel des animaux comprenant des insectes volants, des oiseaux, mais aussi les pilotes d'hélicoptère, tous étant des virtuoses du pilotage en dépit du fait que leurs systèmes visuels sont très différents. On se posera alors la question des déterminants communs de ces agents volants pour réaliser un contrôle d'altitude ou un atterrissage sur une cible en mouvement, par exemple. Oubliée de la robotique, la vision ultraviolette occupera ensuite une place prépondérante dans mes perspectives de recherche. En effet, la vision ultraviolette est exploitée par les insectes, les oiseaux, mais aussi par de nombreuses espèces aquatiques, pour naviguer sur terre, dans les airs, mais aussi sous l'eau. Le robot fourmi AntBot est un exemple emblématique du potentiel d'innovation de la démarche biorobotique en vision ultraviolette. Dans ce but, les propriétés optiques des rayonnements terrestre et sous-marin seront mis en relation avec les capacités de navigation des animaux, dont les mécanismes et les principes permettront de concevoir de nouveaux systèmes de navigation bio-inspirés, mais aussi des dispositifs d'aide à la navigation des pilotes.

Mots clés : Biorobotique, Bionique, Biomimétisme, Robotique Bio-inspirée, Flux Optique, Vision Ultraviolette, Vision Polarisée, Guidage visuel, Contrôle d'Altitude, Navigation, Compas Céleste, Vision Non-Conventionnelle, Scénario de Blackout Radio.

Abstract

Biorobotics aims at not only elucidating the sensorimotor mechanisms in animals, but also at embodying them sparingly aboard robots bio-inspired, which are then genuine proofs of concept evolving into real environment. This approach thus makes it possible to confirm or invalidate what we think we understand how animals work. This approach thus allows us to confirm or refute what we think we have understood about animal functioning. Thus, through an interaction between different scientific fields, Biorobotics simultaneously advances the understanding of animals' sensorimotor mechanisms, but also provides robots with the agility of animals through a more ecological sensorimotor coupling with the environment. After a synthesis of my research work on visual guidance of animals including flying insects, birds, but also helicopter pilots, all of them being virtuosos of piloting notwithstanding that their visual systems are very different. The question will then be raised as to the common determinants of these flying agents to carry out altitude control or a landing on a moving target, for example. Forgotten by robotics, ultraviolet vision will then occupy a prominent place in my research prospects. Indeed, ultraviolet vision is used by insects and birds, but also by many aquatic species, to navigate on land, in the air, but also underwater. The AntBot ant-inspired robot is an emblematic example of the innovative potential of the biorobotic approach to ultraviolet vision. To this end, the optical properties of terrestrial and submarine radiation will be linked to the navigational capabilities of animals, which mechanisms and principles will make possible to design new bio-inspired navigation systems, but also pilot navigational aids.

Keywords: Biorobotics, Bionics, Biomimicry, Bio-inspired Robotics, Optical Flow, Ultraviolet Vision, Polarized Vision, Visual Guidance, Altitude Control, Navigation, Celestial Compass, Unconventional Vision, Radio Blackout Scenario.

Remerciements

Je tiens tout particulièrement à remercier les membres du jury d'avoir accepté d'expertiser mon habilitation à diriger des recherches centrée autour de la démarche de recherche biorobotique. Mon intérêt pour la biorobotique n'aurait pu voir le jour sans le rôle majeur de mon directeur de thèse, Nicolas Franceschini, véritable pionnier en la matière.

Je pense ensuite à mes collaborateurs scientifiques de l'équipe Biorobotique : Stéphane Viollet, Franck Ruffier, Antoine Morice, et Thibaut Raharijaona, tous quatre au tempérament très différent, mais dévoués à notre seul but commun : faire rayonner la biorobotique française dans et au-delà des frontières nationales.

Je remercie aussi Gilles Montagne et Reinoud Bootsma de m'avoir transmis leurs connaissances sur l'approche écologique de la perception visuelle en lien avec les affordances, me permettant aujourd'hui d'avoir une démarche de recherche transdisciplinaire. Il me reste néanmoins encore beaucoup de travail pour cerner ce cadre théorique nouveau pour moi.

Je remercie naturellement l'ensemble des personnels que j'ai côtoyés depuis mon intégration en septembre 2014 au sein de l'Institut des Sciences du Mouvement, de m'avoir offert un environnement technique et social de haute qualité, m'ayant permis d'atteindre le plus haut niveau scientifique. Personnels de direction (tout particulièrement Jean-Louis Vercher, Eric Berton, et enfin Martine Pithioux), ingénieurs (tout particulièrement Frank Buloup, Nathalie Masia, Patrick Sainton, Frédéric Pous, et Marc Boyron), techniciens (tout particulièrement Julien Dipéri et Sylvain Floucat) ou administratifs (tout particulièrement Bernadette Derderian, Nathalie Fenouil, Wilfried Meozzi, Annie Gibert, Sylvie Terzian, et Marie-Eve Cadenel), qu'ils en soient tous remerciés.

Je remercie également Franck Orsatti, chargé de transfert de technologies, qui m'accompagne au sein de [la Société d'Accélération du Transfert de Technologie Sud-Est](#). Je tiens aussi à remercier [David Wood](#) pour avoir révisé bon nombre de mes publications. Je remercie aussi Brigitte et Serge Dini, apiculteur, de m'avoir appris à travailler avec les abeilles.

Dans ce parcours scientifique, mes pensées vont également à mes doctorants, Geoffrey Portelli, Frédéric Roubieu, Erik Vanhoutte, Julien Dupeyroux, Ilya Brodoline, Aimie Berger Dauxème, Mathieu Thomas, et Léo Poughon pour lesquels la formation et l'accompagnement ont véritablement été des activités partagées pour en faire de véritables co-équipiers.

Pour conclure, je voudrais naturellement citer Sophie Seguinél pour cet amour commun pour la Science et pour nos cœurs.

Préambule autobiographique

Cette lecture, bien que fastidieuse pour celui ou celle qui prendra le temps de lire jusqu'au bout, vous permettra de prendre conscience de toute la dimension du personnage. Pour cela, il devra prendre son courage à deux yeux, aux risques d'en connaître davantage sur son auteur.

Dans mon chaos familial, finalement semblable en tout point à l'image de que l'on peut avoir des sociétés actuelles, j'aurais énormément de mal à remercier mes parents car j'incarne un fils antagoniste à leurs croyances, mais aussi un fils très éloigné de la légèreté de leurs vies passées durant cette seconde moitié de XXème siècle. Il s'en est fallu de peu pour que la Science ne fasse pas partie intégrante de ma vie. En effet, fils d'un père doué en médecine non conventionnelle, et ayant développé des compétences expertes en Naturopathie (toujours en activité à ce jour à 69 ans), et d'une mère, talentueuse en physique chimie, certifiée, et ayant consacré sa vie à l'enseignement public au sein du lycée Jean Perrin (Marseille, 10ème) jusqu'à son brutal décès en 1993, frappée par une maladie incurable à l'âge de 44 ans. Tout aurait pu être presque parfait dans mes mésaventures, si cette dernière ne s'était pas plongée dans l'Astrologie, et tout particulièrement la conception de thèmes astraux à partir de 1988, début de son divorce, certainement en quête d'explications à ses maux dans la lecture des astres, point culminant de ce désastre.

Comment cet enfant, puis cet adolescent, ayant eu pour père un magnétiseur, conteur de bonne aventure dans le Tarot de Marseille, intimidant ces deux enfants avec son gri-gri camerounais, ne croyant pas à la médecine allopatique, n'y emmenant jamais ses deux fils, et enfin une mère ne cherchant plus qu'à lire le destin de la famille dans les thèmes astraux, pouvait-il devenir scientifique ? J'ai ainsi peu à peu pris conscience que le point de départ de ma connaissance de la Science, fut ma connaissance précoce de ces pseudo-sciences et de leurs absurdités, dont leurs qualités premières sont : l'absence de répétabilité, d'efficacité, et dont la performance atteint au mieux le niveau de performance d'un placebo aux effets psychologiques irréfutables.

Au milieu de cet ésotérisme, parfois aussi de charlatanisme, j'ai eu la chance de vivre dans un cadre exceptionnel, les collines de [La Bouilladisse](#), petite commune du Pays d'Aubagne et de l'Étoile, où vit [Marcel Pagnol](#). Je remercie [Antoine Serres](#), mon aîné, pour son indéfectible soutien et sa présence dans toutes nos aventures familiales. Je tiens tout particulièrement à le féliciter pour sa brillante carrière dans la Marine Nationale. Diplômé d'une licence de génie nucléaire, il a eu l'honneur de piloter le porte-avion Charles de Gaulle au cours de sa carrière

(Mission Agapanthe en Afganisthan en 2010, puis l'opération Harmattan en Lybie en 2011), il occupe actuellement un poste dans la Gendarmerie Maritime à Mayotte. Enfin, je remercie [Gilles Pellissier](#), voisin et ami depuis toujours, il représente dans mon cœur autant que "Lili des Bellons" pour [Marcel Pagnol](#). Je remercie également [Jérôme Olivero](#), copain et ami, qui était le seul à avoir une vraie adresse postale dans notre impasse au niveau du [7 Ancien chemin d'Aix 13720 La Bouilladisse](#). Nous avons ensemble exercé nos talents dans les collines, faisant de nous de véritables explorateurs et naturalistes, nous avons joué une infinité d'heures aux Legos faisant de nous de véritables ingénieurs en herbe.

Je tiens tout particulièrement à mentionner l'indéfectible amour que me portent Mireille Stellata (mère de Gilles Pellissier), Christine Isetti-Jankowiak (ma marraine) et son mari Stanilas Jankowiak. De loin, ces personnes incarnent pour moi l'indéfectible amour du prochain. J'associe aussi les parents de Sophie Seguinél : Danielle Gillant-Seguinél, Jean-Pierre et Brigitte Seguinél. Je souhaite également mentionner mes grands-parents maternels : Renée et [Antoine Albala-dejo](#), figures emblématiques de la résistance bouilladissienne sous l'occupation allemande, qui ont su me transmettre les valeurs de la République.

Je pense aussi aux amis et collègues de ma mère du lycée Jean Perrin : Jacqueline et Roderick Macleod, Jean-Pierre Danner, Denise et Bernard Blanc, Marcel et Catherine Conigliaro, qui m'ont permis d'avoir un cadre propice à mes études en dépit des mes tourments familiaux.

Je tiens également à citer les personnels de l'Éducation Nationale qui ont remarqué mes qualités et mon potentiel professionnel au service de l'enseignement secondaire durant mes 7 années passées au lycée Marie-Madeleine Fourcade à Gardanne : Paul Bertoni (chef des travaux, et ancien collègue de travail de ma mère), Denis Barroéro (Proviseur), Pascal Loos (IA-IPR Physique-Chimie), et Charlie Devedjian (chef des travaux), ainsi que Norbet Dallièrre, Didier et Laurence Dherbecourt, et Jean-Paul Bourguet (collègues du club robotique).

Pour conclure, sachez que seule la Science m'aura permis de m'émanciper en ce monde, mais aussi me détacher de ces insoutenables croyances culturelles. Je me rappellerai toujours ce jour d'automne 1992, où ma mère m'emmena au lycée Jean Perrin assister à une conférence de Pierre-Gilles de Gennes (Prix Nobel de Physique 1991) dont il avait accepté l'invitation. Puis de cette fameuse journée du 29 janvier 2008 à l'École des Mines de Saint-Étienne à Gardanne, où 6 prix Nobel de Physique furent réunis : Carlo Rubbia (1984), Leon Lederman (1988), Claude Cohen-Tannoudji (1997), Horst Störmer (1998), Albert Fert (2007), et Georges Charpak (1992). Il faut du temps pour prendre conscience que rien n'est jamais acquis en matière de connaissances sans transmission aux générations futures, aussi croyez bien que je mettrai tout en œuvre pour combattre toute forme de croyances véhiculées encore aujourd'hui par les cartomanciens, les créationnistes, les platistes, les collapsologues, les anthropocentriques, mais aussi les biocentristes à travers leur véganisme exacerbé, entre autres.

Table des matières

Résumé	4
Abstract	5
Remerciements	6
Préambule autobiographique	8
Table des matières	9
Table des figures	12
Liste des tableaux	13
Introduction	15
1 Curriculum Vitæ	16
1.1 Affiliations et coordonnées	16
1.2 Parcours dans la Fonction Publique	17
1.3 Formations et titres universitaires	20
1.4 Synthèse de mes activités d'enseignement	22
1.4.1 Volume horaire de mes enseignements	22
1.4.2 Responsabilités et administration de l'enseignement	25
1.5 Diffusion, rayonnement, et vulgarisation scientifique	27
1.6 Synthèse de mes activités de recherche	28
1.6.1 Indicateurs bibliométriques	28
1.6.2 Référencement Internet de mes recherches	28
1.6.3 Expertise de la recherche	29
1.6.4 Distinctions	29
1.6.5 Activités éditoriales	30
1.6.6 Encadrements doctoraux	30
1.6.7 Stagiaires	32
2 Mes Publications	34
2.1 Publications	35
2.1.1 Revues indexées Journal Citation Reports (20)	35
2.1.2 Revues internationales (4)	37

2.1.3	Conférences internationales IEEE (13)	38
2.1.4	Conférences internationales (17)	40
2.1.5	Workshops (10)	42
2.1.6	Ouvrages et chapitres (10)	43
2.1.7	Ouvrages de vulgarisation (2)	45
2.1.8	Revue nationale à comité de lecture (7)	45
2.1.9	Conférences nationales (14)	46
2.1.10	Brevets (1)	48
2.2	Conférences invitées (11)	48
2.3	Séminaires (7)	49
2.4	Communiqués de presse	50
3	Synthèse de mes activités de recherche	54
3.1	Mes thématiques de recherche : grands axes et apports transdisciplinaires	54
3.2	Du photon à la vision	56
3.2.1	Propriétés physiques du rayonnement solaire reçu au sol	56
3.2.2	Pourquoi les insectes perçoivent-ils les ultraviolets et non l'infrarouge ?	58
3.2.3	Propriétés physiques du rayonnement sous-marin	59
3.2.4	Voir le monde à travers des filtres polarisants	61
3.2.5	Voir le monde au moyen du flux optique	65
3.2.6	Définition et formalisation mathématique du flux optique	67
3.3	Se guider dans un tunnel sur la base du flux optique	68
3.4	Naviguer en extérieur en étant totalement référencée vision	72
3.4.1	Des enjeux qui dépassent le cadre de la biomimétique	73
3.4.2	Les techniques traditionnelles de localisation	73
3.4.3	La bio-inspiration : un autre moyen de se localiser	74
3.4.4	AntBot : un robot fourmi complètement autonome	75
3.5	Expliquer le contrôle d'altitude chez les abeilles	78
3.5.1	Objectif : décorréler le support informationnel visuel chez l'abeille	78
3.5.2	Les abeilles, qui survolent un miroir, s'écrasent irrémédiablement	79
3.6	Expliquer le contrôle d'altitude chez les oiseaux	81
3.7	Concevoir une assistance visuelle au pilotage	84
4	Perspectives de recherche	85
4.1	Valorisation actuelle des mes recherches	85
4.1.1	Robotique de service : projet MIMICOMPAS	85
4.1.2	Automobile : partenariat ISM/PSA OpenLab 2.0	91
4.2	Unifier et clarifier les théories sur le guidage visuel des insectes volants	93
4.2.1	Le contrôle d'altitude chez les insectes volants exploite-t-il différents invariants optiques ?	93
4.2.2	Les affordances existent-elles chez les insectes volants ?	97
4.3	Perspectives de recherche à plus long terme	99
4.3.1	Conception de capteurs optiques innovants	99

4.3.2	Conception de plateforme robotique innovante	100
4.4	Appels d'offres scientifiques obtenus	101
5	Conclusion	102
5.1	Mon expérience scientifique	102
5.2	Ma démarche de recherche	103
5.3	Le biomimétisme, une fin en soi	104
5.4	Le biomimétisme pour mieux comprendre le guidage visuel chez l'humain	105
	Conclusion	106
	Bibliographie	107

Table des figures

3.1	Ma démarche de recherche transdisciplinaire	55
3.2	Mes robots prototypés	56
3.3	Rayonnement solaire au niveau de la mer et perception des longueurs d'onde	57
3.4	Transmission du rayonnement solaire à travers les nuages	58
3.5	Obscurité subaquatique et vie sous-marine	59
3.6	Fenêtre de Snell	60
3.7	Rayonnement solaire disponible sous l'eau	61
3.8	Photographie panoramique du ciel au moyen d'un filtre polarisant	62
3.9	Vision du ciel à travers des filtres polarisés	62
3.10	Le motif de polarisation de la lumière du ciel	63
3.11	Principe physique de la polarisation linéaire	64
3.12	Diagramme de répartition du degré de polarisation linéaire	65
3.13	Paramètres impliqués dans le flux optique	68
3.14	Pilote automatique ALIS (<i>AutopiLot using an Insect based vision System</i>)	69
3.15	Diagramme fonctionnel du générateur de saccades	70
3.16	Comparaison directe entre le comportement du robot simulé et celui de la mouche dans un virage en S	71
3.17	Mouvement du robot LORA dans un labyrinthe	72
3.18	Caricature de Flock montrant un robot utilisant une carte pour s'orienter.	73
3.19	Compas céleste d'AntBot	76
3.20	Robot hexapode AntBot	77
3.21	Comparaison entre la fourmi et le robot AntBot	77
3.22	Caricature de Grey Duck Garlic montrant une abeille se fiant au GPS.	78
3.23	Flux optique généré par un oiseau en vol au dessus de la mer	82
3.24	Goéland (<i>Larus fuscus</i>) volant au-dessus de la mer Baltique	83
3.25	Augmentations visuelles testées en réalité augmentée	84
4.1	Pôle Nord en mouvement	87
4.2	Compas céleste SkyPASS	88
4.3	Compas céleste AntBot vs. MIMICOMPAS	90
4.4	Expériences en réalité virtuelle sur la drosophie de Straw (2010)	94
4.5	Abeille atterrissant sur une fleur	98
4.6	Hélicoptère apportant sur une frégate	98
4.7	Futur robot hexapode construit en biorobotique	100
5.1	Devise Shadoks	104

Liste des tableaux

3.1	Préférence des ultraviolets chez certains insectes	57
-----	--	----

Introduction

S'inspirer de la Nature n'est pas une idée récente pour résoudre des problèmes complexes. Cette pratique était, est, et sera monnaie courante à toutes les époques de l'Histoire. Néanmoins, ce n'est que depuis les années 1950 qu'elle s'inscrit comme véritablement une démarche de recherche à part entière. Cette démarche invite l'Humanité à puiser dans les multiples sources d'inspiration que lui offre la Nature, qu'il s'agisse des formes, des matériaux, de la gestion de l'énergie et de l'information, ou bien encore des synergies et des écosystèmes durables. La Nature nous propose alors d'observer les solutions mises au point et perfectionnées tout au long de l'évolution de la Vie (DARWIN 1859). Elle représente une véritable banque de solutions qu'il faut comprendre puis reproduire afin de faciliter la résolution des problèmes complexes des sociétés humaines contemporaines, et demain leurs permettre de satisfaire leurs propres besoins, tout en limitant leur empreinte écologique (RICARD 2015).

Prenons maintenant comme exemple un insecte volant misérable bien connu de tous : [la mouche](#). Serait-il plus innovant d'améliorer les performances des tapettes à mouche que d'essayer de comprendre les raisons pour lesquelles nous échouons si souvent lorsque nous tentons les écraser ?

Aujourd'hui, la mouche est perçue par la communauté scientifique comme un micro aéronef agile équipé d'un cerveau parcimonieux d'un million de neurones capable de naviguer à vue en environnements imprévisibles. Son système nerveux est extrêmement ingénieux sur les plans optique et neuronal, cette créature autonome illustre les problèmes généraux de contrôle sensorimoteur propre à tout être vivant doté de vision (insectes, oiseaux, pilotes...). Les travaux de recherche conduits ces 50 dernières années ont démontré l'existence de neurones spécialisés contrôlant la locomotion dont la fonction est de mesurer la vitesse de défilement de l'image rétinienne, appelé aussi flux optique (Nicolas FRANCESCHINI 2014). En transcrivant le schéma de fonctionnement de tels neurones en microcircuits électroniques, les bioroboticiens ont donné naissance à des capteurs innovants leur permettant de construire des robots terrestres et aériens, capables de s'orienter et d'éviter les obstacles dont l'agilité est en constante amélioration (J. SERRES et RUFFIER 2016). De tels robots bio-inspirés ont le mérite d'éclairer, en retour, les comportements animaux observés (BEER, CHIEL, QUINN et al. 1998 ; FRANZ et MALLOT 2000 ; WEBB 2000 ; WEBB 2001 ; Nicolas FRANCESCHINI, RUFFIER et J. SERRES 2007a ; SRINIVASAN 2011 ; FLOREANO, Auke Jan IJS-

PEERT et SCHAAL 2014; Auke J IJSPEERT 2014; Thibaut RAHARIJAONA, KERHUEL, J. SERRES et al. 2014; Julien R SERRES et RUFFIER 2017). La Biorobotique a pour but de comprendre le comportement animal, elle est donc fortement connectée avec les Sciences de Vie, et nécessite une démarche de recherche pluridisciplinaire.

En 2013, un consortium européen impliquant 5 équipes, dont l'équipe biorobotique à laquelle j'appartiens, est parvenu à construire le premier œil artificiel inspiré de la vision panoramique de la mouche dénommé CurvACE (l'as de la courbure) pour « Curved Artificial Compound Eye » (FLOREANO, PERICET-CAMARA, Stéphane VIOLLET et al. 2013) pouvant trouver des applications dans le secteur de la dronique, la sécurité aérienne, ou bien encore la surveillance. Mais on pourrait s'attendre à ce que dans les années à venir de nombreuses autres études électrophysiologiques puissent donner naissance à de multiples réalisations électroniques dites neuromorphiques reproduisant sous forme de circuits micro-électroniques les traitements neuronaux (Julien R SERRES et Stéphane VIOLLET 2018). Une conséquence majeure serait une meilleure compréhension de la vision des vertébrés et des invertébrés pour développer des technologies neuromorphiques remarquables trouvant des applications en réhabilitation sensorielle chez l'humain ou bien encore accroître l'autonomie des véhicules en environnement imprévisible.

S'inspirer des modes de locomotion animale sous-marine (nage), terrestre (bipède, quadripède, ...), ou aérienne (vol battu) a donné lieu à de nombreuses réalisations robotiques comme des robots poisson ou des robots humanoïdes durant ces dernières décennies. Mais l'organisation du mouvement ne peut se dissocier de la perception qui, elle aussi, a donné lieu à de nombreuses études extraites de l'éthologie comme l'étude de la navigation en vol des abeilles ou encore la navigation au sol des fourmis du désert, mais également les travaux de James Gibson sur la perception humaine pour mieux comprendre la prise d'informations visuelles du pilote (GIBSON 1950). Mais toutes les modalités sensorielles sont concernées : du toucher chez l'humain à l'audition des chauves-souris, en passant par l'olfaction des papillons mais aussi du sens électrique chez le poisson, sont autant d'exemples se situant à l'interface entre Sciences du Vivant et Sciences de l'Ingénieur. Ce lien entre locomotion et perception est, en ce qui me concerne, l'exemple emblématique d'une transdisciplinarité fédérant différents champs scientifiques pour répondre à des questions fondamentales et similaires très souvent source d'innovation à plus long terme.

1 Curriculum Vitæ

Sommaire

1.1	Affiliations et coordonnées	16
1.2	Parcours dans la Fonction Publique	17
1.3	Formations et titres universitaires	20
1.4	Synthèse de mes activités d'enseignement	22
1.4.1	Volume horaire de mes enseignements	22
1.4.2	Responsabilités et administration de l'enseignement	25
1.5	Diffusion, rayonnement, et vulgarisation scientifique	27
1.6	Synthèse de mes activités de recherche	28
1.6.1	Indicateurs bibliométriques	28
1.6.2	Référencement Internet de mes recherches	28
1.6.3	Expertise de la recherche	29
1.6.4	Distinctions	29
1.6.5	Activités éditoriales	30
1.6.6	Encadrements doctoraux	30
1.6.7	Stagiaires	32

1.1 Affiliations et coordonnées

Recherche

Institut des Sciences du Mouvement
E-J. Marey, UMR7287
CP910
163, Avenue de Luminy
13009 MARSEILLE

[Julien René Claude Serres](#)

Français, pacsé, 42 ans
Maître de Conférence (8^{ème} échelon)
CNU : 74
Spécialité : Robotique bio-inspirée et
contrôle sensori-moteur

Enseignement

Aix Marseille Université
Faculté des Sciences du Sport
CP910
163, Avenue de Luminy
13009 MARSEILLE

Recrutement : 1^{er} septembre 2014
julien.serres@univ-amu.fr

+33 (0) 4 91 26 62 38 (pro)

1.2 Parcours dans la Fonction Publique

J'ai débuté ma carrière dans la fonction publique en 1999 en tant que normalien (fonctionnaire stagiaire) pour 4 ans au sein de l'École Normale Supérieure de Cachan (actuellement dénommée [École Normale Supérieure Paris-Saclay](#)). Préalablement à la réussite au concours d'entrée à l'ENS Cachan, j'ai suivi une scolarité en classes préparatoires aux grandes écoles (CPGE) financée pendant 3 ans par une bourse d'études supérieures dite « Leriche » de [l'Orphelinat de l'Enseignement Public](#). Durant ma scolarité au sein de l'ENS Cachan, j'ai intégré le département d'Electronique Electrotechnique Automatique (EEA) pour non seulement préparer une licence et une maîtrise EEA, mais aussi pour préparer le concours de l'Agrégation Externe de Sciences Physiques (option physique et électricité appliquées). Lors de ma 4ème année à l'ENS Cachan, j'ai décidé de suivre un Diplôme d'Études Approfondies en Imagerie Médicale de l'Université de Paris 11 pour élargir mes compétences aux neurosciences.

En 2003, j'ai débuté une thèse de doctorat sous la direction du DR Nicolas Franceschini (Laboratoire Mouvement et Perception UMR6152 à Marseille) financée pendant 3 ans grâce à un CDD CNRS. Cette thèse en biorobotique m'a permis de développer mes compétences et mon expertise dans les domaines de la robotique et de l'éthologie (abeille). A l'issue de ces 3 années, j'ai, de manière concomitante, intégré l'Éducation Nationale en tant que professeur stagiaire au sein de l'Académie de Lyon. Durant l'année 2006-2007, j'ai simultanément : (1) assuré une charge d'enseignement au lycée Edouard Branly (Lyon, 5ème) représentant un tiers de la charge d'enseignement d'un professeur certifié de physique appliquée (soit 6 heures par semaine en classe de première Sciences et Techniques Industrielles) ; (2) suivi la formation universitaire des enseignants du second degré à l'Institut Universitaire de Formation des Maîtres de Villeurbanne (actuellement l'ESPE) pour un volume de formation de 284 heures ; (3) poursuivi ma 4ème année de thèse essentiellement en rédigeant à distance mes articles scientifiques. Cette année ayant fortement pénalisé la progression de ma thèse pendant 10 mois, j'ai été autorisé à m'inscrire en 5ème année de thèse pour finalement défendre ma thèse le 11 juillet 2008.

En 2007, j'ai intégré l'Éducation Nationale en tant que professeur agrégé de physique appliquée au sein de l'Académie d'Aix-Marseille sur un poste rattaché au lycée Marie Madeleine Fourcade à Gardanne (13). Pendant 2 ans, j'ai essentiellement enseigné en classe de premières technologiques industrielles et comme chargé de travaux pratiques en BTS électrotechnique.

En 2009, j'ai eu l'opportunité de postuler sur poste spécifique en BTS électrotechnique en tant que professeur agrégé de physique appliquée au sein du lycée Marie Madeleine Fourcade. Parallèlement, j'ai participé à l'organisation par BTS électrotechnique par alternance ouvert au GRETA du Pays d'Aix dont notre lycée est partenaire. J'ai donc activement participé aux enseignements du BTS électrotechnique en formation continue (~ 400 heures par an) et du BTS électrotech-

nique par alternance (~ 165 heures par an), mais aussi le suivi des apprentis au sein des entreprises. Sur cette même période, j'ai créé et animé un club robotique au sein du lycée. Entre 2010 et 2013, j'ai été membre du conseil d'administration du lycée Marie Madeleine Fourcade, qui compte ~ 1450 lycéens ou étudiants.

En 2014, j'ai pris mes fonctions de Maître de Conférence à l'Université d'Aix Marseille. Suite à cette nouvelle affectation, j'ai opéré un travail d'intégration au sein de la Faculté des Sciences du Sport (2000 étudiants – 3 sites : Marseille, Aubagne, Gap – 75 permanents – 180 vacataires) ainsi qu'à l'Institut des Sciences du Mouvement – E-J. Marey (UMR7287). Lors ma prise de fonction, je n'ai pas souhaité bénéficier d'une décharge de service pour ne pas compromettre, depuis 2010, mes collaborations pédagogiques avec l'École des Mines de Saint-Étienne (EMSE cycle ISMIN, Gardanne), ce qui me permet aujourd'hui d'entretenir d'étroites relations avec les chercheurs du Centre de Microélectronique de Provence. Ma titularisation obtenue en 2015, je me suis vu confier simultanément la responsabilité des champs d'enseignement outils (OUT) et d'anglais (ANG) de la Faculté des Sciences du Sport. Entre 2015 et 2018, j'ai dû superviser au pied levé les enseignements d'anglais (suite au départ, non remplacé, de notre PRAG d'anglais), j'ai alors recruté et supervisé personnellement entre 13 à 15 intervenants extérieurs par an pour une enveloppe annuelle de 930 heures d'anglais du L1 au M2, à laquelle il fallait ajouter la supervision du champ OUT pour une enveloppe horaire au moins équivalente à celle de l'anglais.

Depuis 2018, je m'occupe de la mise en place du nouveau quinquennal 2018-2023 des enseignements du champ OUT, tâche qui m'a été dévolue par notre vice-doyen formation Pascal Carlier [2013-2019]. Je supervise essentiellement la modernisation des enseignements d'informatique en licence (380 heures impliquant 8 intervenants extérieurs) et de statistiques en licence et M1 IEAP (200 heures impliquant 3 intervenants extérieurs). Aujourd'hui, j'engage ma 7ème année de service, j'interviens pour un tiers de mon service d'enseignement en Cursus Master Ingénierie IMH ouvert en 2013 (CMI Ingénierie du Mouvement Humain, niveau licence) et en licence ESPM (Ergonomie du Sport et Performance Motrice), et pour deux tiers dans les masters, essentiellement le master IEAP (Ingénierie et Ergonomie de l'Activité Physique). Mon implication dans le Cursus Master Ingénierie IMH aura participé au renouvellement de l'agrément du Réseau Figure (décernant le label CMI) pour une période de 5 ans [2018-2023].

Janv. 2020	Congés pour Recherches ou Conversions Thématiques (CRCT). Durée : 6 mois Laboratoire partenaire : Centre de Recherche sur la Cognition Animale (CRCA UMR5169) à Toulouse, équipe Collective Animal Behavior (CAB) dirigé par DR Vincent Fourcassié Travaux : Étude de la locomotion lors du transport de charges chez la fourmi - application à la robotique hexapode
Depuis 2014	Maître de Conférence, Aix Marseille Université, Marseille. Composante d'affectation : Faculté des Sciences du Sport Laboratoire d'accueil : Institut des Sciences du Mouvement - E.J. Marey UMR7287 Profil recherche : Robotique bio-inspirée et contrôle sensori-moteur
2007–2014	Professeur Agrégé de Sciences Physiques, Académie d'Aix-Marseille. Pédagogies pré-bac et post-bac Poste spécifique en BTS électrotechnique au lycée Marie Madeleine Fourcade à Gardanne (depuis 2009) Formateur au GRETA du Pays d'Aix (depuis 2009)
2006–2007	Professeur Stagiaire de Sciences Physiques, Académie de Lyon. Affectation au lycée Édouard Branly, Lyon Pédagogie pré-bac
2003–2006	Doctorant en CDD, CNRS, Marseille. Équipe Biorobotique dirigée par DR Nicolas Franceschini, Campus Joseph Aiguier
1999–2003	Normalien, École Normale Supérieure Paris-Saclay, Cachan. Département Électronique Électrotechnique Automatique (EEA) Concours Banque PT, rang d'admission : 42

1.3 Formations et titres universitaires

Je pense qu'aux yeux de mes lecteurs, je devrais avoir un parcours atypique, voire non conventionnel, c'est certainement le cas par rapport à un parcours classique en STAPS, néanmoins, c'est ce dont mon université et ma composante, ont besoin pour se moderniser : une vision décloisonnée de sa pratique par une approche pluridisciplinaire. Tous les jours, je suis heureux de voir la confiance qui m'est témoignée pour la supervision des enseignements en compétences numériques au sein de la Faculté des Sciences du Sport, où le mot « Sciences » revêt pour moi une importance capitale, i.e., comment rendre plus scientifique la pratique sportive en apportant aux étudiants tous les outils indispensables.

J'ai la particularité d'être diplômé de trois masters distincts : magistère en électronique électrotechnique automatique (EEA), diplôme d'études approfondies en imagerie médicale, et l'équivalent d'un master en "Métiers de l'Enseignement, de l'Éducation et de la Formation" (MEEF) correspondant à mon agrégation externe couplée à mon année de formation à l'Institut Universitaire de Formation des Maîtres de Villeurbanne qui, à l'époque, ne sanctionnait pas cette année de formation par l'obtention d'un master MEEF.

J'ai ensuite conduit une thèse de doctorat en biorobotique, discipline à l'interface entre les Sciences du Vivant et la Robotique, qui m'a permis de développer mes compétences et mon expertise dans les domaines de la robotique bio-inspirée et de l'éthologie (abeille en particulier). Aujourd'hui, j'ai le sentiment d'être complètement pluridisciplinaire, et je suis capable à la fois de transférer des connaissances et des méthodes éthologiques ou robotiques vers dans le domaine de la psychologie expérimentale et réciproquement. Pour conclure, je pense avoir aujourd'hui un profil transdisciplinaire en science perceptivo-motrice (animaux, homme, robot), très interface entre les sciences du vivant et l'ingénierie, ce qui est indispensable pour conduire des recherches en robotique bio-inspirée vecteur d'innovations.

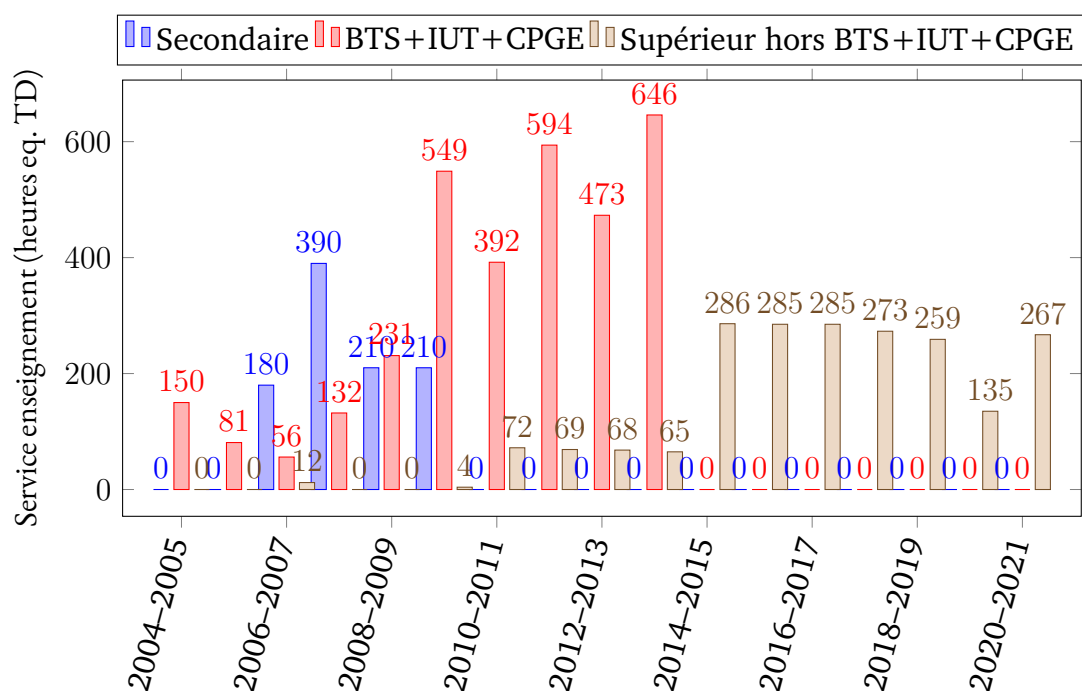
2003–2008	Thèse de Doctorat de l'Université de Montpellier 2. École doctorale : Information, Structure et systèmes (I2S, ED 166) Préparée au Laboratoire Mouvement et Perception UMR6152, CNRS / Université de la Méditerranée, Marseille Sous la direction du DR Nicolas Franceschini Titre : De l'abeille au robot : la régulation du flux optique. Contrôle conjoint de vitesse et d'évitement d'obstacles latéraux pour véhicules totalement ac- tionnés Date de soutenance : 11 juillet 2008 Membres du jury : PR René Zapata, Université de Montpellier 2, Président DR Nicolas Franceschini, CNRS, Directeur de thèse PR Auke Ijspeert, EPFL, Rapporteur DR Simon Thorpe, CNRS, CERCO, Rapporteur DR Rogelio Lozano, CNRS, Heudiasyc, Examineur PR Philippe Bidaud, UPMC (Paris 6), Examineur
2006–2007	Formation Universitaire des enseignants du second degré. IUFM de Villeurbanne, Académie de Lyon Formation spécifique à la pédagogie de projet Thème du mémoire professionnel : éducation au développement durable
1999–2003	Scolarité à l'ENS Paris-Saclay et à l'Université de Paris 11 Département Électronique Électrotechnique Automatique (EEA)
2003	Magistère de l'ENS Paris-Saclay et de l'Université de Paris 11 Électronique Électrotechnique Automatique (EEA)
2003	Diplôme d'Études Approfondies (DEA) de l'Université de Paris 11 Imagerie Médicale Spécialisation en imagerie neuro-cognitive fonctionnelle par résonance ma- gnétique (IRMf)
2001–2002	Agrégation Externe de Sciences Physiques Option Physique et Électricité Appliquées (code L1510) Rang d'admission : 13
1999–2001	Licence et Maîtrise de l'Université de Paris 11 Électronique Électrotechnique Automatique (EEA)

1.4 Synthèse de mes activités d'enseignement

1.4.1 Volume horaire de mes enseignements

J'ai 17 ans d'expérience en enseignement (période 2004-2021), j'ai enseigné pendant 4 ans face à des lycéens en filière technologique jusqu'à des étudiants en formation doctorale. J'enseigne également dans différentes écoles d'ingénieurs (EMSE, ENSTA) et différents masters universitaires (Aix Marseille Université, Université Paul Sabatier). Aujourd'hui, j'atteins une volume vertigineuse d'heures d'enseignement de 6374 heures réparties comme suit : 990 heures d'enseignement secondaire, 3304 heures d'enseignement supérieur type BTS-IUT-CPGE, et enfin 2080 heures d'enseignement supérieur essentiellement à l'École des Mines de Saint-Etienne (cycle ISMIN à Gardanne) et Aix Marseille Université (Faculté des Sciences du Sport).

Aujourd'hui, je suis fortement impliqué dans différents enseignements, mais également en supervision des enseignements du champ outils (OUT), des compétences numériques, et des langues. Ces activités, qui me sont dévolues, sont extrêmement chronophages mais indispensables au fonctionnement de ma composante. Néanmoins, si j'ai choisi d'exercer le métier d'enseignant-chercheur, c'est aussi pour le triptyque former/innover/valoriser, c'est-à-dire enseigner/piloter et participer à la direction de composante, développer mes travaux de recherche, et valoriser mes innovations auprès d'acteurs industriels.



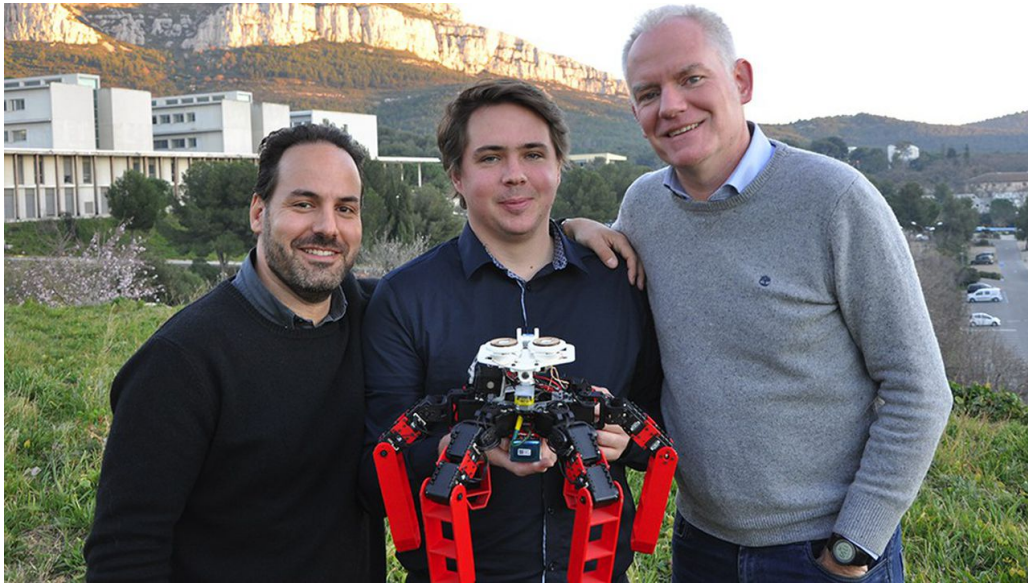
CNU	Intitulé	Niveau	Année	Heures	Service horaire
Enseignement secondaire	PRAG Physique Appliquée Académie Aix-Marseille / Lyon Lycée Marie Madeleine Fourcade (13) Lycée Edouard Branly (69)	1 ^{ère} STI	2006 – 2010	5 classes	990 heures
61	Vacataire FC CNRS DR12	FC	2006 2009	12h CM 4h CM	12h 4h
	Vacataire EMSE – ISMIM, Gardanne (13)				
	Invitation de Christian Buatois				
	Vacataire EMSE – ISMIM, Gardanne (13)	bac+3	2010 – 2020	576h TD/TP	576h
	Vacataire UFR Sciences, AMU	bac+4	2010 – 2011	12h CM	12h
	M1 Physique-Biologie	bac+3	2017– 2021	12h CM	12h
	Vacataire ENSTA, Palaiseau (91)				
	Invitation de Davide Boschetto				
	Vacataire IUT GEII AMU, Salon-de-Provence	bac+1	2004 – 2006	111h TP	111h
	Vacataire CPGE PSI* – Lycée Jean-Perrin (13)	bac+2	2004 – 2006	120h TD	120h
	Académie Aix-Marseille				
	PRAG Physique Appliquée. BTS Électronique, Académie de Lyon. Lycée Marcel Sembat (69)	bac+2	2006 – 2007	56h TP	56h
		bac+1	2007 – 2008	132h TP	132h
	PRAG Physique Appliquée	bac+1	2008 – 2009	132h TP	132h
	Académie d'Aix-Marseille	bac+2	2008 – 2009	99h TP	99h
	BTS Électrotechnique	bac+1	2009 – 2010	396h CM/TD/TP	396h
	Lycée Marie Madeleine Fourcade (13)	bac+2	2010 – 2011	264h CM/TD/TP	264h
		bac+1	2011 – 2012	429h CM/TD/TP	429h
	Heures réelles estimées devant étudiants en fonction de mon service d'enseignement	bac+2	2012 – 2013	308h CM/TD/TP	308h
		bac+1	2013 – 2014	445h CM/TD/TP	445h
	Formateur GRETA Provence Arbois	bac+1	2009 – 2010	153h TD/CM	153h
	BTS Électrotechnique	bac+2	2010 – 2011	128h TD/CM	128h
	Lycée Marie Madeleine Fourcade (13)	bac+1/+2	2011 – 2012	165h TD/CM	165h
	Heures réelles estimées devant étudiants en fonction de mon service d'enseignement	bac+1/+2	2012 – 2013	165h TD/CM	165h
		bac+1/+2	2013 – 2014	201h TD/CM	201h
				Total	3926 heures
69	Vacataire / Maître de Conférence				
	Invitation de Claude Touzet et de Franck Vidal	bac+4/+5	2011 – 2016	49h CM	74h eq. TD
	M1/M2 Neurosciences, UFR Sciences AMU				
	Vacataire / Maître de Conférence				
	UPMC à l'invitation Matthieu Dacher	bac+5	2014 – 2016	10h CM	15h eq. TD
	M2 Ecophysiologie et Ecotoxicologie				
	Vacataire / Maître de Conférence				
	Université Paul Sabatier – Toulouse 3	Bac+5	2017 – 2019	10hCM 12hTP	22h eq. TD
	Invitation de Cédric Florian et Richard Bon				
	M2 Neurosciences Cognition et Comportement				
				Total	111 heures
74	Introduction à la biorobotique	ED	2011 – 2019	54h CM	81h eq. TD
	ED463, UFR STAPS AMU				
	Eléments de mécanique des fluides et couplage fluide structure. M2 BTI, UFR STAPS AMU	bac+5	2016 – 2021	5x20h CM	150h eq. TD
	Informatique bureautique C2i niv.1	bac+2	2014 – 2015	20h TD	20h eq. TD
	L2 STAPS, UFR STAPS AMU				
	Statistiques / Rsudio. UFR STAPS AMU	bac+4/+5	2014 – 2021	324h TD 72h CM	432h eq. TD
	M1 IEMH/BTI/SMH/APS/IEAP/EOPS – M2 IEMH				
	Analyse et Traitement du Signal / Matlab	bac+5			
	M1 IEMH/BTI/SMH/IEAP/EOPS, UFR STAPS AMU	bac+4	2014 – 2021	184h TD	204h eq. TD
	Métrologie – Acquisition de données	bac+3		20h TD	
	L3 ESPM, UFR STAPS AMU				
	Mathématiques – Calcul numérique	bac+1			
	Cursus Master en Ingénierie (CMI)	bac+2	2014 – 2021	(6h CM+14h TD)×6 (6h CM+ 9h TD)×6 (6h CM+14h TD)×6	438h eq.TD
	L1-L2-L3, UFR STAPS AMU	bac+3			
	Electricité – Cursus Master en Ingénierie (CMI)	bac+2	2014 – 2019	(4h CM+4h TD)×5	50h eq. TD
	L2, UFR STAPS AMU				
				Total	1375 heures
				Σ heures	6402 heures

AMU	Aix Marseille Université
APAS	Activités Physiques Adaptées et Santé
BTI	Bio-ingénierie des Tissus et des Implants
BTS	Brevet de Technicien Supérieur
CMI	Cursus Master en Ingénierie
CPGE	Classe Préparatoire aux Grandes Écoles
ED	École Doctorale
EMSE	École des Mines de Saint-Étienne, cycle ISMIN, Gardanne
ENSTA	École Nationale Supérieure de Techniques Avancées, ParisTech, Palaiseau
EOPS	Entraînement et Optimisation de la Performance Sportive
ESPM	Ergonomie du Sport et Performance Motrice
FC	Formation Continue
GEII	Génie Électrique et Informatique Industrielle, IUT GEII, Salon-de-Provence
GRETA	GRoupement d'ÉTABlissements publics, GRETA Provence Arbois
IEAP	Ingénierie et Ergonomie de l'Activité Physique
IEMH	Ingénierie et Ergonomie du Mouvement Humain
ISMIN	Ingénieurs Spécialisés en Microélectronique, Informatique et Nouvelles Technologies, Gardanne
PRAG	PRofesseur AGrégé
SMH	Sciences du Mouvement Humain
STI	filière technologique Sciences et Techniques Industrielles
UPMC	Université Pierre et Marie Curie (Paris 6), aujourd'hui Sorbonne Université

1.4.2 Responsabilités et administration de l'enseignement

À peine ma titularisation en tant que Maître de Conférence obtenue en septembre 2015 au sein de mon université, je me suis vu confier simultanément la responsabilité des champs d'enseignement outils (OUT) et d'anglais (ANG) de la Faculté des Sciences du Sport. Entre 2015 et 2018, j'ai dû superviser au pied levé les enseignements d'anglais, j'ai alors recruté et supervisé personnellement entre 13 à 15 intervenants extérieurs par an pour une enveloppe annuelle de 930 heures d'anglais du L1 au M2, à laquelle il fallait ajouter les enseignements du champ OUT comprenant pour ma part essentiellement les enseignements d'informatique et de statistiques pour une enveloppe horaire au moins équivalente à celle de l'anglais. Depuis septembre 2018, je m'occupe de la mise en place du nouveau quinquennal 2018-2023 du champ OUT, je supervise la modernisation des enseignements d'informatique (équipe de 7 enseignants dont 6 non-permanents) et de statistiques (équipe de 7 enseignants dont 3 non-permanents). Mon investissement pédagogique ainsi que mon pilotage des ressources humaines au sein de ma structure a finalement été distingué par l'obtention d'une Prime d'Engagement Pédagogique (PEP) en 2016. Enfin, depuis 2020, je suis responsable du Département Numérique & Langues au sein de ma composante.

Depuis 2020	Responsable du Département Numérique & Langues Resp. de la plateforme de formation à distance en Langues 7Speaking Resp. de la plateforme de formation à distance en Numérique PIX Chargé de mission "GIFT AERO-DRONAMU" impliquant 12 composantes Resp. du sous-groupe TRACDRO comprenant 4 composantes Chargé de mission "Langues" dans le cadre du groupe de travail DREAM*U GT UE transverse pour la préparation du prochain quinquennal 2023-2028. Faculté des Sciences du Sport, Campus Luminy, Aix Marseille Université 1800 étudiants à Marseille, Aubagne, et Gap
2016	Prime d'Engagement Pédagogique (PEP) Aix Marseille Université Prime permettant de reconnaître et de valoriser de manière exceptionnelle l'investissement pédagogique.
2015-2019	Responsable des enseignements du champ outils (OUT) Faculté des Sciences du Sport, Campus Luminy, Aix Marseille Université
2015-2018	Responsable des enseignements d'anglais (ANG) Faculté des Sciences du Sport, Campus Luminy, Aix Marseille Université De l'annonce sur Internet à la validation des notes, en passant par l'assistance au montage de dossier de vacation. Recrutement et supervision de 13 à 15 intervenants extérieurs par an pour un besoin annuel de 930 heures.
Depuis 2010	Responsable du module Projet Matlab (3 groupes, 18 heures/groupe) École de Mines de Saint-Etienne, cycle ISMIN à Gardanne Promotion de 72 à 96 étudiants en première année
2010-2013	Membre élu au conseil d'administration Lycée Marie Madeleine Fourcade, Académie d'Aix-Marseille 1450 lycéens & étudiants (BTS)



De gauche à droite : Julien Serres, Julien Dupeyroux, et Stéphane Viollet.



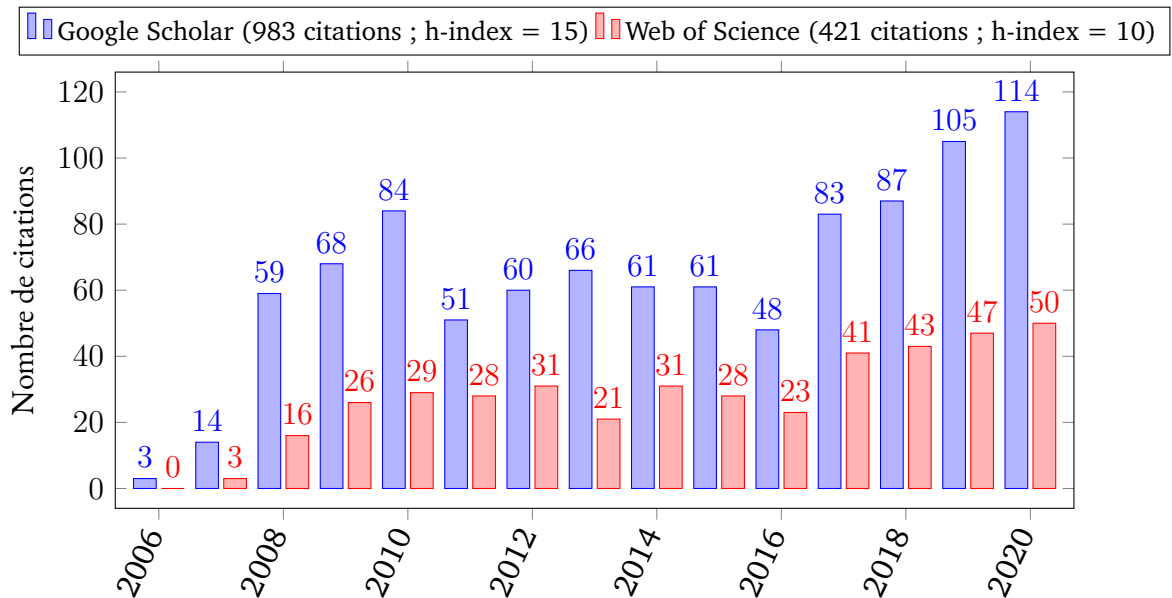
INTERNATIONAL
BIONIC AWARD

1.5 Diffusion, rayonnement, et vulgarisation scientifique

Avril 2020	Petite Question . Chaîne YouTube d'Aix Marseille Université. Titre : Peut-on vivre sans GPS ? Oui, je suis une fourmi.
Sept. 2019	Journées européennes du patrimoine , Nîmes. (21 septembre 2019) Dans le cadre de l'exposition temporaire « Biomimétisme, quand la Nature inspire l'innovation » au Muséum d'Histoire Naturel de Nîmes, présentation au public du robot AntBot sous forme d'atelier. Titre : AntBot, un robot sans GPS qui se dirige grâce à la lumière. 200 personnes
Mai 2019	Grand entretien avec Enki Bilal , Marseille. (30 mai 2019) Entretien animé par Tewfik Hakem (France Culture) La Criée - théâtre national de Marseille, dans le cadre de la 3ème édition du festival Oh les beaux jours ! 800 personnes
Juin 2017	Participation à un documentaire audiovisuel. « L'envolée scientifique » expliquant ma thématique de recherche, réalisé par Kenza Chatar, Sciences Arts et Techniques de l'Image et du Son (SATIS) - Aix Marseille Université.
2009-2014	Animateur et Créateur de l'Atelier Robotique au Lycée M. M. Fourcade, Gardanne.  Coordinateur d'une équipe pluridisciplinaire de 4 enseignants encadrant annuellement un groupe de ~ 12 lycéens. Budget annuel de fonctionnement : 5k€ financé par subventions rectorales, départementales (dispositif 13 Initiatives Jeunes), régionales (dispositif Convention de Vie Lycéenne et Apprentie - CVLA), et universitaires (dispositif Projets et Ateliers Sup'Sciences - PASS) à laquelle j'ai personnellement répondu. Participation aux concours des Trophées de Robotique organisés par l'association Planète Sciences – Eurobot Junior (coupe de Robotique des moins de 18 ans) avec un classement aux nationales sur 220 équipes engagées dans la compétition : 54 ^{ème} en 2010, 29 ^{ème} en 2011, 18 ^{ème} en 2012, 15 ^{ème} en 2013, 9 ^{ème} en 2014. Puis, suite à mon départ du lycée : 4 ^{ème} en 2015, 2 ^{ème} en 2017, et enfin champion d'Europe à Kaliningrad en Russie en 2017 ! En 2014, co-organisateur des Trophées de Robotique, rencontre régionale méditerranéenne en partenariat avec l'association Planète Sciences au sein du Lycée Marie Madeleine Fourcade. Le beau robot des lycéens de Fourcade . Le magazine d'informations de Gardanne Énergies, no. 338, p. 11, Juin/Juillet 2010 laseyne.info : Trophées de Robotique, 7^{ème} rencontres régionales , La Seyne-Sur-Mer (13 mars 2011)
2011-2013	Animateur d'un stand robotique à la fête de la Science, Gardanne. Les robots de Fourcade mènent le jeu. La Provence, Pays d'Aix, p. 13, 7 Octobre 2011 Ils ont mis la main à la pâte . Le magazine d'informations de Gardanne Énergies, no. 384, p. 8-9., Novembre 2012
Avril 2012	Participation au concours « 7^{ème} édition du concours Faites de la Science » organisé par Aix Marseille Université, Luminy, Marseille. (12 Avril 2012) Projet : « Variation de vitesse et gestion de l'arrêt d'un mini robot à roues » défendu pour les élèves première STI2D de l'Atelier Robotique.
Avril 2008	Animateur au Printemps des Chercheurs, Marseille. (7-19 Avril 2008) Atelier : « Y-a-t-il un pilote dans l'insecte ? »

1.6 Synthèse de mes activités de recherche

1.6.1 Indicateurs bibliométriques



1.6.2 Référencement Internet de mes recherches

- [Mon Site professionnel](#)
- [Ma chaîne Youtube](#)
- [Web of Science ResearcherID: Q-5713-2016](#)
- [ORCID: 0000-0002-2840-7932](#)
- [Google Scholar](#)
- [Archive ouverte HAL AMU](#)
- [ResearchGate](#) (h-index = 14, RG score = 23.28)
- [Frontiers In](#) (citations : 477)
- [dblp ordinateur science bibliography](#)
- [publons](#) (h-index = 8, citations : 370)
- [Microsoft Academic](#) (citations : 852)

1.6.3 Expertise de la recherche

- 38 expertises d'articles dans 3 domaines différents : robotique (e.g., IEEE Transactions on Robotics, Autonomous Robots, IEEE Transactions on Cybernetics, Rob. and Autom. Syst., MDPI Sensors, Robotica, IEEE ICRA 2020, Bioinspiration & Biomimetics, Chinese Journal of Aeronautics . . .), biologie (PNAS, Scientific Reports, J. of Exp. Biol., Biol. Letters, . . .), modélisation computationnelle (e.g., PLOS Computational Biology, Journal of Neural Engineering, Biological Cybernetics . . .). En moyenne : 6 expertises par an.
- Membre nommé au conseil de laboratoire de l'Institut des Sciences du Mouvement - E-J. Marey UMR7287 depuis septembre 2018.
- Membre de la Société Française pour l'Étude du Comportement Animal (SFECA) depuis 2017.
- Chargé de mission en représentation du directeur d'unité de l'ISM UMR7287 auprès de l'INS2I au CNRS depuis 2020.

1.6.4 Distinctions

- Prime d'Encadrement Doctoral et de Recherche (PEDR), Aix Marseille Université, période 2020-2023.
- Nomination au 5^{ème} Prix Départemental pour la Recherche en Provence 2020 pour le robot AntBot dans la catégorie "Prix Spécial".
- 1^{er} Prix du [7^{ième} International Bionic Award 2020](#) de VDI et la Fondation Schauenburg pour le robot AntBot.
- 2nd prix des thèses en robotique 2020 remis par le GDR Robotique CNRS, pour la thèse de Julien Dupeyroux sur le robot AntBot.
- 2019, AntBot sélectionné pour fêter les 80 ans du CNRS.
- [Trophée de l'Embarqué IoT Industrie & Services 2019 pour AntBot](#) à Paris, remis par Embedded France.
- [1st Best Paper Award au congrès international Living Machines 2018](#) à Paris pour l'acte : *AntBot, a hexapod walking robot mimicking navigation strategies of desert ants Cataglyphis*. Auteurs : J. Dupeyroux, J. Serres, et S. Viollet.
- [1st Best Paper Award au congrès European Conference on Mobile Robotics 2017](#) à Paris pour l'acte : *A bio-inspired celestial compass applied to an ant-inspired robot for autonomous navigation*. Auteurs : J. Dupeyroux, J. Dipéri, M. Boyron, S. Viollet, et J. Serres.
- [2nd prix des thèses en robotique 2008](#) remis par le GDR Robotique du CNRS.

1.6.5 Activités éditoriales

- Membre du comité de lecture "Cahiers marseillais de l'innovation". Cette revue, dont la parution sera annuelle, est destinée à accueillir tous les articles proposés par les étudiants des CMI de Marseille (Immunologie, Immunothérapie, Immunoingénierie; Ingénierie environnementale; Ingénierie du mouvement humain) depuis 2020.
- A mon initiative, Editeur invité ayant réuni un groupe de 4 chercheurs européens pour un numéro spécial de la revue *Sensors* (MDPI, ISSN 1424-8220), section "Capteurs et robotique", date limite de soumission : 30 juin 2021. Special Issue "Sensors, Motor Coordination, and High-level Cognition in Bio-inspired Robotics" : https://www.mdpi.com/journal/sensors/special_issues/bio_-inspired_obotics

1.6.6 Encadrements doctoraux

- **Geoffrey Portelli (2007-2011)**. Thèse soutenue le 21 septembre 2011
Titre : Le pilotage visuel chez l'abeille : expériences et modèle
Direction : Nicolas Franceschini (DR) et Franck Ruffier (CR)
Co-encadrant : Julien Serres (PRAG) (taux 25%)
Position actuelle : post-doc au Laboratoire d'Informatique, Signaux et Systèmes (I3S) de Sophia Antipolis
Publications co-signées : 2 revues scientifiques WoS (Journal of Physiology – Paris 2010 / Scientific Reports 2017), 2 communications internationales (FIR 2007, IEEE BIOROB 2008), 4 communications nationales (4ème journée de l'Ecole Doctorale Sciences du Mouvement Humain 2008, NEUROCOMP 2008, JJCR 2009, JNRR 2009).
- **Frédéric Roubieu (2009-2013)**. Thèse soutenue le 16 juillet 2013
Titre : Réalisation d'un micro-robot autonome, inspiré du contrôle de vitesse et d'évitement d'obstacles observés chez l'abeille
Direction : Stéphane Viollet (CR) et Franck Ruffier (CR)
Co-encadrant : Julien Serres (PRAG) (taux 25%)
Position actuelle : Entrepreneur avec son épouse
Publications co-signées : 1 revue scientifique WoS (Bioinsp. Biomim. 2014), 2 communications internationales (International Workshop on Bio-inspired Robots 2011, IEEE ROBIO 2012), 1 chapitre de livre (Handbook of Biomimetics and Bioinspiration 2014).
- **Érik Vanhoutte (2014-2018)**. Thèse soutenue le 23 octobre 2018
Financement : 50% AMU, 50% DGA (+3k€)
Titre : Microdrone équipé d'un système visuel inspiré des abeilles
Direction : Reinoud Bootsma (PU) et Julien Serres (MCU)

Position actuelle : ingénieur dans la start-up Unistellar

Publications co-signées : 1 revue scientifique WoS (MDPI Sensors 2017), 4 communications internationales (IEEE Sensors 2017, IEEE EBCCSP 2016 & 2017, IMAV 2017).

- **Julien Dupeyroux (2015-2019).** Thèse soutenue le 5 juillet 2019
Financement : 50% AMU, 50% DGA (+3k€)
Titre : Navigation bio-inspirée appliquée à un robot hexapode
Direction : Stéphane Viollet (DR) et Julien Serres (MCU)
Position actuelle : post-doc à l'Université Technologique de Delft (Pays-Bas)
Publications co-signées : 3 revues scientifiques WoS (J. of Royal Society Interface 2019, Science Robotics 2019, Robotics and Autonomous Systems 2019), 8 communications internationales (IEEE IROS 2017, IEEE ISCAS 2017, IFAC WC 2017, ECMR 2017, Biomimetic and Biohybrid Systems 2018, ICIV 2019, IEEE MED 2020 ×2), 1 chapitre de livre (Techniques de l'Ingénieur), 1 revue de rang A en SHS (Techniques&Culture, revue semestrielle d'anthropologie).
- **Ilya Brodoline (2018- ...)**
Financement : 100% DGA (+6k€)
Titre : Navigation autonome bio-inspirée référencée vision d'un robot hexapode dépourvu de GPS et de magnétomètre
Direction : Stéphane Viollet (DR) et Julien Serres (MCU)
Publications co-signées : 1 communication nationale (JJCR 2019), 1 communication internationale (IEEE MED 2020), 1 workshop (GDR 2088 BIO-MIM).
- **Aimie Berger Dauxère (2018- ...)**
Financement : 100% AMU
Titre : Contrôle d'altitude chez l'abeille : les invariants optiques
Direction : Gilles Montagne (PU) et Julien Serres (MCU)
Publications co-signées : 2 communications nationales (CBI 2019, UEIS 2019), 1 revue scientifique WoS (J. of Insect Physiology - en préparation).
- **Mathieu Thomas (2018- ...)**
Financement : 50% ONERA, 50% DGA (+3k€)
Titre : Indices visuels pour l'appontage d'hélicoptère
Direction : Franck Ruffier (DR) et Antoine Morice (MCU)
Co-encadrants : Thoma Rakotomamonjy (IR), Julien Serres (MCU)
Publications co-signées : 1 communication nationale (JF.IG.RV 2019), 1 revue scientifique WoS (Int. J. of Aviation Psychology).
- **Léo Poughon (2019- ...)**
Financement : CIFRE Groupe PSA/ISM (+50k€ sur 3 ans)

Titre : Utilisation de la polarisation ultraviolette pour l'obtention d'un cap en automobile

Direction : Julien Serres (MCU) et Stéphane Viollet (DR)

Co-encadrants PSA : Laetitia Pradere, Stefano Mafrica, Jocelyn Monnoyer

Publications co-signées : 1 workshop (GDR 2088 BIOMIM).

1.6.7 Stagiaires

Année	Stagiaire	Durée	Niveau	Titre	Taux
2020	Motaz Rafii	5 mois	M2 AMU	Conception électronique d'une boussole céleste	50%
2020	Nicolas Thouvenel	6 mois	M2 ROC	Conception du micro-logiciel d'une boussole céleste	100%
2020	Nicolas Serra	3 mois	L2 IUT GTE	Étude d'une boussole céleste	33%
2020	Florentin Kaçar	6 mois	M2 INSA	La vision inspirée des fourmis pour le retour à la base de robot mobile	33%
2020-2021	Youssra Mansar	4 mois	M2 Art	Visibilité de la phénoménalité de l'acteur en jeu	50%
2020	Artur Kambulov	1 mois	L3 EMSE	Développement d'une carte pilotant un petit dirigeable	100%
2019	Marine Laurencich	1 mois	L2 Physique	Construction et développement d'un robot hexapode	50%
2019	Merwan Ben Hamou	1 mois	L2 Physique	Dispositif d'enregistrement vidéo à bord d'un dirigeable	100%
2019	Youssra Mansar	2 mois	M1 Art	Visibilité de la phénoménalité de l'acteur en jeu	50%
2019	Quentin Surcouf	1 mois	L3 ESPM	Conception d'une paire de lunette ergonomique supportant le capteur de localisation Hypercube	100%
2018	Elena Martin	6 mois	M2 SMH	Assistance visuelle par enrichissement du support informationnel lors d'une manoeuvre d'appontage en virtualité augmentée	25%
2018	Constance Blary	2 mois	M1 SupAgro	Le contrôle d'altitude chez l'abeille : les invariants optiques	100%
2018	Morgan Lodé	2 mois	M1 BOPE	Le contrôle d'altitude chez le bourdon : les invariants optiques	100%
2018	Victor Rousteau	1 mois	L3 ESPM	Stratégie de contrôle de l'altitude de vol chez le bourdon : Le bourdon utilise-t-il les mêmes invariants optiques que les pilotes ?	100%
2018	Iliass Souhnoun	1 mois	M1 ESPM	Stratégie de contrôle de l'altitude de vol chez le bourdon : Le bourdon utilise-t-il les mêmes invariants optiques que les pilotes ?	100%

Année	Stagiaire	Durée	Niveau	Titre	Taux
2018	Romain Miot	1 mois	L3 EMSE	Développement d'un algorithme de reconstruction de trajectoire d'insecte	100%
2018	Derrick Irakiza	1 mois	L3 EMSE	Bio-logger pour insecte volant	50%
2017	Hadrien Janicot	1 mois	L3 EMSE	Simulation 3D du pilotage visuo-moteur d'un quadrirotor mimant l'abeille	50%
2017	Mehdi Messaoudi	1 mois	L3 EMSE	Analyse de vol de rapaces : poursuite de Leurre et découplage tête corps	50%
2017	Flora Jean-Grandchamp	1 mois	L3 ESPM	Recherche d'invariants optiques durant le vol des abeilles par dégradation du support visuel informationnel	100%
2017	Mathieu Avizon	1 mois	L3 ESPM	Modélisation d'une boucle visuo- motrice chez le goéland pour contrôler son altitude	100%
2016	Ludivine Lenay	4 mois	M2 BOPE	Guidage visuel en 3D chez l'abeille	50%
2016	Kilian Contamain	6 mois	M2 EMSE	État de l'art et détection de mouvement incohérent : application au véhicule autonome	50%
2016	Anaël Renault	1 mois	M1 IEMH	Simulation 3D du pilotage visuo-moteur d'un quadrirotor mimant l'abeille	100%
2016	Aurélien Valentini	1 mois	L3 ESPM	Identification des paramètres modélisant le vol des oiseaux	100%
2016	Valentin Garcia	1 mois	L3 ESPM	Modélisation de l'altitude de vol des oiseaux par une boucle visuo-motrice basée sur le flux optique	100%
2016	Antoine Leclercq	1 mois	L3 EMSE	Simulation 3D du pilotage visuo-moteur d'un drone mimant l'abeille	100%
2015	Etienne Fortin	1 mois	L3 EMSE	Amélioration de la simulation du robot LORA	100%
2009	Frédéric Roubieu	6 mois	M2 ISEN	Conception d'une carte moteur conférant un comportement indépendant de la batterie à un robot aéroglesseur	33%
2006-2007	Maëlle Ogier	6 mois	M2 INSA	Etude du vol libre de l'abeille (Apis mellifera) dans un corridor non-stationnaire	25%
2006	Antoine Dilly	6 mois	M2 ISEN	Intégration sur FPGA d'une boucle visuo-motrice	33%
2006	David Dray	6 mois	M2 Supélec	Étude et modélisation du vol de l'abeille en environnement non-stationnaire	66%
2005-2006	Guillaume Masson	6 mois	M2 INSA	Étude et modélisation des stratégies d'évitement d'obstacles latéraux chez l'abeille	66%

2 Mes Publications

Sommaire

2.1	Publications	35
2.1.1	Revue indexée Journal Citation Reports (20)	35
2.1.2	Revue internationale (4)	37
2.1.3	Conférences internationales IEEE (13)	38
2.1.4	Conférences internationales (17)	40
2.1.5	Workshops (10)	42
2.1.6	Ouvrages et chapitres (10)	43
2.1.7	Ouvrages de vulgarisation (2)	45
2.1.8	Revue nationale à comité de lecture (7)	45
2.1.9	Conférences nationales (14)	46
2.1.10	Brevets (1)	48
2.2	Conférences invitées (11)	48
2.3	Séminaires (7)	49
2.4	Communiqués de presse	50

« *Publish or Perish.* »

Clarence Marsh Case, Sociologue, 1928

2.1 Publications

2.1.1 Revues indexées Journal Citation Reports (20)

©Thomson Reuters Journal Citation Reports 2018					
Revue	1 ^{ère} édition	Éditeur	F. Impact	Année	Auteur
J. of Insect Physiology	1957	Elsevier	2.224	prép.	Dernier
PLOS One	2006	PLOS	2.740	Révision	3 ^{ème}
International Journal of Aviation Psychology	1991	Taylor & Francis	0.842	2021	3 ^{ème}
Nano Energy	2012	Elsevier	15.548	2019	3 ^{ème}
J. of The Royal Society Interface	2004	Roy. Soc.	3.224	2019	1 ^{er}
Robotics and Autonomous Systems	1988	Elsevier	2.928	2019	Dernier
J. of The Royal Society Interface	2004	Roy. Soc.	3.224	2019	Dernier
Science Robotics	2016	AAAS	19.400	2019	2 nd
Current Opinion in Insect Science	2014	Elsevier	3.784	2018	1 ^{er}
Scientific Reports	2011	NPG	4.011	2017	2 nd
Arthropod Structure & Development	2000	Elsevier	1.843	2017	1 ^{er}
Sensors	2001	MDPI	3.031	2017	Dernier
J. of Bionic Engineering	2004	Springer	2.463	2015	1 ^{er}
Bioinspiration & biomimetics	2006	IOPscience	3.130	2014	2 nd
Physiology - Paris (arrêté en 2017)	1906	Elsevier	0.815	2010	2 nd
Autonomous Robots	1994	Springer	3.634	2008	1 ^{er}
Science of Nature (Naturwissenschaften)	1913	Springer	1.839	2008	1 ^{er}
Current Biology	1991	Elsevier	9.193	2007	2 nd
BMC Neuroscience	2000	Springer	2.620	2007	5 ^{ème}
Int. J. of Advanced Robotic Systems	2004	SAGE	1.223	2006	1 ^{er}

1. Aimie BERGER DAUXÈRE, Gilles MONTAGNE et Julien R SERRES. « A new experimental setup for exploring how honeybees control their altitude ». In : *Journal of Insect Physiology* (2020 (en préparation))
2. Mathieu THOMAS, José PEREIRA FIGUEIRA, Julien R SERRES et al. « Helicopter pilots synchronize their altitude with ship heave to minimize energy when landing on a ship's deck ». In : *International Journal of Aviation Psychology* (2021). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03082645>
3. Antoine H P MORICE, Thomas RAKOTOMAMONJY, Julien R SERRES et al. « Ecological design of augmentation improves helicopter ship landing maneuvers : an approach in augmented virtuality ». In : *PLOS One* (2020 (soumis))
4. Aravind Narain RAVICHANDRAN, Cyril CALMES, Julien R SERRES et al. « Compact and High Performance Wind actuated venturi triboelectric energy harvester ». In : *Nano Energy* 62 (2019), p. 449–457. DOI : [10.1016/j.nanoen.2019.05.053](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.05.053). URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02157346>

5. Julien R SERRES, Thomas J EVANS, Susanne ÅKESSON et al. « Optic flow cues help explain altitude control over sea in freely flying gulls ». In : *Journal of The Royal Society Interface* 16.159 (2019). <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02309725>, p. 20190486. DOI : 10.1098/rsif.2019.0486. URL : <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/569194v1>
6. Julien DUPEYROUX, Stéphane VIOLLET et Julien R SERRES. « An ant-inspired celestial compass applied to autonomous outdoor robot navigation ». In : *Robotics and Autonomous Systems* 117 (2019), p. 40–56. DOI : 10.1016/j.robot.2019.04.007. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02105997>
7. Julien DUPEYROUX, Stéphane VIOLLET et Julien R SERRES. « Polarized skylight-based heading measurements : a bio-inspired approach ». In : *Journal of the Royal Society Interface* 16.150 (2019), p. 20180878. DOI : 10.1098/rsif.2018.0878. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01990800>
8. Julien DUPEYROUX, Julien R SERRES et Stéphane VIOLLET. « AntBot : A six-legged walking robot able to home like desert ants in outdoor environments ». In : *Science Robotics* 4.27 (2019), eaau0307. DOI : 10.1126/scirobotics.aau0307. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02075700/>
9. Julien R SERRES et Stéphane VIOLLET. « Insect-inspired vision for autonomous vehicles ». In : *Current Opinion in Insect Science* 30 (2018), p. 46–51. DOI : 10.1016/j.cois.2018.09.005. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01882712>
10. Geoffrey PORTELLI, Julien R SERRES et Franck RUFFIER. « Altitude control in honeybees : joint vision-based learning and guidance ». In : *Scientific reports* 7.1 (2017), p. 9231. DOI : 10.1038/s41598-017-09112-5. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01644531/>
11. Julien R SERRES et Franck RUFFIER. « Optic flow-based collision-free strategies : From insects to robots ». In : *Arthropod structure & development* 46.5 (2017), p. 703–717. DOI : 10.1016/j.asd.2017.06.003. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01644523/>
12. Erik VANHOUTTE, Stefano MAFRICA, Franck RUFFIER et al. « Time-of-travel methods for measuring optical flow on board a micro flying robot ». In : *Sensors* 17.3 (2017), p. 571. DOI : 10.3390/s17030571. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01551122/>
13. Julien R SERRES et Franck RUFFIER. « Biomimetic autopilot based on minimalist motion vision for navigating along corridors comprising u-shaped

- and s-shaped turns ». In : *Journal of Bionic Engineering* 12.1 (2015), p. 47–60. DOI : [10.1016/S1672-6529\(14\)60099-8](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(14)60099-8). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01108274/>
14. Frédéric L ROUBIEU, Julien R SERRES, Fabien COLONNIER et al. « A bio-mimetic vision-based hovercraft accounts for bees' complex behaviour in various corridors ». In : *Bioinspiration & biomimetics* 9.3 (2014), p. 036003. DOI : [10.1088/1748-3182/9/3/036003](https://doi.org/10.1088/1748-3182/9/3/036003). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01446797/>
 15. Geoffrey PORTELLI, Julien SERRES, Franck RUFFIER et al. « Modelling honey-bee visual guidance in a 3-D environment ». In : *Journal of Physiology-Paris* 104.1-2 (2010), p. 27–39. DOI : [10.1016/j.jphysparis.2009.11.011](https://doi.org/10.1016/j.jphysparis.2009.11.011). URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02010550/>
 16. Julien SERRES, D DRAY, Franck RUFFIER et al. « A vision-based autopilot for a miniature air vehicle : joint speed control and lateral obstacle avoidance ». In : *Autonomous robots* 25.1-2 (2008), p. 103–122. DOI : [10.1007/s10514-007-9069-0](https://doi.org/10.1007/s10514-007-9069-0). URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01758721/>
 17. Julien R SERRES, Guillaume P MASSON, Franck RUFFIER et al. « A bee in the corridor : centering and wall-following ». In : *Naturwissenschaften* 95.12 (2008), p. 1181. DOI : [10.1007/s00114-008-0440-6](https://doi.org/10.1007/s00114-008-0440-6). URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02294572/>
 18. Nicolas FRANCESCHINI, Franck RUFFIER et Julien SERRES. « A bio-inspired flying robot sheds light on insect piloting abilities ». In : *Current Biology* 17.4 (2007), p. 329–335. DOI : [10.1016/j.cub.2006.12.032](https://doi.org/10.1016/j.cub.2006.12.032). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02295687/>
 19. Philippe PINEL, Bertrand THIRION, Sébastien MERIAUX et al. « Fast reproducible identification and large-scale databasing of individual functional cognitive networks ». In : *BMC neuroscience* 8.1 (2007), p. 91. DOI : [10.1186/1471-2202-8-91](https://doi.org/10.1186/1471-2202-8-91). URL : <https://hal.inria.fr/hal-00784462/>
 20. Julien SERRES, Franck RUFFIER, Stephane VIOLLET et al. « Toward optic flow regulation for wall-following and centring behaviours ». In : *International Journal of Advanced Robotic Systems* 3.2 (2006), p. 23. DOI : [10.5772/5744](https://doi.org/10.5772/5744). URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02295717/>

2.1.2 Revues internationales (4)

1. Julien SERRES et Franck RUFFIER. « Optic Flow-Based Robotics ». In : *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering* (2016), p. 1–14. DOI :

- 10.1002/047134608X.W8321. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02294347>
2. Nicolas FRANCESCHINI, Franck RUFFIER et Julien SERRES. « Insect Inspired Autopilots ». In : *Journal of Aero Aqua Bio-mechanisms* 1.1 (2010), p. 2–10. DOI : 10.5226/jabmech.1.2. URL : https://www.jstage.jst.go.jp/article/jabmech/1/1/1_1_2/_pdf/-char/en
 3. Nicolas FRANCESCHINI, Franck RUFFIER et Julien SERRES. « Biomimetic Optic Flow Sensors and Autopilots for MAV Guidance ». In : *Encyclopedia of Aerospace Engineering*. Wiley Online Library, 2010. DOI : 10.1002/9780470686652.eae409. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470686652.eae409>
 4. Nicolas FRANCESCHINI, Stéphane VIOLLET, Franck RUFFIER et al. « Neuro-mimetic robots inspired by insect vision ». In : *Mining Smartness from Nature*. T. 58. Advances in Science and Technology. P. Vincenzini & S. Graziani (Eds.), Trans Tech Publications Ltd, Switzerland. Fév. 2009, p. 127–136. ISBN : 978-3908-158-240. DOI : 10.4028/www.scientific.net/AST.58.127. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01446805>

2.1.3 Conférences internationales IEEE (13)

1. Julien DUPEYROUX, Stéphane VIOLLET et Julien R SERRES. « Bio-inspired celestial compass yields new opportunities for urban localization ». In : *28th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), 2020 IEEE International Conference on*. <https://www.youtube.com/watch?v=4hcwPFfFtA>. IEEE, Saint-Raphaël, France. Sept. 2020, p. 881–886. DOI : 10.1109/MED48518.2020.9183367. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02873353>
2. Julien DUPEYROUX, Sean LAPALUS, Ilya BRODOline et al. « Insect-inspired omnidirectional vision for autonomous localization on-board a hexapod robot ». In : *28th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), 2020 IEEE International Conference on*. <https://www.youtube.com/watch?v=nxTZKQaXIe4>. IEEE, Saint-Raphaël, France. Sept. 2020, p. 893–898. DOI : 10.1109/MED48518.2020.9183091. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02873353>
3. Julien DUPEYROUX, Victor BOUTIN, Julien R SERRES et al. « M2APix : A Bio-Inspired Auto-Adaptive Visual Sensor for Robust Ground Height Estimation ». In : *Circuits and Systems (ISCAS), 2018 IEEE International Symposium on*. IEEE, Florence, Italy. 2018, p. 1–4. DOI : 10.1109/ISCAS.2018.8351433. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01915657>

4. Julien DUPEYROUX, Julien DIPERI, Marc BOYRON, Stéphane VIOLLET et Julien SERRES. « A bio-inspired celestial compass applied to an ant-inspired robot for autonomous navigation ». In : *Mobile Robots (ECMR), 2017 European Conference on*. IEEE, Paris, France. 2017, p. 1–6. DOI : [10.1109/ECMR.2017.8098680](https://doi.org/10.1109/ECMR.2017.8098680). URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01588859/>
5. Erik VANHOUTTE, Franck RUFFIER et Julien SERRES. « A quasi-panoramic bio-inspired eye for flying parallel to walls ». In : *SENSORS, 2017 IEEE*. IEEE, Glasgow, UK. 2017, p. 1–3. DOI : [10.1109/ICSENS.2017.8234110](https://doi.org/10.1109/ICSENS.2017.8234110). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01630170>
6. Julien DUPEYROUX, Julien DIPERI, Marc BOYRON, Stéphane VIOLLET et Julien SERRES. « A novel insect-inspired optical compass sensor for a hexapod walking robot ». In : *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2017 IEEE/RSJ International Conference on*. IEEE, Vancouver, Canada. 2017, p. 3439–3445. DOI : [10.1109/IROS.2017.8206183](https://doi.org/10.1109/IROS.2017.8206183). URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01643172>
7. Julien DUPEYROUX, Julien DIPERI, Marc BOYRON, Stéphane VIOLLET et Julien SERRES. « A bio-inspired celestial compass for a hexapod walking robot in outdoor environment ». In : *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2017)*. IEEE, Vancouver, Canada. 2017. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01643182>
8. Thibaut RAHARIJAONA, Julien SERRES, E VANHOUTTE et al. « Toward an insect-inspired event-based autopilot combining both visual and control events ». In : *Event-based Control, Communication, and Signal Processing (EBCCSP), 2016 2nd International Conference on*. IEEE, Funchal, Portugal. 2017. DOI : [10.1109/EBCCSP.2017.8022822](https://doi.org/10.1109/EBCCSP.2017.8022822). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01528589/>
9. Julien SERRES, T RAHARIJAONA, E VANHOUTTE et al. « Event-based visual guidance inspired by honeybees in a 3D tapered tunnel ». In : *Event-based Control, Communication, and Signal Processing (EBCCSP), 2016 1st International Conference on*. IEEE, Krakow, Poland. 2016, p. 1–4. DOI : [10.1109/EBCCSP.2016.7605273](https://doi.org/10.1109/EBCCSP.2016.7605273). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01332819>
10. Frédéric L ROUBIEU, Julien SERRES, Nicolas FRANCESCHINI et al. « 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, Guangzhou, China. 2012, p. 1311–1318. DOI : [10.1109/ROBIO.2012.6491150](https://doi.org/10.1109/ROBIO.2012.6491150). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00743129v2/>

11. Franck RUFFIER, Toshiharu MUKAI, Hiromichi NAKASHIMA et al. « Combining sound and optic flow cues to reach a sound source despite lateral obstacles ». In : *System Integration, 2008 IEEE/SICE International Symposium on*. IEEE, Nagoya, Japan. 2008, p. 89–94. DOI : [10.1109/SI.2008.4770432](https://doi.org/10.1109/SI.2008.4770432). URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02294544/>
12. Geoffrey PORTELLI, Julien SERRES, Franck RUFFIER et al. « A 3d insect-inspired visual autopilot for corridor-following ». In : *Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2008. BioRob 2008. 2nd IEEE RAS & EMBS International Conference on*. IEEE, Scottsdale, AZ, USA. 2008, p. 19–26. DOI : [10.1109/BIOROB.2008.4762816](https://doi.org/10.1109/BIOROB.2008.4762816). URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02294590/>
13. Julien SERRES, Franck RUFFIER et Nicolas FRANCESCHINI. « Two optic flow regulators for speed control and obstacle avoidance ». In : *Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2006. BioRob 2006. The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on*. paper n°284. IEEE, Pisa, Italy. 2006, p. 750–757. DOI : [10.1109/BIOROB.2006.1639180](https://doi.org/10.1109/BIOROB.2006.1639180). URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02295748/>

2.1.4 Conférences internationales (17)

1. Julien R SERRES, Antoine HP MORICE, Constance BLARY et al. « Honeybees flying over a mirror crash irretrievably ». In : *4th International Conference on Invertebrate Vision (ICIV), Bäckaskog, Sweden*. poster number 43. 2019, p. 260. URL : <https://www.youtube.com/watch?v=KH9z8eq0BbU>
2. Julien DUPEYROUX, Julien SERRES et Stéphane VIOLLET. « AntBot : a Fully Insect-Inspired Hexapod Homing like Desert Ants ». In : *4th International Conference on Invertebrate Vision (ICIV), Bäckaskog, Sweden*. poster number 68. 2019, p. 310. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02272156/>
3. Julien DUPEYROUX, Julien SERRES et Stéphane VIOLLET. « A Hexapod Walking Robot Mimicking Navigation Strategies of Desert Ants Cataglyphis ». In : *Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems, Paris, France*. Springer. 2018, p. 145–156. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02075674/>
4. Julien DUPEYROUX, Grégoire PASSAULT, Franck RUFFIER et al. « Hexabot : a small 3D-printed six-legged walking robot designed for desert ant-like navigation tasks ». In : *IFAC World Congress 2017, Toulouse, France*. 2017. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01643176/>

5. Julien SERRES, Thomas J EVANS, Susanne ÅKESSON et al. « Optic flow and energy invariants combined explain gulls' altitude profiles during offshore takeoff ». In : *The 6th International Bio-logging Science Symposium (BLS6)*. Lake Constance, Germany, sept. 2017. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02078084>
6. Erik VANHOUTTE, Franck RUFFIER et Julien SERRES. « A honeybee's navigational toolkit on Board a Bio-inspired Micro Flying Robot ». In : *The 9th International Micro Air Vehicle Conference and Competition (IMAV)*. 2017, p. 136–142. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01593819/>
7. Julien SERRES, Franck RUFFIER et Nicolas FRANCESCHINI. « A bio-inspired robot accounts for insect behavior ». In : *16th European Conference on Eye Movement (ECEM), Marseille, France*. 2011. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02194432/>
8. Nicolas FRANCESCHINI, Stéphane VIOLET, Franck RUFFIER et al. « Neuro-mimetic Robots inspired by Insect Vision ». In : *Proceedings of the 3rd International Conference "Smart, Materials, Structures and Systems" (CIMTEC), Acireale, Sicily, Italy*. E-4.2 : IL03. Juin 2008. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02296278/>
9. Nicolas FRANCESCHINI, Franck RUFFIER et Julien SERRES. « From insects to robots and back ». In : *Proceedings of the 2nd International Conference on Invertebrate Vision (ICIV), Bäckaskog, Sweden*. 2008. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02195476v1/>
10. Julien SERRES, Franck RUFFIER, Guillaume P MASSON et al. « A bee in the corridor : centering and wall-following ». In : *Proceedings of the 2nd International Conference on Invertebrate Vision (ICIV), Bäckaskog, Sweden*. 2008. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02195483/>
11. Nicolas FRANCESCHINI, Franck RUFFIER et Julien SERRES. « Optic flow based autopilot : From insects to rotorcraft and back ». In : *Comparative Biochemistry and Physiology, Part A. Abstracts of the Annual Main Meetings of the Society for Experimental Biology, Glasgow, Scotland*. T. 146. 4. 2007, S133. DOI : 10.1016/j.cbpa.2007.01.255. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02295426/>
12. Franck RUFFIER, Julien SERRES, Guillaume P MASSON et al. « A bee in the corridor : regulating the optic flow on one side ». In : *Proceedings of the 7th meeting of the German neuroscience society—31st Göttingen neurobiology conference*. T14-7B. 2007. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02295700/>

13. Julien SERRES, Franck RUFFIER, Guillaume P MASSON et al. « A bee in the corridor : centring or wall-following ? » In : *Proceedings of the 7th meeting of the German neuroscience society—31st Göttingen neurobiology conference*. T14-8B. 2007. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01445551/>
14. Geoffrey PORTELLI, Maëlle OGIER, Julien SERRES et al. « A bee in the corridor : side-slip control autopilot ». In : *Proceedings of the International Symposium on Flying Insects and Robots (FIR), Ascona, Switzerland*. 2007, p. 91–92. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02195537/>
15. Nicolas FRANCESCHINI, Franck RUFFIER et Julien SERRES. « Insects as pilots : optic flow regulation for vertical and horizontal guidance ». In : *Proceedings of the International Symposium on Flying Insects and Robots (FIR), Ascona, Switzerland*. 2007, p. 37–38. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02195516/>
16. Franck RUFFIER, Julien SERRES et Nicolas FRANCESCHINI. « Automatic landing and take-off at constant slope without terrestrial aids ». In : *Proceedings of 31st European Rotorcraft Forum (ERF 2005), Florence, Italy*. T. 71. 92. 2005, p. 92.1–92.8. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02295758/>
17. Julien SERRES, Franck RUFFIER et Nicolas FRANCESCHINI. « Biomimetic visual navigation in a corridor : to centre or not to centre ? » In : *Proceedings of International Mediterranean Modeling Multiconference (I3M 2005), Marseille, France*. 2005, p. 91–97. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02295829/>

2.1.5 Workshops (10)

1. Julien R. SERRES, Julien DUPEYROUX et Stéphane VIOLLET. « Peut-on naviguer sans GPS ni réseau 5G ? Oui, je suis un robot fourmi ». In : *Webinaire de la Journée Bioinspiration & Services Fondés sur la Nature, Montpellier, France*. note : <https://www.youtube.com/watch?v=6dv7RRqUC9U>. Nov. 2020. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-03042189/>
2. Ilya BRODOLINE, Stéphane VIOLLET et Julien R. SERRES. « Full 3D printed hexapod robots with energy efficient joints ». In : *Workshop GDR 2088 BIO-MIM 1st Annual Meeting, Nice, France*. Oct. 2020, p. 33
3. David DUCHÉ, Marcel PASQUINELLI, Judikaël LE ROUZO et al. « A bio-inspired optical compass for robotic applications ». In : *Workshop GDR 2088 BIO-MIM 1st Annual Meeting, Nice, France*. Oct. 2020, p. 34. URL : https://www.youtube.com/watch?v=f_N2Q6DIxw4

4. Léo POUGHON, Jocelyn MONNOYER, Stefano MAFRICA et al. « Bio-inspired use of skylight polarization to measure heading for automotive industry ». In : *Workshop GDR 2088 BIOMIM 1st Annual Meeting, Nice, France*. Oct. 2020, p. 87
5. Franck RUFFIER, Geoffrey PORTELLI, Julien SERRES et al. « From bees' surface following to Lunar landing ». In : *International Workshop on Bio-Inspired Robots, Nantes, France*. 2011. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02194478/>
6. Frédéric L ROUBIEU, Julien SERRES, Stéphane VIOLLET et al. « Toward a fully autonomous hovercraft visually guided thanks to its own bio-inspired motion sensors ». In : *International Workshop on Bio-Inspired Robots, Nantes, France*. 2011. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00743520/>
7. Franck RUFFIER, Julien SERRES et Nicolas FRANCESCHINI. « Pilotes automatiques biomimétiques : boucles de rétroaction directes sur le flux optique ». In : *Workshop inter GdR MACS et Robotique du GT UAV, ENSAM, Paris, France*. Mar. 2009. URL : https://gt-uav.hds.utc.fr/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?media=fr:reunion26mars2009:gtuav_ruffier2.pdf
8. Franck RUFFIER, Julien SERRES et Nicolas FRANCESCHINI. « Pilotes automatiques biomimétiques : boucles de rétroaction directe sur le flux optique ». In : *Journées ONERA/DGA MSI "Matériaux et Structures Intelligentes", Châtillon, France*. Mar. 2009. URL : https://gt-uav.hds.utc.fr/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?media=fr:reunion26mars2009:gtuav_ruffier2.pdf
9. Franck RUFFIER, Julien SERRES et Nicolas FRANCESCHINI. « Pilotes automatiques biomimétiques : boucles de rétroaction directes sur le flux optique ». In : *Workshop Drone LSIS/ISM, avec le concours du Pôle de compétitivité PEGASE, de l'ONERA et de l'École des Officiers de l'Armée de l'Air, Salon-de-Provence, France*. Mai 2009. URL : https://gt-uav.hds.utc.fr/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?media=fr:reunion26mars2009:gtuav_ruffier2.pdf
10. Julien SERRES, David DRAY, Franck RUFFIER et al. « A bio-inspired optic flow based autopilot for guiding a miniature hovercraft in corridors ». In : *IEEE-IROS Workshop on Visual Guidance Systems for Small Autonomous Aerial, Nice, France*. Sept. 2008. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02294457/>

2.1.6 Ouvrages et chapitres (10)

1. Julien DUPEYROUX, Stéphane VIOLLET et Julien R SERRES. *AntBot : un robot qui s'oriente comme une fourmi - Applications à la navigation à vue sans GPS ni magnétomètre*. note : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/>

- [hal-02500157v1](#). Editions TI | Techniques de l'Ingénieur, 2020, Ref. IN236.
URL : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/innovation-th10/conception-durable-inspiree-du-vivant-le-biomimetisme-42616210/antbot-un-robot-qui-s-oriente-comme-une-fourmi-in236/>
2. Julien R SERRES. « Taking Inspiration from Flying Insects to Navigate inside Buildings ». In : *Interdisciplinary Expansions in Engineering and Design With the Power of Biomimicry*. Sous la dir. de Gulden KOKTURK et Tutku Didem Akyol ALTUN. InTech, Vienna, 2018. Chap. 3, p. 31–55. ISBN : 978-953-513-9355. DOI : [10.5772/intechopen.72918](#). URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01758731>
 3. Julien SERRES, Stéphane VIOLLET et Franck RUFFIER. *Microdrones bio-inspirés - Doter nos futurs robots aériens de l'agilité des insectes*. Editions TI | Techniques de l'Ingénieur, 2017, S7717 V1. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01574508>
 4. Thibaut RAHARIJAONA, Lubin KERHUEL, Julien SERRES et al. « Insect inspired visual motion sensing and flying robots ». In : *Handbook of Biomimetics and Bioinspiration : 2 Electromechanical Systems*. World Scientific, 2014, p. 565–611. ISBN : 978-981-435-4950. DOI : [10.1142/9789814354936_0022](#). URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02294399>
 5. Nicolas FRANCESCHINI, Franck RUFFIER et Julien SERRES. « Aerial navigation and optic flow sensing. A biorobotic approach ». In : *Motor Control*. F. Danion & M. L. Latash (Eds.). Oxford University Press, 2010. Chap. 19, p. 451–447. ISBN : 978-019-539-5273
 6. Julien SERRES. *De l'abeille au robot : la régulation du flux optique. Contrôle conjoint de vitesse et d'évitements d'obstacles latéraux pour véhicules totalement actionnés*. Éditions Universitaires Européennes EUE, 2010. ISBN : 978-613-1543-050. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00645272/>
 7. Nicolas FRANCESCHINI, Franck RUFFIER, Julien SERRES et Stéphane VIOLLET. « Optic flow based visual guidance : from flying insects to miniature aerial vehicles ». In : *Aerial vehicles*. note : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-03042183/>. InTech, Vienna, 2009. Chap. 35, p. 747–770. ISBN : 978-953-7619-411. DOI : [10.5772/6491](#). URL : https://www.intechopen.com/books/aerial_vehicles/optic_flow_based_visual_guidance__from_flying_insects_to_miniature_aerial_vehicles
 8. Fabrice AUBÉPART, Julien SERRES, Antoine DILLY et al. « Field Programmable Gate Array (FPGA) for Bio-inspired visuo-motor control systems applied to Micro-Air Vehicles ». In : *Aerial Vehicles*. note : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02294399>

- archives-ouvertes.fr/hal-03042173/. InTech, Vienna, 2009. Chap. 3, p. 29–54. ISBN : 978-953-7619-411. DOI : [10.5772/6466](https://doi.org/10.5772/6466). URL : https://www.intechopen.com/books/aerial_vehicles/field_programmable_gate_array_fpga_for_bio-inspired_visuo-motor_control_systems_applied_to_micro-a
9. Nicolas FRANCESCHINI, Viollet STÉPHANE, Franck RUFFIER et al. « The insect compound eye : from micro-optics and neuronics to biorobotics ». In : *Nano-materials and Insect Biomimetics*. Masatsugu Shimomura, Tateo Shimozawa (Ed.). Tokyo : NTS, 2008, p. 1–18. ISBN : 978-486-043-1983
 10. Julien SERRES. « De l'abeille au robot : la régulation du flux optique. Contrôle conjoint de vitesse et d'évitement d'obstacles latéraux pour véhicules totalement actionnés. » Thèse de doct. Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc, juil. 2008. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00645272/>

2.1.7 Ouvrages de vulgarisation (2)

1. Catherine JESSUS. « Étonnant vivant. Découvertes et promesses du XXI^e siècle ». In : CNRS Éditions, 2017 (Contributeur). ISBN : 978-227-109-4032
2. Nicolas FRANCESCHINI, Franck RUFFIER et Julien SERRES. « Y a-t-il un pilote dans l'insecte ? » In : *Voir l'invisible*. Jean-Pierre Gex (Ed.), Omniscience, collection Ecrin, Paris, 2007, p. 216–217. ISBN : 978-291-609-7138

2.1.8 Revues nationales à comité de lecture (7)

1. Julien SERRES et Frank BULOUP. « Mesurer une distance au moyen d'un accéléromètre - Une approche interdisciplinaire entre sciences physiques et sciences du sport ». In : *Le BUP physique-chimie*. 94. ALLIANCE PARTENAIRES GRAPHIQUES, ISSN : 2491-830X, 2021, 12 pages. URL : <http://bupdoc.udppc.asso.fr/index.php>
2. Stéphane VIOLLET, Julien DUPEYROUX et Julien SERRES. « Le robot fourmi AntBot. Conception et réalisation d'un robot bio-inspiré ». In : *Techniques & Culture. Revue semestrielle d'anthropologie des techniques* 73 (2020). numéro spécial : "Biomimétisme(s). Imitation du vivant et modélisation de la vie", p. 128–141. DOI : [10.4000/tc.13557](https://doi.org/10.4000/tc.13557). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02892659/>
3. Julien SERRES. « Comment organiser une formation MatlabTM/Simulink ». In : *La Revue 3EI*. 94. SEE, ISSN : 1252-770X, 2019, p. 38–45. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02423389>

4. Patrick DUBOIS et Julien SERRES. « Décodage de télégrammes KNX ». In : *La Revue 3EI*. 78. SEE, ISSN : 1252-770X, 2014, p. 44–50. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01848912/>
5. Julien SERRES et Patrick DUBOIS. « Installation solaire photovoltaïque autonome utilisant des cellules en couches minces CIS ». In : *La Revue 3EI*. 72. SEE, ISSN : 1252-770X, 2013, p. 65–70. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01848791>
6. Julien SERRES, Patrick DUBOIS, Christophe JAUNAY et al. « Réseau électrique haute qualité ». In : *La Revue 3EI*. 58. SEE, ISSN : 1252-770X, 2009, p. 20–26. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01848939/>
7. Julien SERRES, Stéphane VIOLLET, Lubin KERHUEL et al. « Régulation de vitesse d'un micromoteur à courant continu sans capteur au moyen d'un microcontrôleur dsPIC programmé par une passerelle Matlab™/Simulink ». In : *La Revue 3EI*. 56. SEE, ISSN : 1252-770X, 2009, p. 66–74. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01848804/>

2.1.9 Conférences nationales (14)

1. Ilya BRODOLINE, Stéphane VIOLLET et Julien R SERRES. « A full 3D printed hexapod robots with energy efficient joints ». In : *Webinaire aux Journées des Jeunes Chercheurs en Robotique (JJCR)*. Nov. 2020. URL : <https://jjcr-2020.sciencesconf.org/>
2. Thomas MATHIEU, José PEREIRA FIGUEIRA, Julien R SERRES et al. « On the functional nature of perceptual-motor coupling during ship deck landing maneuvers ». In : *Journées Françaises d'Informatique Graphique et de Réalité Virtuelle (JF.IG.RV)*, Marseille, France. Nov. 2019. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03039183>
3. Aimie BERGER DAUXÈRE, Gilles MONTAGNE et Julien R SERRES. « A new experimental design to uncorrelate visual cues in honeybees'altitude control ». In : *Poster au 19^{ème} Colloque de Biologie de l'Insecte (CBI)*, Albi, France. Juin 2019
4. Aimie BERGER DAUXÈRE, Gilles MONTAGNE et Julien R SERRES. « Uncorrelated optic flow's invariants controlling altitude in honeybees : a new experimental setup ». In : *Poster au 30^{ème} congrès de l'Union Internationale pour l'Étude des Insectes Sociaux (UIEIS-SF)*, Avignon, France. Août 2019
5. Ilya BRODOLINE, Stéphane VIOLLET et Julien R SERRES. « An energy efficient 3D printed leg for bioinspired hexapod robots ». In : *Poster aux Journées des Jeunes Chercheurs en Robotique (JJCR)*, Vittel, France. Oct. 2019

6. Julien DUPEYROUX, Stéphane VIOLLET et Julien R SERRES. « Providing an autonomous hexapod walking robot with the ability to reorientate : application of a novel ant-inspired celestial compass ». In : *Poster aux Journées des Jeunes Chercheurs en Robotique (JJCR)*. Biarritz, France, nov. 2017. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01643195>
7. Julien DUPEYROUX, Julien DIPERI, Marc BOYRON, Stéphane VIOLLET et Julien R SERRES. « A bio-inspired celestial compass for a hexapod walking robot in outdoor environment ». In : *13^{ème} Journée de l'École Doctorale des Sciences du Mouvement Humain (JEDSMH)*. Montpellier, France, juin 2017. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01643182>
8. Geoffrey PORTELLI, Julien SERRES, Franck RUFFIER et al. « Pilote automatique bio-inspiré pour la navigation en 3D ». In : *Actes des Journée des Jeunes Chercheurs en Robotique (JJCR)*, Neuilly-sur-Barangeon, France. Nov. 2009. URL : http://jnrr09.lms.sp2mi.univ-poitiers.fr/IMG/pdf/portelli_jnrr09.pdf
9. Franck RUFFIER, Julien SERRES, Geoffrey PORTELLI et al. « Boucles visuo-motrices biomimétiques pour le pilotage automatique de micro-aéronefs ». In : *Actes des 7^{ème} Journées Nationales de la Recherche en Robotique (JNRR)*, Neuilly-sur-Barangeon, France. Nov. 2009, p. 55–67. URL : http://jnrr09.lms.sp2mi.univ-poitiers.fr/IMG/pdf/JNRR_RuffierEtAl.pdf
10. Geoffrey PORTELLI, Julien SERRES, Franck RUFFIER et al. « Un pilote automatique inspiré des insectes pour la navigation 3D dans un tunnel ». In : *Actes de la 4^{ème} Journée de l'Ecole Doctorale Sciences du Mouvement Humain (JEDSMH)*, Avignon, France. Mai 2008. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02298370/>
11. Geoffrey PORTELLI, Julien SERRES, Franck RUFFIER et al. « 3D Navigation With An Insect-Inspired Autopilot ». In : *Actes de la 2^{ème} conférence française de Neurosciences Computationnelles (NEUROCOMP)*, Marseille, France. Oct. 2008. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00331566/>
12. Julien SERRES, David DRAY, Franck RUFFIER et al. « Pilote automatique bio-inspiré basé sur la vision du mouvement. » In : *Actes des 6^{ème} Manifestation des Jeunes Chercheurs en STIC*, Marseille, France. Oct. 2008. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02298360/>
13. Julien SERRES, Franck RUFFIER et Nicolas FRANCESCHINI. « Guidage visuel d'un aéroglisseur miniature dans un corridor ». In : *Actes des 6^{ème} Journées Nationales de la Recherche en Robotique (JNRR)*, Obernai, France. Oct. 2007. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02298992/>

14. Julien SERRES, Franck RUFFIER et Nicolas FRANCESCHINI. « Réguler le flux optique latéral pour naviguer dans un corridor ». In : *Actes des 5^{ème} Journées Nationales de la Recherche en Robotique (JNRR)*, Guidel, France. <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02298950/>. Oct. 2005, p. 289–290.
URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02298941/>

2.1.10 Brevets (1)

1. Jocelyn MONNOYER, Julien DUPEYROUX, Stéphane VIOLLET et al. « Dispositif de détection d'un cap d'un véhicule par détection de photons polarisés linéairement ». Patent FR3086088A1 (FR). Mar. 2020. URL : <https://bases-brevets.inpi.fr/en/document-en/FR3086088.html?s=1585818714604&p=5&cHash=8d710a249279c7513ccc66a4066363f0>

2.2 Conférences invitées (11)

- Julien Serres (reportée en 2021)
AntBot : an ant-inspired robot that navigates autonomously without GPS.
Keynote lecture at the CapoCaccia Workshops toward Neuromorphic Intelligence, (Alghero, Italy, April 27 - May 10)
- Nicolas Franceschini, Franck Ruffier, and Julien Serres (2011)
Insect-inspired optic flow sensors and autopilots.
Keynote lecture at the International Workshop on Bio-inspired Robot, (Nantes, France, April 6-8)
- Nicolas Franceschini, Franck Ruffier, and Julien Serres (2011)
Des robots neuromimétiques pour mieux comprendre.
Colloque "NeuroStic" (à l'invitation du Dr M. Paindavoine, Univ. de Dijon) (UPMC, Paris, France, Jan. 31 - Feb 1st)
- Nicolas Franceschini, Franck Ruffier, and Julien Serres (2010)
From insects to robots and back again.
Keynote lecture at the ESF Conf. Functional Neurobiology in Minibrains : From Flies to Robots and Back Again, (Sant Feliu de Guixols, Spain, Oct. 17-22)
- Nicolas Franceschini, Franck Ruffier, and Julien Serres (2010)
Optic Flow Sensors and optic flow based piloting.
International SAB Workshop : « Smarter Sensors, Easier Processing » (à l'invitation du Prof. H. Perremans, Univ of Antwerpen, Belgium) (UPMC, Paris, France, August 24)
- Geoffrey Portelli, Julien Serres, Franck Ruffier, and Nicolas Franceschini (2009). Flying in 3D with an insect-inspired visual autopilot. Poster presen-

tation in "Visual processing in insects : from anatomy to behavior II", Janelia Farm Research Campus, HHMI
(Washington DC, USA, May 17-20)

<https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02301416>

- Nicolas Franceschini, Franck Ruffier, Julien Serres, and Fabrice Aubépart (2009). Bioinspired optic flow sensors and optic flow based autopilots. Keynote lecture at the USA-China Workshop on bio-inspired smart systems : materials, mechanics, control and sensor innovation, (Dalian, China, July 20-22)
- Nicolas Franceschini, Franck Ruffier, and Julien Serres (2009) Controlling navigation by optic flow sensors : the fly automatic pilot. Keynote lecture at the Progress in Motor Control VII (The International Society of Motor Control), (Marseille, France, July 23-25)
- Nicolas Franceschini, Franck Ruffier, and Julien Serres (2009) Bio-inspired optic flow based autopilots. Keynote lecture at the International Symposium on Aero-aqua Bio-Mechanisms (ISABMEC), (Shanghai, China, August 29 - Sept. 2)
- Geoffrey Portelli, Julien Serres, Franck Ruffier, and Nicolas Franceschini (2009). Piloting with an insect-based visual autopilot. RTP Bionique meeting 2009, Entitled "Moving in fluids for animals and robots : physics, (bio)mechanics, control and perception" (ESPCI et UPMC, Paris, France, Nov. 12-13)
- Franck Ruffier, Nicolas Franceschini, Julien Serres (2007) Vision based autopilot in flies. Keynote lecture at Visual Processing in Insects : From Anatomy to Behavior. Janelia Farm Research Campus, HHMI
(Washington DC, USA, April 29 - May 2)
<https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02301434>

2.3 Séminaires (7)

- 16 décembre 2020 – Webinaire à l'invitation de Dr. Dmitry Kolomenskiy et Dr. Thomas Engels, [Interdisciplinary Seminar Series on Biolocomotion](#). Titre : "Navigation possibilities without GPS or 5G : the AntBot solution", <https://www.youtube.com/watch?v=4fBSoz2kygI>, <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-03077863/>.
- 10 juin 2020 – Webinaire à l'invitation d'IBM France. Titre : "Robotique Bio-Inspirée et Entreprise, quels sont les liens", <https://www.youtube.com/watch?v=OSUs-ViUKr0>.

- 12 avril 2018 – Ecole Supérieure d'Art d'Aix-en-Provence (ESAAix) à l'invitation de Douglas Edric Stanley. Séminaire "Arts et temps réel". Titre : "Arts et captation dronique bio-inspirée".
- 24 nov. 2017 – Journée du GT8 (Neurosciences - Robotique) du GDR Robotique à l'IMéRA à Marseille. Séminaire à l'invitation Dr. Franck Ruffier et Dr. Stéphane Viollet. Titre : "A micro quadrotor mimicking the honeybee's motion perception".
- 14 dec. 2016 – Centre de Recherche sur la Cognition Animale (CRCA – CBI Toulouse - Axe Neuro) à l'invitation de Dr. Richard Bron et Dr. Cédric Florian. Titre : "Guidage visuel par flux optique : de l'abeille au robot".
- 21 juin 2016 – Institut d'écologie et des sciences de l'environnement de Paris UMR1392 (iEES-Paris) à Versailles. Séminaire à invitation de Dr. Philippe Lucas et Dr. Matthieu Dacher. Titre : "Guidage visuel basé sur des événements inspiré de l'abeille dans un tunnel fuselé 3D".
- 20 avril 2015 – Institut Matériaux Microélectronique Nanosciences de Provence UMR7334 (IM2NP) à Marseille. Séminaire à l'invitation de Prof. Marc Bendahan. Titre : "Navigation bio-inspirée multi-sensorielle".

2.4 Communiqués de presse

- Travaux publiés le 23 août 2017 dans la revue *Scientific Reports*.
[Comment les abeilles apprennent du sol au plafond !](#) (CNRS-INSB)
[Techno-Science](#)
[twitter.com](#)
- Travaux publiés le 13 février 2019 dans la revue *Science Robotics*.
[Le premier robot à pattes qui se déplace sans GPS.](#) (CNRS)
+18 820 vues sur YouTube
[Ce robot a vraiment le sens de l'orientation.](#)(CNRS Le Journal)
[AntBot : le robot fourmi.](#) (Reportage CNRS)
[AntBot.](#) (CNRS in English)
[twitter.com](#)
[This ant-inspired robot can navigate better than civilian GPS.](#) Science.
[AntBot makes its own way home.](#) Nature Electronics.
[A 6-legged robot stares at the sky to navigate like a desert ant.](#) Wired.
[Ant-inspired walking robot navigates without GPS by using polarized light.](#) Digital Trends.
[Robot mimics desert ants to find its way home without GPS.](#) New Scientist.
[Robot weet de weg zonder gps dankzij woestijnmier.](#) de Volkskrant.
[AntBot, un robot autonome inspiré par des fourmis du désert.](#) Le Monde.
+ 29 940 vues sur YouTube
[Un robot à pattes qui a le sens de l'orientation.](#) Challenges.

[Un capteur peu coûteux pour naviguer sans GPS.](#) Les Echos.
[C'est une innovation marquante: ce robot-fourmi s'oriente sans GPS.](#) France Inter.
[Marseille : le robot inspiré de la fourmi du désert.](#) La Provence.
[Un robot qui se déplace sans GPS conçu à Marseille.](#) La Marseillaise.
[Voici Antbot, un robot inspiré des fourmis et qui se déplace sans GPS.](#) Futura Sciences.
[Ce robot réussit à s'orienter grâce à la lumière du soleil.](#) Science et Vie.
[AntBot : le tout premier robot évoluant sans GPS pour se repérer.](#) Trust My Science.
[Ce petit robot qui navigue sans GPS comme une fourmi.](#) The Conversation.
[Un robot à pattes sans GPS.](#) Le Blob.
[AntBot is able to go home like desert ants.](#) The Science Breaker,
 DOI: 10.25250/thescbr.brk252, August 29th, 2019.
[AntBot : un robot fourmi autonome qui navigue sans GPS.](#) LA LETTRE Grand Luminy Technopôle, no. 100, p. 12, Mai 2019.
[AntBot, le robot fourmi qui ne perd pas le nord !](#) La Lettre d'AMU, no. 72, p. 32-33, Mai 2019.
[AntBot, un robot fourmi qui navigue sans GPS.](#) Revue TELECOM, no. 193, p. 53-55, Juin 2019.
 M6. Journal télévisé 12.45 du 19 Février 2019.
 France24. Émission Tech 24 du 22 Février 2019.
 Supernature. Documentaire audiovisuel [Canal+](#) le 3 mars 2019. Réalisateur : Frédéric Planchenault.
 France2. Émission Télématin du 30 Avril 2019.
 France24. [AntBot, un robot qui ne se perd jamais.](#) Salon Viva Technology du 17 mai 2019. 2 060 vues sur YouTube.
[AntBot: le premier robot à pattes qui se déplace sans GPS.](#) univrobot.com le 23 décembre 2019.
[twitter.com](#)

Aujourd'hui avec la requête « AntBot+CNRS » sur Google, référencement du robot AntBot sur plus de 4560 sites Internet.

Travail de recherche sélectionné parmi la quinzaine de découvertes et avancées majeures en Provence qui ont été mises en avant dans le cadre d'une [exposition itinérante fêtant les 80 ans du CNRS](#) (affiche : [AntBot, un robot bioinspiré qui se localise grâce à la voûte céleste](#)), et qui a été diffusé sur des sites culturels, universitaires, les collectivités locales, dont la mairie des 9^{ème}/10^{ème} arrondissements de Marseille et le Conseil régional Région Sud.

De Juillet à Août 2019, AntBot a participé à l'exposition Léonard de Vinci « s'inspirer du vivant, le biomimétisme de Léonard à nos jours » dans le cadre des 500 ans de La Renaissance au Musée de Sologne, Mairie de Romorantin-Lanthenay, 41200 Romorantin-Lanthenay.

AntBot a été présenté à la [Biomin'Expo](#) à Paris le 22 octobre 2019.

[Biomim'BOOK 2019, pages 64-65](#)

[YouTube](#)

[YouTube](#)

AntBot a été distingué aux [Assises de L'Embarqué](#) à Paris, au Ministère de l'Économie et des Finances, le 19 novembre 2019. Trophée de l'Embarqué IoT Industrie & Services.

[12ème édition des Assises de l'Embarqué, diapo 62](#)

[vipress.net](#)

[YouTube : Pitch de Julien Serres. Antbot, un robot intelligent, inspiré de la nature ! \(19 novembre 2019\)](#)

[YouTube : Intérêt industriel d'AntBot, voici l'avis d'un expert ! \(19 novembre 2019\)](#)

AntBot a été présenté au Secrétaire Général Pour l'Investissement (SGPI), Guillaume Boudy et Monsieur le Préfet, Nicolas Desforges, le 10 décembre 2019 à la [Cité de l'Innovation et des Savoirs d'Aix-Marseille \(CISAM\)](#).

[twitter.com](#) / [twitter.com](#)

BFMTV. Émission [C'est votre planète](#) sur le biomimétisme du vendredi 28 février 2020, réalisé par François Pitrel (Journaliste BFMTV).

[Engineering biomimetics: lessons from nature](#), Geographical magazine, Brentford, UK, page 23, April 2020, by Katie Burton.

[1^{er} prix du 7^{ème} International Bionic Award 2020](#) de VDI et la FondationSchauenburg, le 25 août 2020.

[AntBot Nominé au 5^{ème} Prix Départemental de la Recherche en Provence dans la catégorie Prix Spécial](#). LA LETTRE Grand Luminy Technopôle, no 104, p. 8, Novembre 2020.

[La thèse de Julien Dupeyroux fait partie des 16 lauréats du Prix de Thèse 2020 d'Aix Marseille Université](#), le 15 décembre 2020.

- Travaux publiés le 16 avril 2019 dans la revue *Robotics and Autonomous Systems*. [Desert ants are helping robots get their bearings](#), News by Karen Emslie, le 14 octobre 2019.
 - Travaux publiés le 9 octobre 2019 dans la revue *Royal Society Interface*. [Y a t-il un pilote dans l'oiseau ? / Is there a pilot in the bird?](#) (CNRS-INSB) [twitter.com](#) (INSB-CNRS) / [twitter.com](#) (Royal Society Publishing)
- [Techno-Science](#)



Depuis 80 ans, nos connaissances
bâtissent de nouveaux mondes

AntBot, un robot bio-inspiré qui se localise grâce à la voûte céleste

AntBot est un robot hexapode autonome, inspiré de la fourmi du désert *Cataglyphis*, développé à l'Institut des sciences du mouvement - Etienne-Jules Marey (Aix-Marseille Université/CNRS). Ce robot est équipé de capteurs bio-inspirés et doté d'un mécanisme de navigation semblable à celui des fourmis du désert lorsqu'elles cherchent à retourner à leur nid après avoir trouvé de la nourriture. Cette technologie de localisation innovante est la première du genre. Elle permet à ce petit robot de se géolocaliser sans utiliser la technologie GPS traditionnelle, qu'elle pourrait à terme remplacer !



L'un de ces capteurs bio-inspirés est un compas céleste composé de seulement deux pixels sensibles à la lumière ultraviolette, surmontés de filtres polarisants rotatifs. Ce compas permet, après un balayage de la voûte céleste, de déterminer l'angle de polarisation de la lumière du ciel au zénith. Cet angle fournit alors une information de cap cruciale pour la localisation du robot. AntBot est également équipé d'un capteur de flux optique fournissant des données fiables d'odométrie (technique permettant d'estimer la position d'un véhicule en mouvement).

Enfin, ce petit robot est en mesure de compter le nombre de foulées exécutées lorsqu'il marche afin de s'orienter et de mesurer la distance qu'il parcourt. En fusionnant toutes ces informations, il est capable de retourner à sa base avec une précision centimétrique, tout comme le font les fourmis du désert !

Pour voir le robot en action :



3 Synthèse de mes activités de recherche

Sommaire

3.1	Mes thématiques de recherche : grands axes et apports transdisciplinaires . .	54
3.2	Du photon à la vision	56
3.2.1	Propriétés physiques du rayonnement solaire reçu au sol	56
3.2.2	Pourquoi les insectes perçoivent-ils les ultraviolets et non l'infrarouge ?	58
3.2.3	Propriétés physiques du rayonnement sous-marin	59
3.2.4	Voir le monde à travers des filtres polarisants	61
3.2.5	Voir le monde au moyen du flux optique	65
3.2.6	Définition et formalisation mathématique du flux optique	67
3.3	Se guider dans un tunnel sur la base du flux optique	68
3.4	Naviguer en extérieur en étant totalement référencée vision	72
3.4.1	Des enjeux qui dépassent le cadre de la biomimétique	73
3.4.2	Les techniques traditionnelles de localisation	73
3.4.3	La bio-inspiration : un autre moyen de se localiser	74
3.4.4	AntBot : un robot fourmi complètement autonome	75
3.5	Expliquer le contrôle d'altitude chez les abeilles	78
3.5.1	Objectif : décorréler le support informationnel visuel chez l'abeille .	78
3.5.2	Les abeilles, qui survolent un miroir, s'écrasent irrémédiablement .	79
3.6	Expliquer le contrôle d'altitude chez les oiseaux	81
3.7	Concevoir une assistance visuelle au pilotage	84

3.1 Mes thématiques de recherche : grands axes et apports transdisciplinaires

Mes travaux de recherche se situent en Biorobotique, discipline à l'interface entre les Sciences du Vivant et la Robotique. Mes thèmes de recherche couvrent également la bioinspiration, le biomimétisme, ou bien encore la robotique bio-inspirée. La Biorobotique vise à expliquer les rouages du vivant, tout particulièrement le couplage entre perception et action, pour comprendre les mécanismes d'orientation spatiale chez les animaux, et *a fortiori* applicable en robotique. Mes

travaux se focalisent essentiellement sur les invertébrés (abeille, fourmi, bourdon, e.g, PORTELLI, Julien R SERRES et RUFFIER 2017, Julien R SERRES, A. H. MORICE, BLARY et al. 2019), mais depuis peu, je m'intéresse aussi au contrôle d'altitude chez les oiseaux (goéland, collaboration avec l'Université de Lund, J. SERRES, EVANS, ÅKESSON et al. 2017, Julien R SERRES, EVANS, ÅKESSON et al. 2019), mais aussi à la manœuvre d'appontage en hélicoptère chez l'humain en réalité augmentée (collaboration avec l'ONERA, voir A. H. P. MORICE, RAKOTOMAMONJY, Julien R SERRES et al. 2020 (soumis), MATHIEU, PEREIRA FIGUEIRA, Julien R SERRES et al. 2019). Les humains et les animaux effectuent des tâches communes et complexes de navigation spatiale pour s'orienter dans l'espace, franchir des couloirs ou traverser des canyons urbains, ou bien encore atterrir sur une piste, apponter sur un navire en pilonnement par un pilote, ou un insecte atterrissant sur une fleur ballottée par le vent (Fig. 3.1). Les robots actuels sont incapables d'égaler les performances des systèmes biologiques dans des environnements réels, on peut donc alors se poser la question de la pertinence de l'approche conventionnelle de la robotique qui mise tout sur la puissance calculatoire et la modélisation fine de l'environnement pour coupler perception et action en robotique autonome (MOREL 2019). Mon *modus operandi* est par conséquent à la fois le biomimétisme et la parcimonie. Comment se fait-il qu'il existe des animaux dans la Nature ayant un système visuel si pauvre en nombre de pixels et en résolution? Seul l'humain a inventé la paire de lunettes pour corriger sa vue ou des jumelles pour voir plus loin, et pourtant sa vue est excellente !

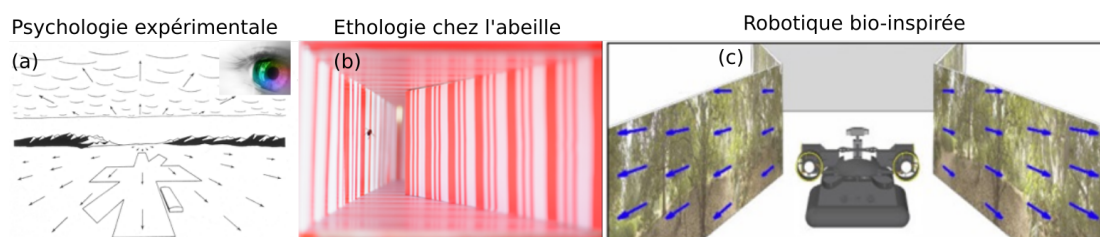


FIGURE 3.1 – (a) Flux optique et scène visuelle perçue par un pilote (GIBSON 1950). (b) Abeille traversant un tunnel fuselé (Julien R SERRES et RUFFIER 2017). (c) Simulation numérique et incarnation physique des principes de guidage visuo-moteur à bord de micro-robots équipés de capteurs bio-inspirés (ROUBIEU, Julien R SERRES, COLONNIER et al. 2014).

Pour répondre à cette question, mes axes de recherche sont la construction de capteurs visuels bio-inspirés ayant les propriétés optiques des invertébrés, l'étude des mécanismes de guidage visuel communs, par exemple, chez l'abeille en vol libre pour étudier son contrôle d'altitude et chez l'humain réalisant une tâche d'appontage en hélicoptère en virtualité augmentée, et enfin la réalisation de démonstrateurs physiques dotés de ces mêmes principes visuo-moteurs (Fig. 3.2). Mon profil de recherche est aujourd'hui transdisciplinaire en sciences perceptivo-motrices (animaux, humains, robots), à l'interface entre les Sciences

du Vivant et la Robotique, ce qui contribue à produire des résultats en robotique bio-inspirée vecteur d'innovations (MONNOYER, DUPEYROUX, Stéphane VIOLLET et al. 2020), mais aussi une meilleure compréhension du guidage visuel chez les animaux comme chez les pilotes.

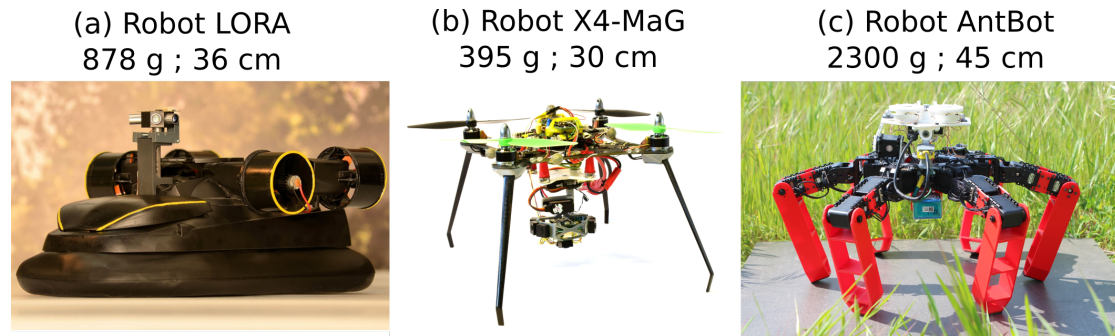


FIGURE 3.2 – (a) Robot aéroglisseur LORA mimant le guidage visuel de l'abeille dans le plan horizontal (ROUBIEU, Julien R SERRES, COLONNIER et al. 2014). (b) Quadri-rotor X4-MaG équipé de son œil d'abeille bio-inspiré (Erik VANHOUTTE, RUFFIER et J. SERRES 2017a). (c) Robot Hexapode Anbot équipé d'une boussole céleste et d'un œil ventral (DUPEYROUX, Julien R SERRES et Stéphane VIOLLET 2019). Crédits photographiques : Julien Dupeyroux.

3.2 Du photon à la vision

3.2.1 Propriétés physiques du rayonnement solaire reçu au sol

Nous pouvons remarquer sur la Fig. 3.3a que le spectre solaire reçu au niveau de la mer se compose majoritairement de rayonnement visible, concordant en tout point avec la sensibilité spectrale de l'œil humain 380-700 nm (Fig. 3.3b). Le maximum de rayonnement solaire au niveau de la mer se situe entre le bleu 480 nm et le vert 530 nm. Nous remarquons également que le rayonnement solaire au niveau de la mer comprend 7% d'ultraviolets, 46% de lumière visible, et 47% d'infrarouges (Fig. 3.3a). Ces 7% d'ultraviolets se situent entre 300 nm et 380 nm, ce qui correspond à des UV-A (Fig. 3.3b), et les abeilles, comme tout insecte, sont sensibles aux UV-A (T. W. CRONIN et BOK 2016) (Fig. 3.3c). Pour des raisons évolutionnistes et morphologiques (DARWIN 1859), les insectes privilégient l'ultraviolet, le bleu, et le vert, alors que l'humain privilégie le bleu 437 nm, le vert 533 nm, et l'orange 564 nm. La couleur primaire rouge fut fixée à 700 nm en 1931 par la commission internationale de l'éclairage (CIE), la couleur primaire verte à 546,1 nm (raie spectrale du mercure), et la couleur primaire bleue à 435,8 nm (raie spectrale du mercure). En conséquence, l'humain perçoit très mal le rouge. Depuis 1999, l'espace de couleurs primaires, dit sRGB, a été

redéfini par la norme CIE 61966-2-1, dans laquelle le rouge se situe à 611 nm (qui ressemble à un orangé-rouge), le vert à 547 nm , et le bleu à 464 nm . En ayant, un pic de sensibilité à l'ultraviolet vers $350\text{--}380\text{ nm}$ (Tab. 3.1), les insectes peuvent exploiter l'intégralité du rayonnement UV disponible au sol, là où l'œil humain ne le détecte pas. Finalement, la longueur de bande spectrale détectée par les insectes est aussi longue que celle de l'humain, mais se trouve décalée vers les ultraviolets au détriment du rouge (Fig. 3.3c).

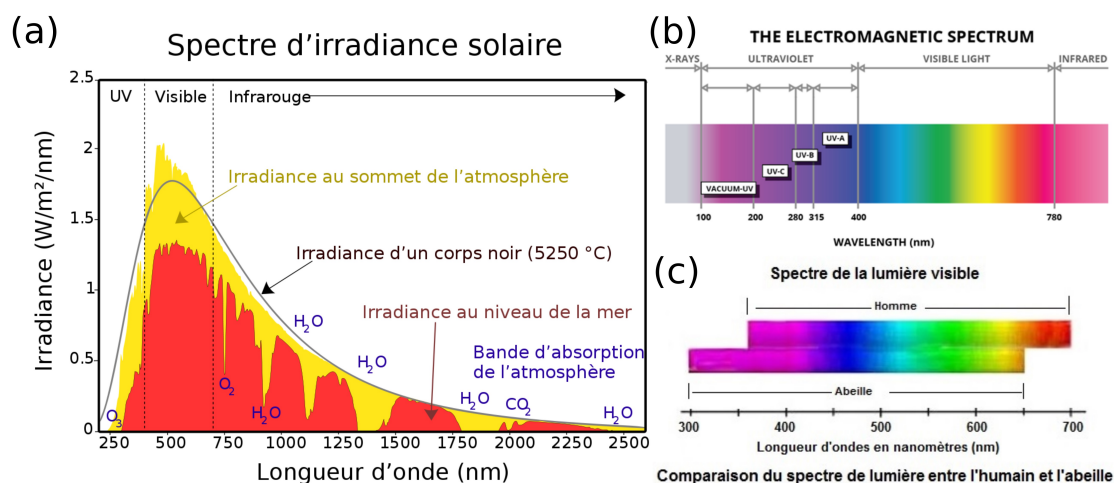


FIGURE 3.3 – (a) Spectre solaire disponible au niveau de la mer. Source : Wikimedia Commons. (b) Limites du spectre visible $380\text{--}700\text{ nm}$ et des ultraviolets : UV-A $315\text{--}380\text{ nm}$, UV-B $280\text{--}315\text{ nm}$, UV-C $200\text{--}280\text{ nm}$, et enfin Vacuum-UV $10\text{--}200\text{ nm}$. Source : norme ISO 21348-2007. (c) Comparaison de la sensibilité spectrale des yeux des humains et des abeilles. D'après ANCHLING 2004.

Espèce	$\lambda_{POL}(nm)$	Référence
<i>Calliphora erythrocephala</i> (mouche)	330-350	SMOLA et MEFFERT 1975
<i>Apis mellifera</i> (abeille)	345-350	HELVENSEN et EDRICH 1974 ; LABHART 1980
<i>Bombus hortorum</i> (bourdon)	353 & 430	MEYER-ROCHOW 1981
<i>Cataglyphis bicolor</i> (fourmi du désert)	380-410	DUELLI et Rüdiger WEHNER 1973
<i>Cataglyphis setipes</i> (fourmi du désert)	380-410	FRANTSEVICH, ZOLOTOV, GRIBAKIN et al. 1976
<i>Lethrus apterus</i> (scarabée)	350	FRANTSEVICH, ZOLOTOV, GRIBAKIN et al. 1976
<i>Pachysoma striatum</i> (bousier du désert)	350	M. DACKE, NORDSTRÖM, SCHOLTZ et al. 2002
<i>Drassodes cupreus</i> (araignée)	350	DACKE, NILSSON, WARRANT et al. 1999

TABLE 3.1 – Préférence des ultraviolets (UV) chez certains insectes et arachnides. La longueur d'onde renseignée ici correspond au maximum de sensibilité dans l'aire dorsale marginale (DRA), sensible à la polarisation de la lumière. D'après BARTA et HORVÁTH 2004.

3.2.2 Pourquoi les insectes perçoivent-ils les ultraviolets et non l'infrarouge ?

De manière surprenante, ce n'est que très récemment que l'intérêt de la vision ultraviolette trouva une explication rationnelle dans le monde animal. Jusqu'à lors elle était qualifiée de paradoxale par la communauté scientifique, certainement réduite à un positionnement anthropocentrique.

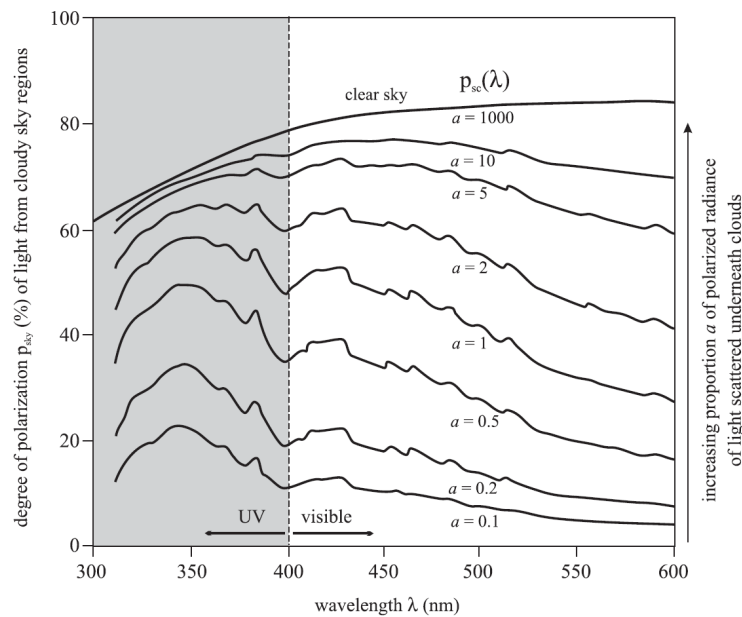


FIGURE 3.4 – Transmission du rayonnement solaire à travers la couverture nuageuse, on observe que l'ultraviolet est moins sensible que le visible, ce qui en fait un atout. D'après BARTA et HORVÁTH 2004.

Aussi bien la présence du feuillage que de nuages entre le système visuel et le voûte céleste ne semble pas perturber la mesure du cap optique en bande spectrale ultraviolette, ce que nous avons commencé à démontrer au moyen du robot AntBot pour des applications en navigation autonome (DUPEYROUX, Stéphane VIOLLET et Julien R SERRES 2019a). Ce constat tend à confirmer l'hypothèse formulée par Barta et Horváth (POMOZI, HORVÁTH et Rüdiger WEHNER 2001 ; BARTA et HORVÁTH 2004) et selon laquelle l'information de polarisation serait moins affectée par la traversée des nuages et des canopées dans l'ultraviolet (UV), expliquant ainsi la prédominance de la préférence UV chez les insectes navigateurs exploitant la polarisation de la lumière du ciel, contrairement au rouge qui est littéralement absorbé par les nuages et les feuillages. De plus, le contraste optique des feuillages serait bien meilleur dans l'UV que dans le visible (TEDORE et Dan-Eric NILSSON 2019), ce qui expliquerait pourquoi les oiseaux sont aussi sensibles aux UV (BENNETT et CUTHILL 1994 ; CUTHILL, PARTRIDGE,

BENNETT et al. 2000 ; KEVAN, CHITTKA et DYER 2001 ; LIND, MITKUS, OLSSON et al. 2014 ; RAJCHARD 2009).

Pour détecter les ultraviolets, la Nature s'est permise d'améliorer le pigment visuel dit normal (i.e., la rhodopsine) en lui adjoignant un pigment accessoire (i.e., un pigment sensibilisateur UV, HUNT, WILKIE, BOWMAKER et al. 2001) qui transfère son énergie d'excitation à la rhodopsine, de sorte que le photorécepteur devient finalement sensible à l'UV (Chez la mouche voir KIRSCHFELD, FRANCESCHINI et MINKE 1977).

3.2.3 Propriétés physiques du rayonnement sous-marin

En 1954, Talbot Waterman a démontré que la lumière polarisée provenant du ciel était accessible sous l'eau jusqu'à plusieurs centaines de mètres de profondeur du fait des multiples observations comportementales des animaux subaquatiques en lien avec leurs mécanismes de migration (WATERMAN 1954). En effet, on distingue différentes zones de profondeur (Fig. 3.5) : la zone infrapélagique (-200 à -600 m), enrichie en nutriments par la proximité des côtes ; la zone euphotique et peuplée de nombreuses espèces animales ; la zone bathypélagique (-600 à -2500 m), qui comprend la majeure partie des eaux et où seuls vivent les grands carnivores et les espèces adaptées aux grandes profondeurs ; et enfin la zone abyssopélagique (-2500 m et plus), quasi déserte.

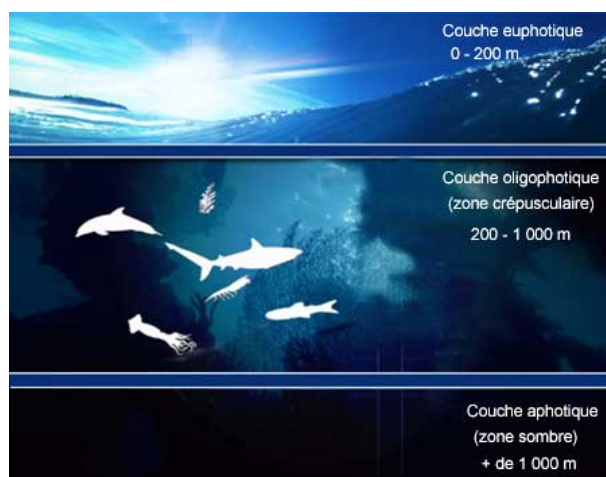


FIGURE 3.5 – Obscurité subaquatique et vie sous-marine. Source [Hydrosphère](#).

Des mesures par temps clair dans différents milieux marins, à des profondeurs pouvant aller jusqu'à 200 m, ont démontré la présence et la persistance du motif de polarisation de la voûte céleste qui se projette sous l'eau. Dans la plupart des lignes de visée, les e-vecteurs (ou champ électrique des ondes électromagnétiques) s'inclinent de l'horizontale vers le soleil à des angles égaux à l'angle

zénithal réfracté apparent du soleil sous l'eau. Un angle d'inclinaison maximal de $48,5^\circ$ est atteint dans les lignes de visée horizontales à 90° par rapport au relèvement du soleil (Fig. 3.6a). Cette limite d'inclinaison est fixée par la fenêtre de Snell (Fig. 3.6b-c), lorsque le soleil est à l'horizon. Depuis les années 1980, la littérature biologique a été imprégnée d'hypothèses selon lesquelles les e-vecteurs aquatiques diurnes sont principalement horizontaux, et ne pourraient donc pas servir dans la détermination du cap. Talbot Waterman a démontré que le motif de polarisation observé sous l'eau est similaire à celui observé dans l'air dans le domaine spectral disponible sous l'eau (WATERMAN 2006). Ces e-vecteurs sous-marins sont exploités par les animaux aquatiques comme une véritable boussole optique pouvant expliquer les mécanismes d'orientation et de navigation des animaux aquatiques (WATERMAN 2006).

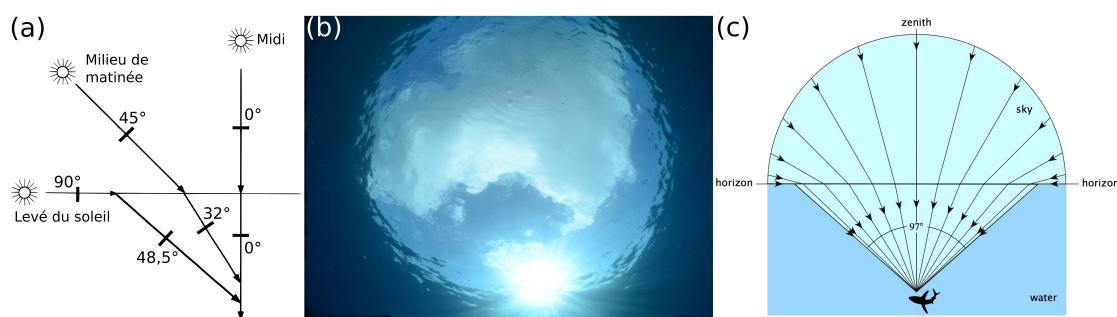


FIGURE 3.6 – (a) Illustration de la fenêtre de Snell. D'après WATERMAN 2006. (b) Fenêtre de Snell visible sous l'eau par un plongeur. Crédits photographiques : David K. Lynch et Simon Higton, d'après LYNCH 2015. (c) Illustration de la fenêtre de Snell formant un angle de 97° . D'après LYNCH 2015.

Aujourd'hui, on comprend mieux pourquoi un certain nombre d'espèces sous-marines utilisent la lumière polarisée pour s'orienter en milieu subaquatique (N. J. MARSHALL 1988 ; LERNER, SABBAB, ERLICK et al. 2011 ; Thomas W. CROININ et J. MARSHALL 2011 ; THOEN, HOW, CHIOU et al. 2014 ; POWELL, GARNETT, J. MARSHALL et al. 2018). On peut aussi observer sur la Fig. 3.7 que les ultraviolets sont disponibles jusqu'à 50 m de profondeur, et que le bleu est disponible jusqu'à une profondeur de 200 m, ce qui concorde avec les observations de Talbot Waterman. Depuis lors, la modélisation de la polarisation subaquatique a fait de larges progrès (ZHOU, J. WANG, XU et al. 2017). On comprend alors tout l'intérêt que pourrait avoir un bioroboticien à mimer une boussole céleste subaquatique pour faciliter la localisation des plongeurs et des robots en milieu subaquatique (DUPEYROUX, Stéphane VIOLLET et Julien R SERRES 2019a), qui est un milieu ne permettant pas la propagation des ondes radio comme celles utilisées par les GNSS¹.

1. GNSS : nom donné aux systèmes utilisant des satellites pour calculer la position, la vitesse et l'altitude d'un mobile placé en tout lieu et notamment sur la surface de la terre. Le plus connu est le GPS (Américain). Ces concurrents sont Glonass (Russe), Galiléo (Européen) et Beidou (Chinois).

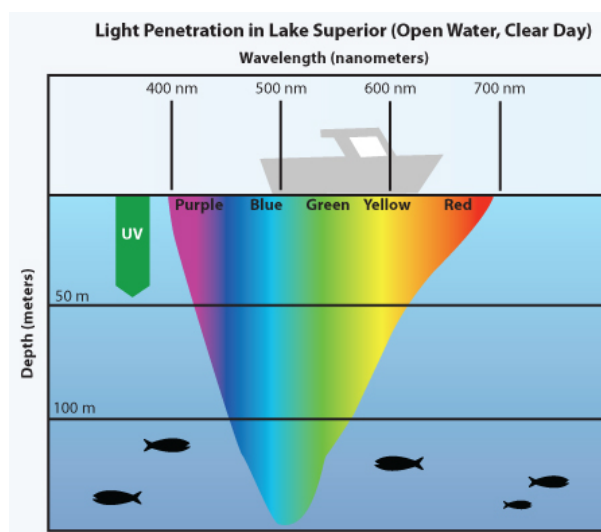


FIGURE 3.7 – Rayonnement solaire disponible sous l’eau. Source : Université du Minnesota, Sea Grant Program.

3.2.4 Voir le monde à travers des filtres polarisants

L’humain n’est pas sensible, ou extrêmement peu sensible à la lumière polarisée. [Les brosses de l’autrichien Wilhelm Karl von Haidinger](#) (ou les houppes de Haidinger) est une image que l’on peut voir lorsqu’on observe une lumière polarisée (HAIDINGER 1844). Cette illusion optique reste néanmoins difficilement observable.

Ainsi, la voûte céleste nous apparaît-elle uniforme à moins d’utiliser un filtre polarisant. Sur cette photographie panoramique du ciel d’un lever de soleil, on observe la présence d’une barre très foncée se dessiner nettement dans le ciel (Fig. 3.8), elle constitue un amer visuel détecté par les insectes, mais aussi par notre boussole céleste bio-inspirée.

En pratique, l’orientation de cette barre dépend de l’orientation du filtre polarisant :

- si le filtre polarisant et l’axe du méridien solaire, c’est-à-dire le demi-cercle de la voûte céleste passant par le soleil et le zénith, sont orientés de la même manière, alors la barre foncée sera perpendiculaire au méridien solaire,
- en revanche, si l’on oriente le filtre perpendiculairement au méridien solaire, alors la barre sera orientée suivant le méridien solaire.

La figure 3.9 montre l’effet de l’orientation du filtre polarisant linéaire sur la lumière du ciel. Au regard de ces observations, on comprend qu’il existe dans le ciel une sorte de droite qui pourrait servir d’axe de référence pour s’orienter dans l’espace.



FIGURE 3.8 – Photographie panoramique du ciel au moyen d'un filtre polarisant. Montage Julien Serres. Credits photographiques : Roel Wijtmans.

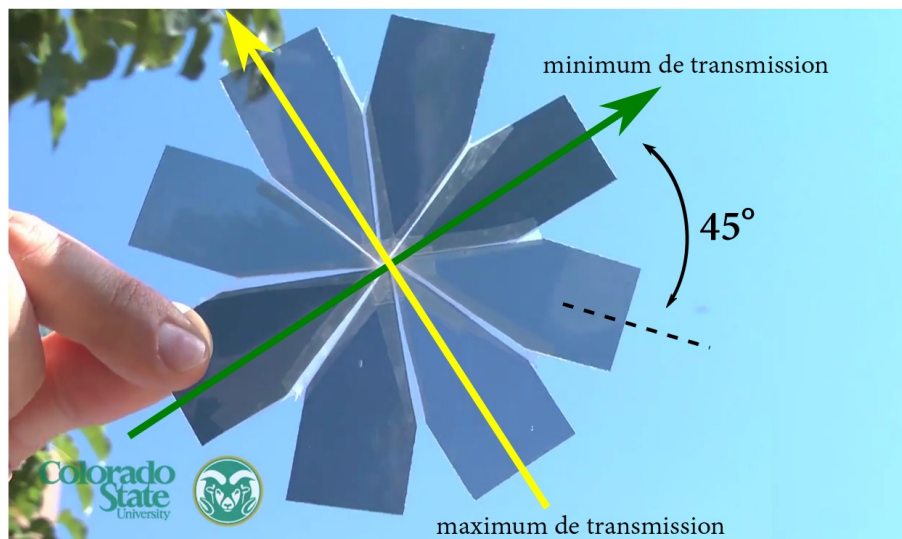


FIGURE 3.9 – Photo montrant l'absorption plus ou moins importante de la lumière du ciel lorsque celle-ci traverse un filtre polarisant linéaire. Le maximum de transmission est obtenu selon l'orientation décrite par la flèche jaune; le minimum est atteint suivant l'orientation perpendiculaire (flèche verte). Extrait de : <https://www.youtube.com/watch?v=TP5J0frPguQ>. Crédits : Colorado State University.

D'après le modèle de diffusion de Rayleigh sur la propagation de la lumière dans l'atmosphère terrestre (LEROY 1998; MOREL 2019), les interactions entre les photons et les molécules qui constituent notre atmosphère entraînent une po-

larisation linéaire de la lumière du ciel selon un motif régulier et symétrique par rapport au méridien solaire (Fig. 3.10), et dont la configuration est due à la position du soleil dans la voûte céleste (K. COULSON 1959 ; Kinsell L COULSON 1988 ; GÁL, HORVÁTH, BARTA et al. 2001 ; Thomas W. CRONIN et J. MARSHALL 2011). Néanmoins, les perturbations atmosphériques modifient le modèle théorique de diffusion de Rayleigh, ce qui limite sa confiance et son utilisation sur le terrain pour déterminer un cap céleste (BRINES et GOULD 1982).

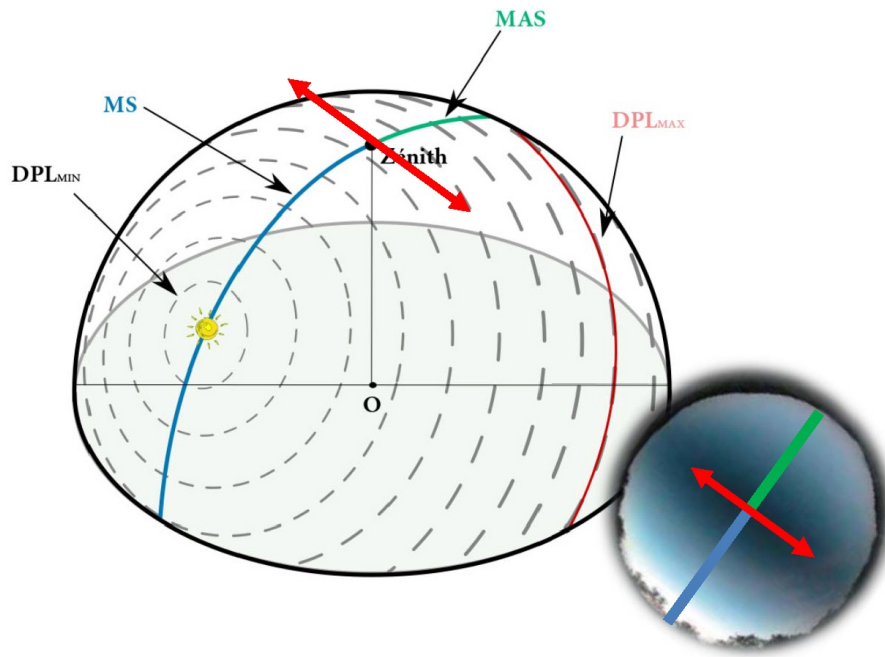


FIGURE 3.10 – Diagramme de polarisation linéaire de la lumière du ciel en fonction de la position du soleil et relativement à un observateur (O). Le disque plan est considéré tangent à la surface de la terre; l'axe O-Zénith est défini comme la normale à ce plan. L'orientation des tirets noirs donne l'angle de polarisation AdP tandis que l'épaisseur décrit le degré de polarisation linéaire dont les valeurs types sont données à la base de la demi-sphère. L' AdP est orthogonal aux méridiens solaire (MS) et anti-solaire (MAS). Adapté de Rudiger WEHNER et RÄBER 1979 ; PFEIFFER, NEGRELLO et HOMBERG 2010.

Afin de mieux comprendre ce motif très spécifique, il est nécessaire de revenir aux principes fondamentaux de la polarisation. La lumière du soleil est naturellement dépolarisée, cela signifie que les ondes qui la composent oscillent dans toutes les directions comme indiqué sur la Fig. 3.11. L'atmosphère terrestre d'une épaisseur de 100 km joue alors le rôle de polariseur linéaire partiel en polarisant une partie de la lumière du soleil selon une orientation principale. On caractérise alors l'état de polarisation de l'onde lumineuse au moyen de deux paramètres :

- l'angle de polarisation AdP déterminant l'orientation de l'axe des oscillations du champ électrique (e-vector),
- le degré de polarisation linéaire DPL correspondant à l'intensité de la lumière polarisée linéairement divisée par l'intensité totale des ondes composant la lumière.

Ainsi, en fonction de la longueur du chemin parcouru par la lumière du soleil dans l'atmosphère, l'angle AdP et le degré de polarisation linéaire DLP varient (Fig. 3.12). L'état de polarisation de la lumière du ciel dépend donc de la position de l'observateur sur la surface de la Terre ainsi que de la zone de la voûte céleste qui est observée.

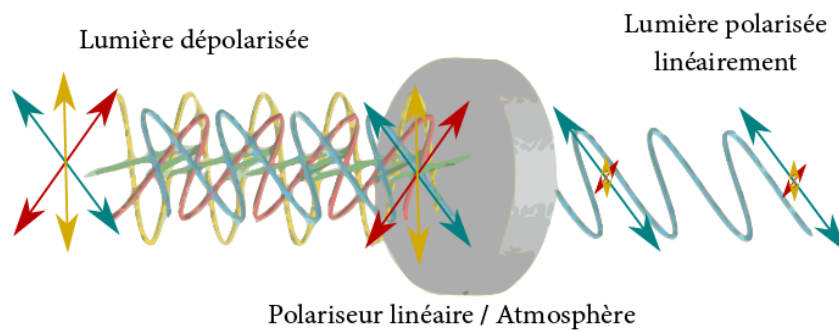


FIGURE 3.12 – Schéma représentant l'effet de l'atmosphère terrestre (i.e. un polariseur linéaire) sur la lumière dépolarisée provenant du soleil. L'angle de polarisation AdP correspond à l'orientation de la lumière polarisée.

Le maximum de polarisation de la lumière se produit à 90° du soleil (ou de la lune, laquelle crée également un motif de polarisation, GÁL, HORVÁTH, BARTA et al. 2001). Le degré de polarisation, augmente avec la distance par rapport au soleil, puis diminue au-delà de 90° (Fig. 3.12). Il en résulte que le degré de polarisation linéaire est minimal autour du soleil ($DPL_{min} \approx 0,01$), et maximal à 90° du soleil ($DPL_{max} \approx 0,75$ dans des conditions atmosphériques normales) (K. COULSON 1959; BRINES et GOULD 1982).

Quelle que soit la position du soleil, la distribution des angles de polarisation est symétrique par rapport aux méridiens solaire et anti-solaire, lesquels sont constitués par le demi-cercle passant par le zénith et le soleil (Fig. 3.10). Cet invariant est précisément à l'origine de l'utilisation de la polarisation comme information de cap par les insectes navigateurs. La référence sera alors le méridien solaire.

Pour exploiter le cap céleste en tant qu'instrument de navigation dans l'industrie, il faudra pouvoir de relier le cap céleste, i.e. l' AdP , à un référentiel classique comme le Nord géographique. En supposant que l'on puisse déterminer l' AdP , alors l'orientation du méridien solaire est directement connue (déphasage de 90°

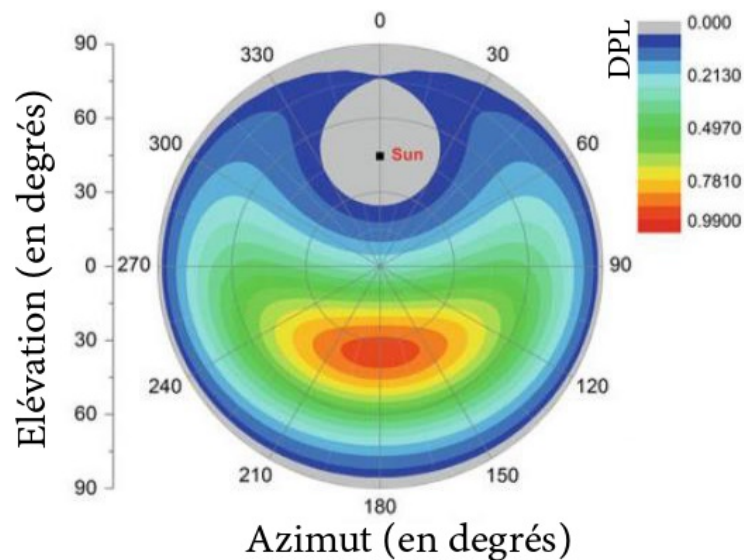


FIGURE 3.12 – Diagramme simulé de la distribution du degré de polarisation linéaire DPL d'après la théorie de Rayleigh, en fonction de la position du soleil dans la voûte céleste. D'après d OU, WU, C. TANG et al. 2016.

avec l' AdP). Or, le méridien solaire est directement lié à la position du soleil dans le ciel. En connaissant l'évolution de la courbe du soleil (azimut et élévation) au cours du temps en fonction de la date et de l'heure, que l'on appelle aussi fonction éphéméride, le cap peut être alors déterminé relativement au Nord géographique. Ce qui permettrait d'avoir, en plus d'une mesure de cap magnétique, une mesure de cap optique.

3.2.5 Voir le monde au moyen du flux optique

Sur un plan général, la contribution majeure de James J. Gibson a été d'argumenter que, contrairement au consensus (qui perdure d'ailleurs malgré tout), pour percevoir des propriétés pertinentes de l'environnement, l'humain et les autres animaux n'ont pas besoin d'enrichir la stimulation sensorielle que la situation leur procure (GIBSON 1950 ; GIBSON 1979). Cette idée d'enrichissement, à la base de la grande majorité de théories de la perception, est ce que Gibson considère comme rendant la perception indirecte. Cet enrichissement de la stimulation revient à y ajouter du contenu, pour désambiguïser la perception de la situation. Selon la conception traditionnelle, la stimulation est en effet pauvre (par exemple, une absence de la 3^{ème} dimension de l'espace) et une perception fiable nécessitera donc l'apport de connaissances supplémentaires, stockées quelque part dans le système nerveux. Ce n'est donc pas en soi la complexité des calculs éventuels qui posera problème, mais le fait d'inclure dans ces calculs des éléments supplémentaires, des a priori mémorisés extérieurs à la stimulation.

Selon James Gibson, l'idée d'un enrichissement nécessaire de la stimulation provient de l'adoption (implicite ou explicite) du point de départ que la base de la vision serait l'image rétinienne, une sorte de photo instantanée figée de la situation. Si l'on adopte ce point de départ, l'enrichissement est effectivement nécessaire, parce que l'image rétinienne est ambiguë (e.g., l'angle visuel formé par un objet sur la rétine ne dépend pas que de la taille de l'objet, mais aussi de sa distance par rapport au point d'observation ; sans connaître l'un on ne peut donc pas accéder à l'autre à partir de l'angle visuel).

Pour que la perception puisse être directe (i.e., sans nécessiter un enrichissement), il fallait donc changer le point de départ !! Gibson était ainsi le premier à proposer que la base de la perception (visuelle) était le flux (optique) qui serait donc utile non seulement pour la perception du mouvement (d'éléments de l'environnement et/ou de soi) mais également pour la perception de la configuration de l'environnement (perçue grâce au mouvement de soi). Dans cette perspective, le système ne travaille pas sur l'image rétinienne ou autre (qui n'est pas porteuse d'informations dans le sens gibsonien), mais sur les caractéristiques du flux optique, c'est-à-dire la structure dans le changement de stimulation. Dans cette logique, on ne retient pas (en mémoire) une image qu'on compare à une autre image, pour en déduire quelque chose. Voici 35 ans que l'équipe Biorobotique développe des capteurs de flux optique biomimétiques. Ces capteurs sont inspirés dès l'origine des "détecteurs élémentaire de mouvement" des animaux, que l'équipe Biorobotique a pu analyser à un niveau très fin chez la mouche domestique, par enregistrement d'un neurone détecteur de mouvement (le neurone H1) soumis à des microstimulations lumineuses de photorécepteurs individuels (diamètre 1,6 micron) dans l'une des 3000 facettes de l'oeil (diamètre 30 microns) (RIEHLE et FRANCESCHINI 1984 ; Nicolas FRANCESCHINI 1985 ; Nicolas FRANCESCHINI, Alexa RIEHLE et LE NESTOUR 1989). Ces capteurs de flux optique n'exploitent pas l'image instantanée mais la vitesse de défilement de contrastes optiques mis en correspondance temporellement.

Il y a donc une distinction conceptuelle entre des approches de vision artificielles basées sur des caméras captant des images (avec la plus grande résolution possible pour permettre la comparaison), d'une part, et basées sur des capteurs de flux (changement) local et/ou global, d'autre part. Au sein de l'équipe de Biorobotique, nous nous inscrivons dans cette dernière approche. Pour la première approche, la vitesse est obtenue par différenciation de la position, tandis que pour l'autre, elle est l'entrée.

Par exemple, la transformée de Fourier est typiquement un concept renvoyant à l'approche traditionnelle de la vision, étant donné qu'elle implique qu'il faille fusionner des images prises les unes après les autres. Alors qu'en réalité réelle — et non pas en réalité virtuelle — le flux de stimulation sur la rétine est continu, il n'existe donc pas d'obturateur dans l'oeil discrétisant dans le temps l'acquisition des images par le système visuel.

Formellement, le flux optique est décrit par rapport à un point d'observation.

Le flux entoure totalement ce point et dépend, dans un environnement statique, seulement de la façon dont ce point se déplace dans cet environnement. Ce n'est que lorsqu'on place un capteur à ce point, que le champ visuel et l'orientation du capteur deviennent importants; on parle dans ce cas du flux retinien chez l'humain.

3.2.6 Définition et formalisation mathématique 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 défiler 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) (GIBSON 1950; WHITESIDE et SAMUEL 1970; NAKAYAMA et LOOMIS 1974; GIBSON 1979; KOENDERINK et DOORN 1987; KRAPP et HENGSTENBERG 1996).

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 KOENDERINK et DOORN 1987 (Eq. 3.1) c'est-à-dire le flux optique de translation $\vec{\omega}_T$ (Eq. 3.2) et le flux optique de rotation $\vec{\omega}_R$ (Eq. 3.3).

$$\vec{\omega} = \vec{\omega}_T + \vec{\omega}_R \quad (3.1)$$

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

$$\vec{\omega}_T = -\frac{\vec{V} - (\vec{V} \cdot \vec{d}(\Psi, \Theta)) \cdot \vec{d}(\Psi, \Theta)}{D(\Psi, \Theta)} \quad (3.2)$$

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

$$\vec{\omega}_R = -\vec{\Omega} \otimes \vec{d}(\Psi, \Theta) \quad (3.3)$$

où $\vec{d}$ est un vecteur unitaire orienté vers la direction du regard pointant vers l'objet (Fig. 3.13), $\vec{V}$ 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.

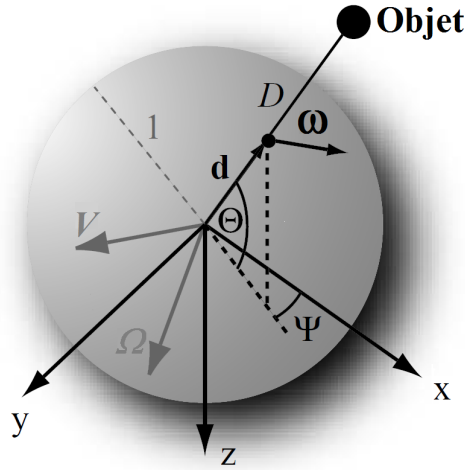


FIGURE 3.13 – La direction portée par le regard est indiquée par le vecteur unitaire $\vec{d}$, qui est une fonction de l'angle d'azimut Ψ et de l'angle d'élévation Θ . La distance de l'objet suivant la direction $\vec{d}(\Psi, \Theta)$ est notée $D(\Psi, \Theta)$. Le vecteur de flux optique $\vec{\omega}$ est tangentielle est 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.

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 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 :

$$\omega_T = \frac{V}{D_\varphi} \cdot \sin(\varphi) \quad (3.4)$$

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.

3.3 Se guider dans un tunnel sur la base du flux optique

Durant mes travaux post-doctoraux, j'ai co-encadré la thèse de Goeffrey Portelli [2007-2011] sur la partie modélisation du vol 3D d'une abeille simulée. J'ai alors cherché à englober sur un même et unique schéma de contrôle visuomoteur diverses observations comportementales faites au cours des dernières décennies sur les insectes volants (Julien R SERRES et RUFFIER 2017). En se basant sur les résultats obtenus antérieurement, en particulier chez l'abeille (Julien R SERRES, MASSON, RUFFIER et al. 2008), ainsi que les schémas de contrôle bio-inspirés expliquant le contrôle du vol dans le plan vertical (RUFFIER et Nicolas FRAN-

CESCHINI 2005 ; Nicolas FRANCESCHINI, RUFFIER et J. SERRES 2007a) et dans le plan horizontal (J. SERRES, RUFFIER et Nicolas FRANCESCHINI 2006 ; J. SERRES, DRAY, RUFFIER et al. 2008), un nouveau schéma de contrôle dénommé ALIS (*AutopiLot using an Insect based vision System*, Fig. 3.14A) a alors été proposé pour décrire le comportement d'un insecte volant simulé volant en 3D le long d'un environnement se présentant sous la forme de tunnels rectilignes ou fuselés (Figs. 3.14B-C), ou bien encore présentant des ouvertures (PORTELLI, J. SERRES, RUFFIER et al. 2008b ; PORTELLI, J. SERRES, RUFFIER et al. 2010).

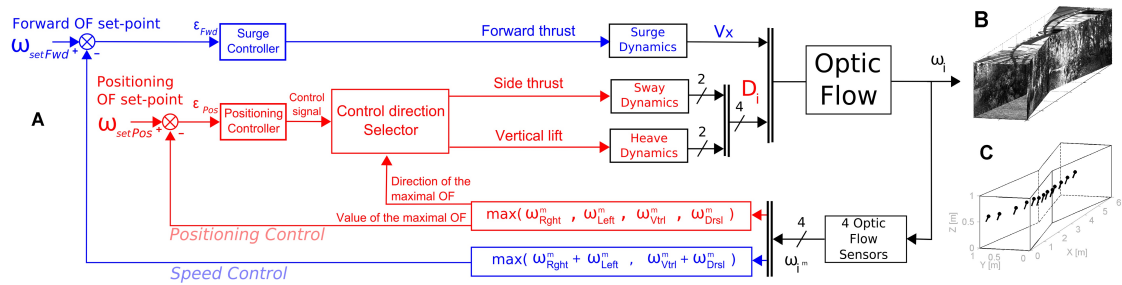


FIGURE 3.14 – (a) Pilote automatique ALIS (*AutopiLot using an Insect based vision System*) composé d'un régulateur de vitesse optique par rapport à une des 4 parois du tunnel pour le positionnement de l'insecte volant simulé à l'intérieur du tunnel 3D (*positioning control*) et d'un régulateur de vitesse optique bilatérale ou bi-verticale pour ajuster la vitesse de l'insecte simulé en fonction de l'étréitesse du tunnel 3D (*speed control*). (b) Tunnel fuselé 3D tapissé de textures naturelles. (c) Trajectoire d'une abeille simulée dans le tunnel représenté en (b). D'après PORTELLI, J. SERRES, RUFFIER et al. 2008b ; PORTELLI, J. SERRES, RUFFIER et al. 2009 ; PORTELLI, J. SERRES, RUFFIER et al. 2010.

Parallèlement à ce co-encadrement, j'ai cherché à expliquer et à modéliser comment un insecte volant pourrait suivre un corridor non rectiligne sur la base du flux optique en ajustant son cap en fonction du type de jonctions rencontrées dans le corridor (Julien R SERRES et RUFFIER 2015). J'ai alors proposé un nouvel algorithme bio-inspiré générant des saccades de corps, qui fut implémenté sur l'aéroglesseur LORA simulé doté d'un système visuel parcimonieux capable de mesurer seulement 8 vitesses optiques locales du flux optique (Fig. 3.15).

Une particularité du schéma de contrôle de la Fig. 3.15 est qu'il n'exploite que la vision du mouvement et un système stabilisant le cap du robot entre deux manœuvres d'évitement frontal, finalement comme le ferait un insecte volant entre deux saccades de corps. À tout instant, le robot n'a ni besoin de mesurer sa vitesse, ni sa distance par rapport aux murs, ni même connaître la configuration des angularités du corridor. Ce nouvel algorithme d'évitement d'obstacle frontal que j'ai proposé permet de déclencher des saccades de corps (en lacet) d'amplitude quantifiée, nécessitant peu de points de mesure de vitesse optique. Cela permet ainsi d'estimer l'angle d'incidence du robot par rapport à un mur

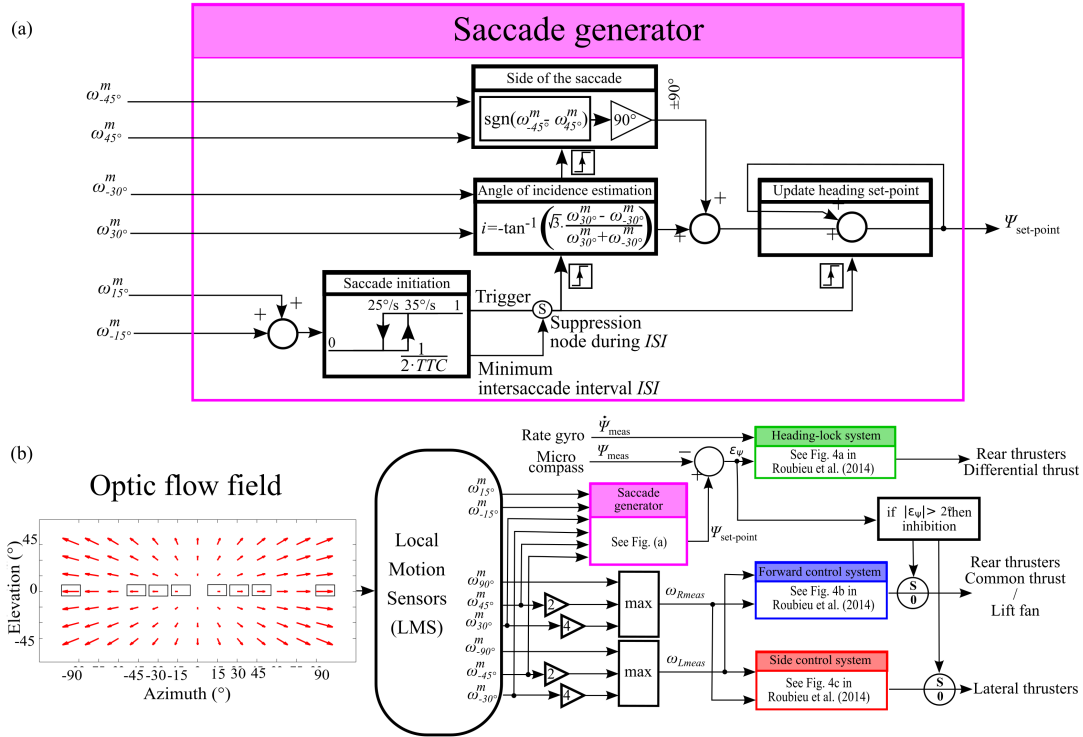


FIGURE 3.15 – (a) Diagramme fonctionnel du générateur de saccades. (b) Vue d'ensemble du schéma de commande complet décrit en termes d'une architecture de subsomption de Brooks. LMS signifie *Local Motion Sensor* (capteur de mouvement local). Gauche : les entrées inertielle et magnétique, puis visuelles (à partir de 8 LMS, 1 gyroscope et 1 micro-compas) du pilote automatique; droite : les signaux de commande (vers les propulseurs arrière et latéraux, et le gonflage du coussin d'air de l'aéroglesseur). Dans des conditions normales d'utilisation, le cap du robot ψ est réglé à une valeur constante par le système de verrouillage de cap (a), et les vitesses d'avance et latérale sont commandées par les vitesses optiques latérales (J. SERRES, DRAY, RUFFIER et al. 2008; ROUBIEU, Julien R SERRES, COLONNIER et al. 2014). Si une collision imminente avec un obstacle frontal est détectée, l'angle d'incidence i du robot par rapport à un obstacle frontal est alors estimé à partir de l'équation dans (a) pour calculer et mettre à jour le nouveau cap du robot $\psi_{set-point}$. D'après Julien R SERRES et RUFFIER 2015.

frontal. Les simulations numériques, en y intégrant les dynamiques du robot LORA, montrent que le robot simulé est capable de franchir des corridors ayant de sévères angularités en se repositionnant parallèlement à l'axe du corridor à chacune des jonctions (Fig. 3.16). Cela permet au robot d'adopter un comportement de suivi de paroi en dépit du fait que le corridor n'est pas rectiligne. Le robot LORA équipé du schéma de commande représenté sur la Fig. 3.15 a aussi été testé dans un labyrinthe représentant des couloirs à l'intérieur d'un bâtiment

(Fig. 3.17).

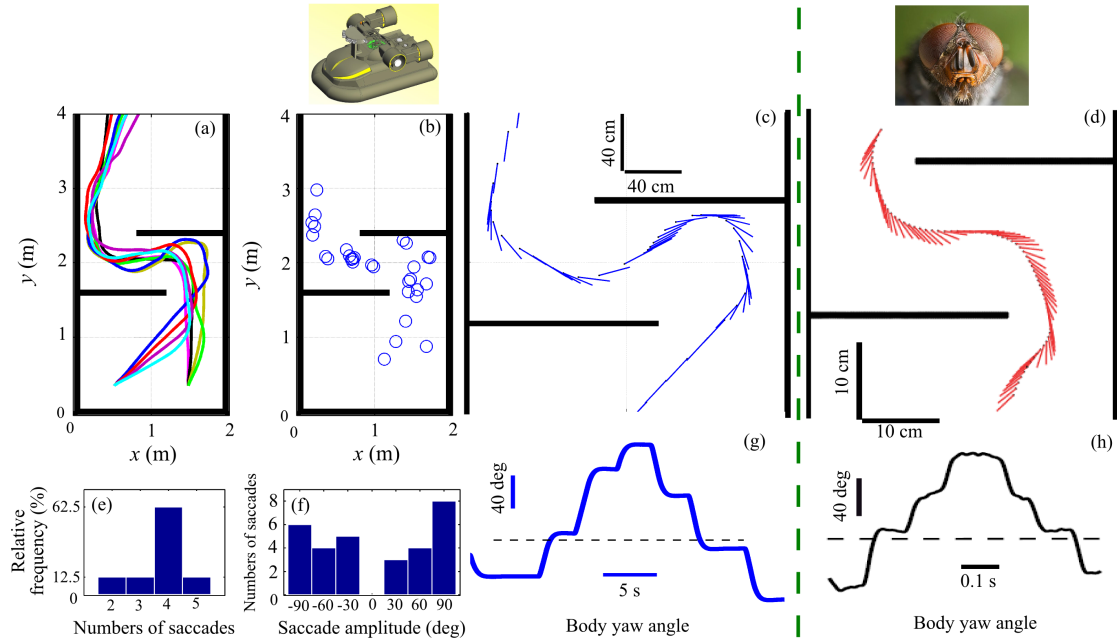


FIGURE 3.16 – Comparaison directe entre le comportement du robot simulé et celui de la mouche dans un virage en S. (a) 8 trajectoires simulées du robot LORA dans un virage en S, à partir d’une position initiale ($x_0 = 0,5m$; $y_0 = 0,35m$) avec différentes orientations initiales $\psi_0 = (35^\circ; 40^\circ; 45^\circ; 50^\circ)$, ou une position initiale ($x_0 = 1,5m$; $y_0 = 0,35m$) et diverses orientations initiales $\psi_0 = (70^\circ; 80^\circ; 90^\circ; 90^\circ; 95^\circ)$. (b) Points dans le corridor où ont lieu les saccades. En encart, CAO du robot LORA équipé de 8 LMS formant un champ visuel semi panoramique vers l’avant (LMS pour *Local Motion Sensor*). (c) Trajectoire typique du robot LORA parmi l’ensemble des 8 trajectoires présentées en (a). La position du robot (cercles noirs) et son orientation corporelle (lignes bleues) sont tracées toutes les 400 ms. (d) Trajectoire typique d’une mouche dans un virage en S, adaptée de KERN, BOEDDEKER, DITTMAR et al. 2012. La position de la mouche (cercles noirs) et son long axe corporel (lignes rouges) sont tracés toutes les 10 ms. En encart : tête d’une mouche *Calliphora vomitoria* (Photo : JJ Harrison, Wikimedia commons). (e) fréquence relative des saccades par trajectoire, lors de la traversée du virage en S ($n = 30$). (f) Les saccades de corps ont été classées en fonction de leur amplitude : 90° , entre -89° et -60° , entre -59° et -30° , puis entre 30° et 59° , entre 60° et 89° , et 90° . (g) Chronogramme de l’angle de lacet du corps suivant la trajectoire représentée en (c). La ligne pointillée horizontale donne l’axe Y du corridor ($\psi = 90^\circ$). (h) Chronogramme correspondant à l’orientation du corps de mouche au cours de la trajectoire représentée en (d). La ligne pointillée horizontale indique l’axe Y du tunnel ($\psi = 90^\circ$). D’après Julien R SERRES et RUFFIER 2015.

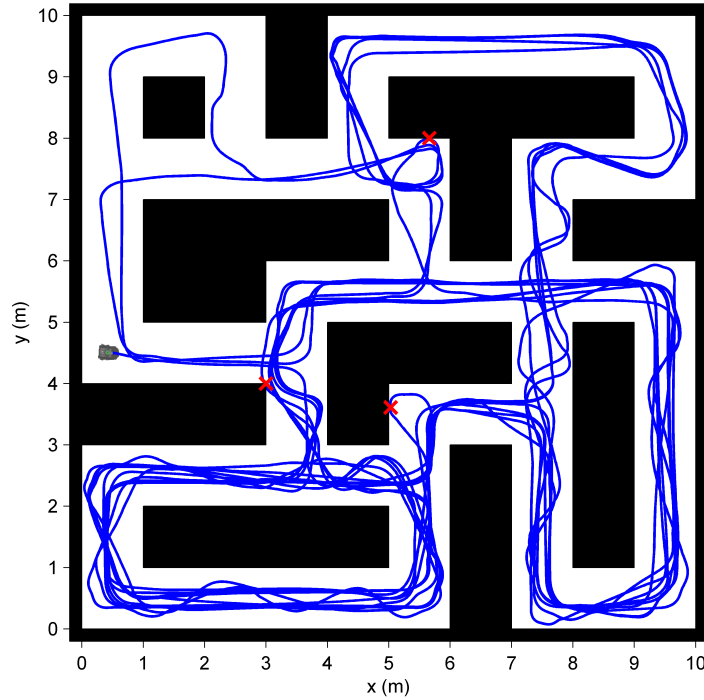


FIGURE 3.17 – Trajectoire du robot LORA équipé de 8 LMS (LMS pour *Local Motion Sensor*) à 15° , 30° , 45° et 90° , mais aussi d'un système de verrouillage de cap au moyen d'un gyroscope et d'un micro-compass magnétique. Le robot LORA est guidé par un système générant des saccades de corps (fusionnant deux angles d'incidence calculés par les LMS à $\pm 30^\circ$ et $\pm 45^\circ$ à partir de l'équation calculant l'angle d'incidence i dans la Fig. 3.15a et un système intersaccadique basé sur une double régulation du flux optique latéral (ROUBIEU, Julien R SERRES, COLONNIER et al. 2014; Julien R SERRES et RUFFIER 2015). Le robot LORA part d'une position initiale $(x_0 = 0, 5m, y_0 = 4, 5m)$ avec un cap initial $\psi_0 = -5^\circ$, et progresse dans les couloirs y compris les jonctions difficiles pendant ~ 23 minutes avec seulement trois contacts latéraux (croix rouges). D'après Julien R SERRES 2018.

3.4 Naviguer en extérieur en étant totalement référencée vision

Ce projet [2015-2019], financé par une thèse DGA/AMU du club des partenaires académiques de recherche défense, a permis de concevoir et de construire le robot hexapode AntBot, et a donné lieu à de nombreuses présentations dans des congrès internationaux (DUPEYROUX, PASSAULT, RUFFIER et al. 2017; DUPEYROUX, DIPERI, BOYRON, Stéphane VIOLLET et J. SERRES 2017c; DUPEYROUX, DIPERI, BOYRON, Stéphane VIOLLET et J. SERRES 2017a; DUPEYROUX, J. SERRES et Stéphane VIOLLET 2019), puis des publications dans de prestigieuses revues

scientifiques *Sciences Robotics* (DUPEYROUX, Julien R SERRES et Stéphane VIOLLET 2019), *Robotics and Autonomous Systems* (DUPEYROUX, Stéphane VIOLLET et Julien R SERRES 2019a), et *Royal Society Interface* (DUPEYROUX, Stéphane VIOLLET et Julien R SERRES 2019b).

3.4.1 Des enjeux qui dépassent le cadre de la biomimétique

La navigation est aujourd'hui un enjeu majeur dans le développement de véhicules et de robots autonomes. En 2018, on comptait en moyenne 5000 porte-conteneurs en service, plus d'un milliard de voitures en circulation, et on estime que près de 5000 avions volent à tout instant. Afin d'assurer la fiabilité de ces moyens de transport, il apparaît urgent de travailler à l'élaboration de nouveaux systèmes de navigation robustes et fiables. Outre le véhicule autonome de demain, les applications de ces systèmes de navigation sont nombreuses : l'exploration d'environnements ayant subi des dégâts considérables (situation de blackout), d'infrastructures urbaines, mais aussi à l'occasion d'exploration extra-terrestre, dont on peut citer le rover Curiosity (NASA) et prochainement le rover Exo-Mars (ESA) ; le transport de biens et de personnes sur de longues distances (par exemple la livraison au dernier kilomètre par drones ou par droïdes mobiles) ; l'inspection et le ramassage automatiques des récoltes dans les champs ; la navigation maritime (e.g., le projet norvégien de développement du tout premier porte-conteneur autonome et entièrement électrique, le Yara Birkeland) ; et enfin les applications militaires telles que les missions de reconnaissance furtives sur les théâtres d'opérations militaires.

3.4.2 Les techniques traditionnelles de localisation

Le GNSS civil est à ce jour la principale méthode utilisée pour se localiser sur notre planète. On le retrouve dans une multitude d'objets du quotidien tels que les téléphones mobiles, les voitures, et même les montres connectées. Pourtant sa précision reste variable, avec une précision de l'ordre de $5m$ dans des conditions d'utilisation standard (e.g., pas de couverture nuageuse, peu ou pas d'occultation des signaux satellites, etc.). En environnement urbain, la précision du GNSS est altérée par les interférences électromagnétiques, aux effets de dérive, mais également les interruptions de signal dues aux occultations causées par les structures hautes telles que les immeubles (canyons urbains), les ponts ou même les



FIGURE 3.18 – Caricature de Flock montrant un robot utilisant une carte pour s'orienter.

arbres.

D'autres stratégies de navigation existent, à l'image des systèmes utilisant des caméras plus ou moins sophistiquées assurant une utilisation convenable en milieu extérieur selon les conditions d'éclairement. Toutefois, ces solutions sont généralement coûteuses en terme de mise en œuvre (temps de traitement de l'information élevé et nécessitant d'importantes ressources calculatoires). Des alternatives novatrices bio-inspirées font peu à peu leur apparition, à l'image des caméras dites événementielles (e.g., DAViS et DVS), c'est-à-dire ne détectant que les variations au niveau de chacun des pixels. On peut également citer l'emploi des magnétomètres et des centrales inertielles pour l'intégration d'informations proprioceptives propres au mouvement du véhicule ou du robot. Ces technologies sont cependant sensibles aux effets de dérive à long terme d'une part, et aux perturbations électromagnétiques d'autre part. Ces perturbations sont très présentes en milieu urbain et limitent ainsi leur application.

3.4.3 La bio-inspiration : un autre moyen de se localiser

Chaque système de navigation ainsi décrit présente son lot d'avantages et d'inconvénients au regard du contexte dans lequel il est employé. Des exemples de fusions de données existent déjà, à l'instar des projets de voitures autonomes impulsés par Google et Tesla, mais force est de constater que le Graal du système de navigation autonome reste à déterminer, pour peu qu'il existe ! Étant donné les connaissances de plus en plus fines sur les mécanismes d'orientation spatiale des animaux, qui finalement vivent dans un blackout permanent, et forts d'une démarche transdisciplinaire de cette problématique au sein de notre équipe, nous avons choisi de nous intéresser aux stratégies de navigation des fourmis du désert, particulièrement celles du genre *Cataglyphis* que l'on trouve sur le pourtour méditerranéen, ou encore les fourmis *Melophorus* qui vivent en Australie. Ces fourmis sont connues pour leurs aptitudes remarquables à s'orienter dans des environnements arides et hostiles. Ces navigatrices hors-pairs peuvent parcourir plusieurs centaines de mètres et retrouver leur nid sans utiliser de pistes phéromonales comme le font leurs cousines européennes. En effet, les fourmis du désert utilisent un ensemble d'informations proprioceptives et visuelles pour déterminer le chemin à prendre afin de rentrer au nid ou de retourner sur un lieu pour collecter de la nourriture.

Pour naviguer, les fourmis du désert peuvent utiliser plusieurs modes de localisation parmi lesquels on peut citer les deux principaux :

- l'intégrateur de chemin qui requiert des indices odométriques (comptage de foulées WITTLINGER, Rüdiger WEHNER et WOLF 2006, défilement optique du sol PFEFFER et WITTLINGER 2016) et d'orientation (polarisation de la lumière du ciel, KRAPP 2007 ; HOMBERG, HEINZE, PFEIFFER et al. 2011 ;

KRAPP 2014; GROB, FLEISCHMANN et RÖSSLER 2019);

- le guidage visuel permettant de retrouver un chemin par reconnaissance d'amers visuels, du profil de la ligne d'horizon, ou par comparaison avec des panoramas mémorisés préalablement (WYSTRACH, BEUGNON et CHENG 2011; WYSTRACH, BEUGNON et CHENG 2012).

L'intégrateur de chemin est souvent décrit comme le fil d'Ariane des fourmis du désert (Rüdiger WEHNER et S. WEHNER 1990). Un nombre conséquent d'études sur les fourmis du désert mais également d'autres insectes comme le criquet, le grillon, ou encore la sauterelle, ont cherché à comprendre les mécanismes de détection et d'analyse de la polarisation de la lumière du ciel afin d'en extraire une information de cap. Ces insectes sont capables de détecter l'angle de polarisation linéaire dans le domaine spectral ultraviolet (UV).

Au vu de ces éléments de littérature, le choix de l'intégrateur de chemin de la fourmi du désert comme alternative parcimonieuse aux techniques de navigation traditionnelles s'est naturellement imposé, soit en complément, soit en substitution. À ce jour, seul le projet Sahabot, mené par Lambrinos *et al.* à la fin des années 1990 à l'Université de Zurich, représente la toute première implémentation robotique d'un intégrateur de chemin biomimétique (LAMBRINOS, KOBAYASHI, PFEIFER *et al.* 1997; LAMBRINOS, MÖLLER, LABHART *et al.* 2000), sur un robot à roues plutôt qu'à pattes.

3.4.4 AntBot : un robot fourmi complètement autonome

La robotique hexapode bénéficie d'une histoire en recherche et développement vieille de 60 ans (DUPEYROUX 2019). En dépit de notre connaissance accrue des procédés de locomotion, aucun projet de navigation autonome ne semble avoir vu le jour avec de tels robots. J'ai ainsi participé à la conception d'un robot hexapode imprimé en 3D et qui s'inspire de la morphologie de la fourmi pour se déplacer. À des fins de bio-inspiration et de biomimétisme, ce robot insectoïde (Fig. 3.20), appelé AntBot, est équipé d'une boussole céleste à deux pixels (Fig. 3.19), sensible à la polarisation de la lumière du ciel en bande spectrale ultraviolette, reproduisant ainsi l'aire dorsale marginale de l'œil composé des fourmis (HOMBERG, HEINZE, PFEIFFER *et al.* 2011) qui détermine l'angle de polarisation de la lumière du ciel avec une précision de $0,4^\circ$. Cet angle est alors directement utilisé en tant que cap optique lorsque le robot navigue, au lieu d'utiliser classiquement un cap magnétique.

Le robot AntBot (Fig. 3.20) est également doté d'un capteur de flux optique (ou de défilement optique) constitué de seulement 12 pixels et permettant de

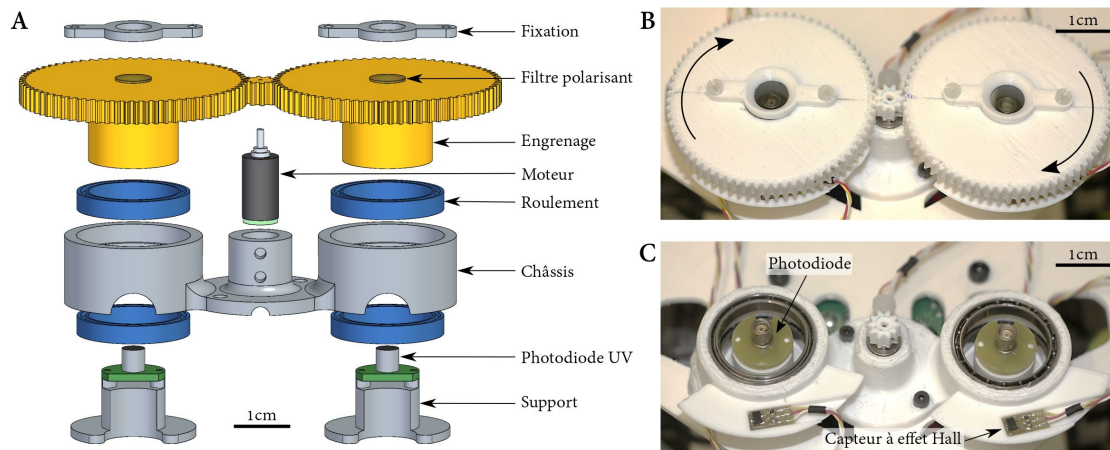


FIGURE 3.19 – Le compas céleste d’AntBot. A) Vue explosée en conception assistée par ordinateur du compas céleste. B) Photo du compas avec ses deux filtres polarisants rotatifs. C) Photo du compas montrant les deux pixels sensibles aux ultraviolets. Aucune optique n’est nécessaire pour focaliser la lumière et détecter un cap céleste. D’après DUPEYROUX, Julien R SERRES et Stéphane VIOLLET 2019.

mesurer la vitesse de déplacement du robot sans être perturbé par les variations abruptes de luminosité ambiante pouvant se produire en extérieur (Erik VANHOUTTE, MAFRICA, RUFFIER et al. 2017; DUPEYROUX, BOUTIN, Julien R SERRES et al. 2018). Cette vitesse optique est alors intégrée pour déterminer la distance parcourue. Enfin, AntBot est capable de compter ses foulées par simple mémorisation de sa commande motrice. La fusion de l’odométrie visuelle et du podomètre permet d’obtenir une estimation de distance très précise et robuste (erreur de localisation de 0,47%, Fig. 3.21).

Dans notre étude parue dans *Science Robotics*, AntBot a montré des performances de navigation remarquables, avec une erreur de localisation centimétrique 50 fois (voire 100 fois) inférieure à la précision du GNSS civil (Fig. 3.21). En outre, les retombées en termes de réflexion sur la plausibilité de ces modèles biologiques sont une raison significative de parier sur la robotique à pattes pour tester notre intégrateur de chemin. En effet, AntBot ne peut faire que des pas de 8,9 cm et des rotations de 10,9°, alors que l’erreur de positionnement n’est que de 6,7 cm en moyenne pour des trajets de 15 m. Ceci nous démontre que nous aurions pu atteindre une précision centimétrique avec un robot à roue, dont les déplacements peuvent se faire au centimètre près, là où un robot à pattes ne peut faire que des pas de plusieurs centimètres. Plus la taille du robot à pattes est grande, plus le pas est important, ceci montre une limite supplémentaire du robot AntBot, l’absence de réglage de longueur de pas, ce qui ouvre de nouvelles perspectives en terme de conception mécatronique pour de futures plateformes robotiques à pattes.

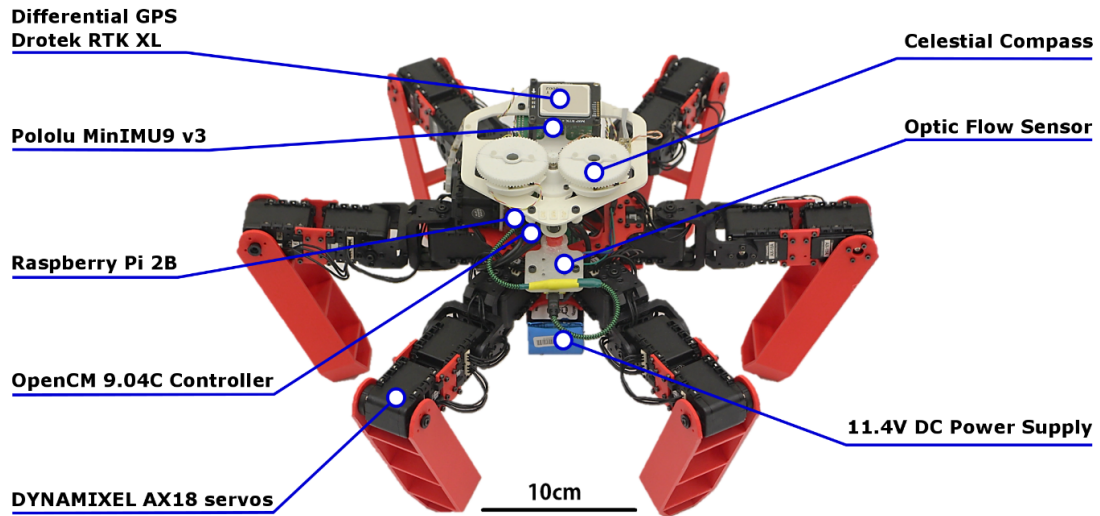


FIGURE 3.20 – Robot hexapode AntBot (2,3 kg). Description de l'ensemble de l'électronique et des capteurs bio-inspirés embarqué sur AntBot. D'après DUPEYROUX, Julien R SERRES et Stéphane VIOLET 2019.

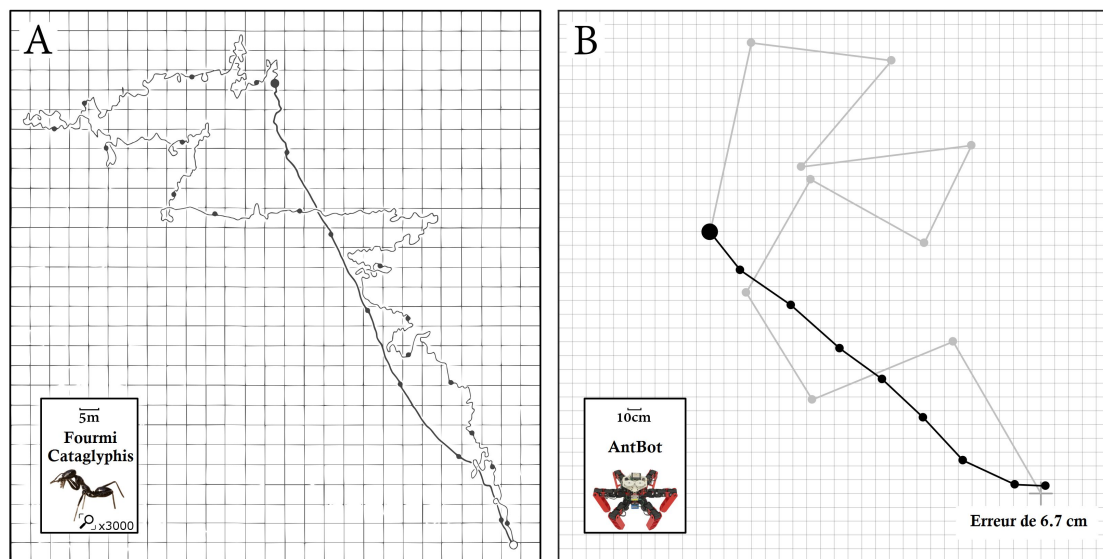


FIGURE 3.21 – Naviguer avec l'intégrateur de chemin de la fourmi. A) Performance de la fourmi du désert *Cataglyphis fortis* (Tunisie). Trajet aller de 592 m, puis un trajet retour direct vers le nid de 140 m. D'après Rüdiger WEHNER et S. WEHNER 1990. B) Performance du robot AntBot équipé des mêmes modalités sensorielles que la fourmi. L'erreur de localisation est en moyenne de 6,7 cm pour un trajet de 15 m, soit une erreur de 0,47%. D'après DUPEYROUX, Julien R SERRES et Stéphane VIOLET 2019.

3.5 Expliquer le contrôle d'altitude chez les abeilles

3.5.1 Objectif : décorréler le support informationnel visuel chez l'abeille

Ce projet [2016-2018] a impliqué deux équipes de l'ISM et fut financé par une action incitative interne de l'institut à hauteur de 4k€. Ce projet consistait à identifier des principes de contrôle robustes au sein du monde animal, basés sur la prise en compte de propriétés pertinentes du flux optique et utilisés lors de la réalisation de tâches de navigation spatiale, ici le contrôle d'altitude. Il s'agissait plus précisément de tester l'hypothèse selon laquelle des principes de contrôle communs sous-tendent le contrôle de tâches de navigation spatiale équivalentes (i.e., caractérisées par des contraintes similaires) chez des agents distincts (e.g., Homme et l'abeille). Des paradigmes de décorrélation et de restriction du support informationnel visuel permettent alors d'identifier les informations optiques effectivement prises en compte dans le contrôle des tâches de navigation spatiale. Les travaux sur le robot biomimétique OCTAVE avaient permis de démontrer que réguler une propriété du flux optique, i.e. la vitesse optique ventrale, permettait d'expliquer le décollage, le suivi de terrain, la réaction aux vents, et l'atterrissage, mais aussi l'observation selon laquelle les abeilles se noient inexorablement lorsqu'elles survolent une eau semblable à un miroir lisse pendant leur voyage (RUFFIER et Nicolas FRANCESCHINI 2005; Nicolas FRANCESCHINI, RUFFIER et J. SERRES 2007a; Julien R SERRES et RUFFIER 2017). Ce projet a concrètement consisté à construire un tunnel pouvant présenter aux abeilles un flux optique dont on pouvait restreindre, voire quasiment annuler le flux optique ventral. Pour se faire, nous avons imaginé utiliser une paire de miroirs, l'un au plafond, l'autre au sol, tous deux recouverts durant la condition contrôle par une bâche texturée (i.e., phase d'entraînement des abeilles). La condition double miroir permettant de complètement supprimer le support informationnel visuel ventral, cela devrait irrémédiablement conduire les abeilles au crash sur le miroir bas. À moyen terme, cela permettra de comprendre si l'abeille exploite une autre information visuelle que la vitesse optique ventrale en enrichissant le sol avec une autre information optique. À plus long terme, cela permettrait de rendre plus robuste le contrôle d'altitude des robots volants lorsque ces derniers survolent des environnements visuellement pauvres.



FIGURE 3.22 – Caricature de Grey Duck Garlic montrant une abeille se fiant au GPS.

3.5.2 Les abeilles, qui survolent un miroir, s'écrasent irrémédiablement

Pour contrôler leur altitude dans un tunnel, les abeilles peuvent exploiter des stimuli visuels rencontrés dans un tunnel et consistent principalement en un motif de flux optique généré par les textures et par les bords formant la perspective du tunnel. Les abeilles mellifères *Apis Mellifera* en vols sont connues pour être particulièrement sensibles au flux optique généré par la configuration optique du tunnel pour ajuster leur altitude (BAIRD, SRINIVASAN, S. ZHANG et al. 2006; PORTELLI, J. SERRES, RUFFIER et al. 2010; SRINIVASAN 2011; PORTELLI, Julien R SERRES et RUFFIER 2017). Récemment, des abeilles ont été entraînées à suivre un tunnel comprenant un “fossé dorsal” à mi-chemin (PORTELLI, Julien R SERRES et RUFFIER 2017). Les abeilles se sont immédiatement adaptées à cette nouvelle configuration de tunnel en s'élevant rapidement vers le nouveau plafond plus haut, tout en gardant une vitesse d'avance similaire, mais aussi une distance similaire et un flux optique dorsal similaire à celui observé lors de l'étape d'entraînement. Inversement, les abeilles entraînées à suivre le sol ont continué à suivre le sol sans tenir compte du changement de hauteur du plafond (PORTELLI, Julien R SERRES et RUFFIER 2017).

J'ai ensuite poursuivi mes travaux sur l'étude du rôle des indices visuels dorsaux et ventraux impliqués dans le contrôle de l'altitude des abeilles en cherchant à reproduire quantitativement l'expérience fondamentale de HERAN et LINDAUER 1963. En 1963, Heran & Lindauer entraînèrent des abeilles à voler au-dessus d'une surface d'eau dormante. Lorsque la surface de l'eau était ondulée ou lorsqu'un pont flottant offrait des contrastes visuels, les abeilles pouvaient traverser le lac. En revanche, les abeilles qui traversaient une eau tel un miroir lisse pendant leur voyage en quête de nourriture volaient de plus en plus bas jusqu'à ce qu'elles s'écrasent la tête la première dans l'eau (HERAN et LINDAUER 1963). Pour répliquer expérimentalement un tel comportement dans un tunnel de vol, j'ai pris l'initiative de former un groupe de 4 chercheurs (moi-même, Franck Ruffier (DR2 CNRS section 7), Gilles Montagne (PU, CNU74), et Antoine Morice (MCF, CNU74)). Nous avons alors décidé de construire une illusion d'optique utilisant un miroir placé sur le sol recouvert de textures durant la session d'entraînement (cf. [la vidéo YouTube décrivant la procédure expérimentale](#)). Dans une première session, les abeilles ont été entraînées à suivre le sol pendant 16 essais (Julien R SERRES, A. H. MORICE, BLARY et al. 2019, voir affiche page suivante). Au cours d'une deuxième séance, le demi miroir bas a été découvert (Julien R SERRES, A. H. MORICE, BLARY et al. 2019, voir affiche page suivante), créant un “fossé ventral” virtuel, où l'on voit de manière spectaculaire s'écraser les abeilles sur le miroir du bas (voir affiche page suivante). Nous pouvons alors en conclure que les entrées visuelles ventrales sont cruciales pour le contrôle de l'altitude chez les abeilles (Julien R SERRES, A. H. MORICE, BLARY et al. 2019, cf. page suivante).

Honeybees flying over a mirror crash irremediably

Julien R. Serres, Antoine H.P. Morice, Constance Blary, Gilles Montagne, and Franck Ruffier

Aix Marseille University, CNRS, ISM, Marseille, France

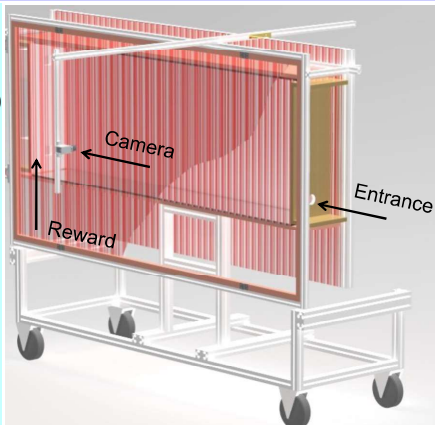
Corresponding author: julien.serres@univ-amu.fr



Aim: To investigate if the ventral optic flow is crucial to control honeybees' altitude (*Apis mellifera*)

Experimental set-up

- Flight tunnel: 25x71x200 cm
- 1.3 first meters recorded
- 100Hz DALSA Genie HM640
- 4 groups of honeybees
- 15 honeybees per group
- 5 distinct optical contexts

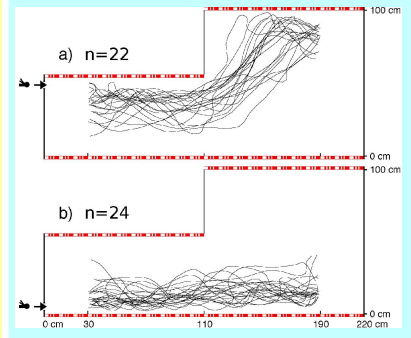


"Preferred optic flow pattern" Hypothesis

- Honeybees follow surface in tunnel, such as the floor (or the ceiling).
- Honeybees adjust their altitude to restore a ventral (or dorsal) optic flow set-point.
- A ventral (or a dorsal) optic flow pattern seems to be learned by honeybees during the training session.

See references [1-5]

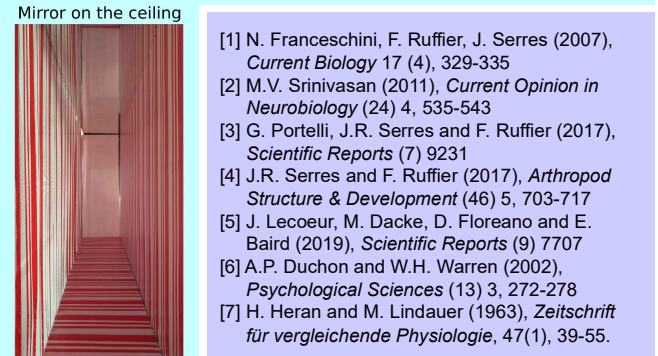
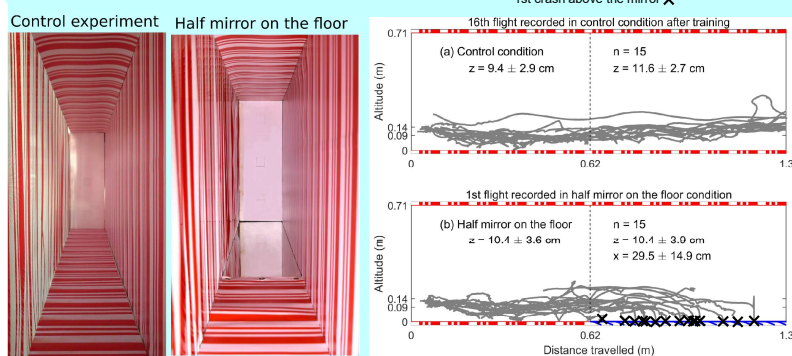
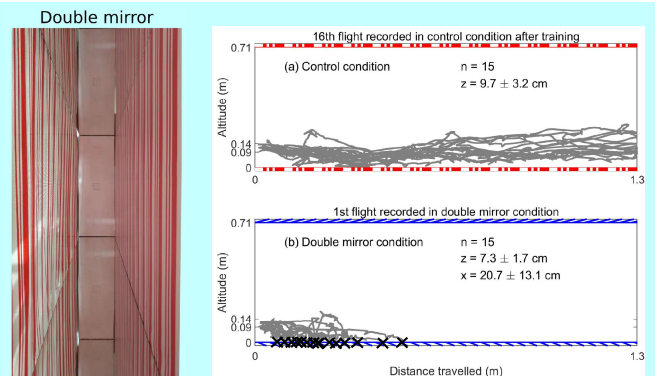
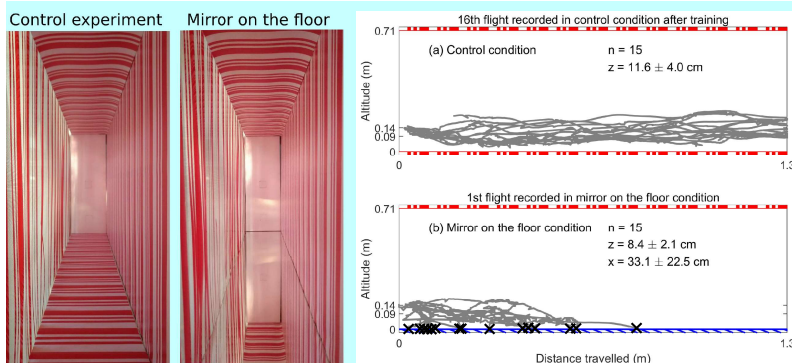
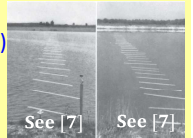
Are still honeybees able to fly without ventral optic flow?



See Portelli, Serres & Ruffier (2017) [3]

Results: Without ventral optic flow, honeybees crash irremediably on the floor

- A pair of mirrors on the floor and ceiling can be independently uncovered to suppress any ventral/dorsal optic flow.
- The double mirror condition reproduces the visual uncoupling condition in connection with the work of the Duchon & Warren (2002) [6]. The honeybee's visual informational support can be therefore uncorrelated between the horizontal and the vertical planes.
- Our study reproduces the seminal experiment of Heran & Lindauer (1963) [7]. They trained honeybees to fly above a water surface. When the water surface was provided a visual contrast, honeybees were able to cross the lake. Otherwise, they drowned.



- [1] N. Franceschini, F. Ruffier, J. Serres (2007), *Current Biology* 17 (4), 329-335
- [2] M.V. Srinivasan (2011), *Current Opinion in Neurobiology* (24) 4, 535-543
- [3] G. Portelli, J.R. Serres and F. Ruffier (2017), *Scientific Reports* (7) 9231
- [4] J.R. Serres and F. Ruffier (2017), *Arthropod Structure & Development* (46) 5, 703-717
- [5] J. Lecoq, M. Dacke, D. Floreano and E. Baird (2019), *Scientific Reports* (9) 7707
- [6] A.P. Duchon and W.H. Warren (2002), *Psychological Sciences* (13) 3, 272-278
- [7] H. Heran and M. Lindauer (1963), *Zeitschrift für vergleichende Physiologie*, 47(1), 39-55.

Conclusion

- Half low mirror condition reveals honeybees do not directly crash into the down mirror, but go on to fly before crashing.
- Honeybees do not rely on ventral optic flow directly at right angle to fly over the floor, but instead, rely on the overall ventral optic flow pattern.
- Lateral visual inputs alone do not allow honeybees to control their altitude. Dorsal manipulations alone do not affect honeybees' flight.

3.6 Expliquer le contrôle d'altitude chez les oiseaux

Lorsque les goélands volent vers l'avant, la mer balaie leur champ visuel d'avant en arrière. Le "flux optique" leur fournit des informations cruciales sur leur propre vitesse sol et leur hauteur de vol (Fig. 3.23). La perception de ce flux optique serait-elle impliquée dans une sorte de « pilote automatique » ? C'est ce que j'ai démontré en collaborant avec une équipe européenne [2015-2019], j'ai alors développé un modèle mathématique de contrôle d'altitude appelé « régulateur de flux optique » appliqué à l'oiseau, mais connu chez l'insecte de par mes travaux antérieurs (Nicolas FRANCESCHINI, RUFFIER et J. SERRES 2007a ; Julien R SERRES et RUFFIER 2017 ; PORTELLI, Julien R SERRES et RUFFIER 2017). Ce nouveau modèle prédit l'altitude de vol des goélands en fonction de sa vitesse et des conditions météorologiques du vent. Ces travaux ont été tout d'abord présentés à une conférence internationale (J. SERRES, EVANS, ÅKESSON et al. 2017), puis publiés dans la revue *Royal Society Interface* (Julien R SERRES, EVANS, ÅKESSON et al. 2019).

Au milieu des années 2000, le « régulateur de flux optique » avait été mis en évidence chez les insectes ailés au moyen d'une démarche biorobotique (Nicolas FRANCESCHINI, RUFFIER et J. SERRES 2007a). Cette fois-ci, c'est chez l'oiseau que ce même mécanisme de pilotage fut démontré. Pour cela, j'ai développé un modèle particulier guidant le vol pour les goélands, puis j'ai comparé mon modèle aux données de suivi télémétrique (positions GPS en 3D) de plusieurs goélands volant au-dessus de la mer Baltique (Fig. 3.24).

On sait aujourd'hui que les prouesses en vol des oiseaux reposent en partie sur leur capacité à percevoir le flux optique provenant du sol ou de la mer : chez l'oiseau, il existe des neurones spécialisés dans la vision du mouvement. Ainsi, lorsqu'un oiseau vole au-dessus de la mer, l'image de la mer défile d'avant en arrière dans la partie ventrale de son champ visuel, créant ainsi un « flux optique ». Ce défilement optique est égal au quotient de la vitesse horizontale et de l'altitude. Ce que nous appelons un « régulateur de flux optique » est un contrôleur d'altitude qui va maintenir à une valeur constante ce flux optique, donc le quotient vitesse/altitude. Si l'oiseau vient à changer de vitesse, le contrôleur de vol en question agira automatiquement sur sa force de sustentation, ici les battements d'ailes, pour changer d'altitude de manière à maintenir constant le quotient entre ces deux grandeurs. Un animal ajustant son altitude sur la base de ce quotient vitesse/altitude n'a besoin de mesurer ni sa vitesse ni son altitude.

À la base de ces comportements étonnants se trouvent, cachés dans la tête de l'oiseau, des neurones sensibles à des mouvements spécifiques qui sont de véritables capteurs de flux optique. L'équipe européenne (Suède, Pays-bas, Royaume-Uni, France) que j'ai soudée, suggère que les neurones LM (*pretectal nucleus lenti-*

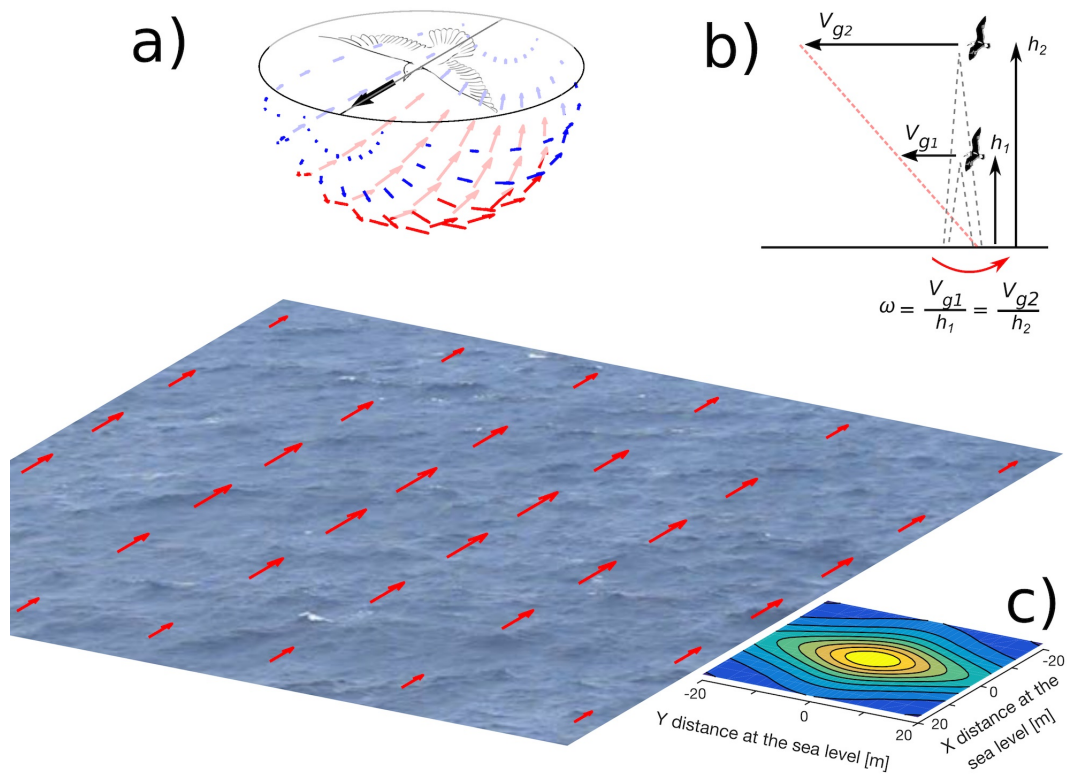


FIGURE 3.23 – a) Un goéland volant au-dessus de la mer génère un champ vectoriel de flux optique. Un tel champ vectoriel est perçu par un goéland en fonction des contrastes créés notamment par les crêtes des vagues. b) L'amplitude du vecteur de flux optique est déterminée par la vitesse d'avance du goéland et son altitude. Si le flux optique est maintenu constant en ajustant l'altitude, l'altitude aura toujours tendance (à travers la dynamique de l'oiseau) à être proportionnel à la vitesse d'avance (seule une combinaison linéaire - ligne pointillée rouge - entre l'altitude et la vitesse d'avance est asymptotiquement possible). c) Amplitude du flux optique dans le champ de vision ventral de l'oiseau à une hauteur de 10 m : l'amplitude du flux optique ventral est maximale à l'aplomb. D'après Julien R SERRES, EVANS, ÅKESSON et al. 2019.

formis mesencephali) présents chez les oiseaux, ceux même dédiés à la détection du mouvement, sont sans doute les neurones impliqués dans ce contrôle d'altitude guidé visuellement. Lorsqu'un goéland décolle en mer pour revenir à son nid, il bat des ailes : ceci augmente sa vitesse d'avance. Son régulateur de flux optique le mènera à une augmentation de sa force de portance (sustentation), pour maintenir son flux optique à la valeur de référence jusqu'à ce que l'oiseau atteigne sa vitesse de croisière, valeur lui permettant de maximiser l'efficacité énergétique de son vol (Julien R SERRES, EVANS, ÅKESSON et al. 2019).

Nous avons également observé statistiquement que plus le vent était favorable



FIGURE 3.24 – Goéland (*Larus fuscus*) volant au-dessus de la mer Baltique. L'état de la mer pendant que les goélands volent est généralement de 3 à 4 sur l'échelle de Beaufort. Crédit photographique : Aron Hejdström. D'après Julien R SERRES, EVANS, ÅKESSON et al. [2019](#).

(venant de l'arrière), plus les oiseaux augmentaient leur altitude, et réciproquement, ce qui s'explique également par un pilote automatique basé sur un « régulateur de flux optique ». Le contrôleur de vol proposé, pourtant fort simple, permet de rendre compte de 50 ans d'observations en ornithologie, souvent surprenantes et conduites (par exemple au radar) dans les années 60. Il permet d'expliquer le fait que les oiseaux effectuant un vol directionnel (une migration, ou un retour au nid), volent à basse altitude par vent de face et s'élèvent par vent arrière. Ces travaux montrent que le contrôle d'altitude chez le goéland se fait sur la base du flux optique sur la zone 0 – 120 m, et que pour ajuster finement son altitude dans cette zone, le goéland ne saurait d'ailleurs se fier, ni à une vision binoculaire stéréoscopique (de 15-30° chez le goéland, contre 120° chez l'humain ; MARTIN [2017](#)), ni à son organe paratympanique (le baromètre interne des oiseaux - dont la résolution n'est que de ~ 10 m, voir Julien R SERRES, EVANS, ÅKESSON et al. [2019](#) pour les détails).

Abeille, goéland...mais sans doute les pilotes aussi procède de la sorte lorsqu'il vole à basse altitude ! En effet, des observations fort semblables à celles des abeilles s'écrasant sur une dormante (HERAN et LINDAUER [1963](#)) ou sur un miroir (Julien R SERRES, A. H. MORICE, BLARY et al. [2019](#)) se sont faites "naturellement" dans les années 1930, avec des pilotes d'hydravions qui appréhendaient plus que tout leur descente sur un lac aux eaux dormantes (cf. documentaire [Seeing like a fly](#) from K. Schagen, VPRO, Utrecht, Hollande, 2007).

3.7 Concevoir une assistance visuelle au pilotage

Cette étude est le fruit d’une collaboration entre l’ONERA de Salon-de-Provence (Thomas Rakotomamonjy, IR) et l’ISM (Antoine Morice MCF CNU74, Franck Ruffier DR2 CNRS section 7, et moi-même MCF CNU74). Sa finalité vise à fournir une augmentation visuelle aux pilotes en situation d’apportage difficile pour les aider à minimiser l’énergie à l’impact de l’hélicoptère sur le pont (MATHIEU, PEREIRA FIGUEIRA, Julien R SERRES et al. 2019 ; THOMAS, PEREIRA FIGUEIRA, Julien R SERRES et al. 2021). Pour cela, nous avons testé les avantages de l’augmentation visuelle fondée sur les principes de la psychologie écologique (GIBSON 1950 ; GIBSON 1966 ; GIBSON 1979) pour aider à l’atterrissage d’hélicoptères sur des navires dans un simulateur à base fixe de type CAVE (*Cave Automatic Virtual Environment*). Nous avons émis l’hypothèse que les pilotes pourraient utiliser une stratégie perceptivo-moteur consistant à maintenir la variable optique $\dot{\tau}$ autour de -0,5, comme cela fut démontré précédemment dans la tâche de freinage d’une automobile avant un arrêt (MARTI, A. H. MORICE et MONTAGNE 2015). Notre approche, pour concevoir les augmentations visuelles, s’appuie sur les connaissances en sciences du mouvement humain, l’analyse des tâches d’atterrissage des hélicoptères et l’ergonomie. Nous avons alors alimenté le couplage perceptivo-moteur naturel des pilotes avec des informations supplémentaires portant entre autres sur la variable $\dot{\tau}$ (Fig. 3.25). Nos résultats montrent que la disponibilité d’une telle augmentation améliore le comportement des pilotes au niveau de la performance (i.e., diminution du temps d’atterrissage) et au niveau de la cinématique (i.e., meilleure gestion de la décélération et utilisation des commandes collectives). Ces premiers résultats montrent des bénéfices à utiliser la réalité augmentée pour les situations d’atterrissage réelles mais aussi d’un point de vue théorique vis-à-vis de la compatibilité des informations artificielles pour alimenter le couplage information-mouvement naturel des pilotes (A. H. P. MORICE, RAKOTOMAMONJY, Julien R SERRES et al. 2020 (soumis)).

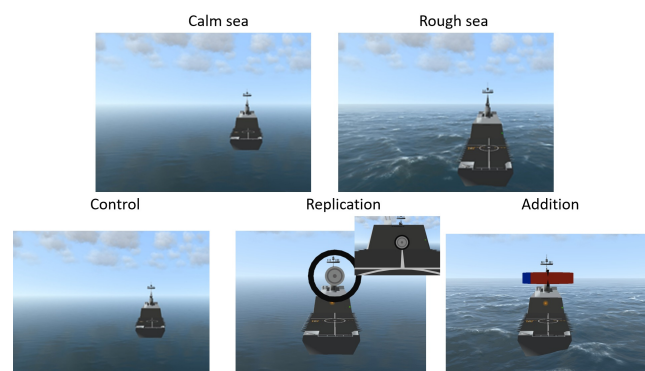


FIGURE 3.25 – Aperçu des contenus spécifiques de l’environnement virtuel en fonction de l’Environnement et de la manipulation d’Augmentation. D’après A. H. P. MORICE, RAKOTOMAMONJY, Julien R SERRES et al. 2020 (soumis).

4 Perspectives de recherche

Sommaire

4.1	Valorisation actuelle des mes recherches	85
4.1.1	Robotique de service : projet MIMICOMPAS	85
4.1.1.1	État de l'art - Concurrent direct : SkyPASS	86
4.1.1.2	Objectifs du projet MIMICOMPAS	89
4.1.2	Automobile : partenariat ISM/PSA OpenLab 2.0	91
4.2	Unifier et clarifier les théories sur le guidage visuel des insectes volants	93
4.2.1	Le contrôle d'altitude chez les insectes volants exploite t-il différents invariants optiques ?	93
4.2.2	Les affordances existent-elles chez les insectes volants ?	97
4.3	Perspectives de recherche à plus long terme	99
4.3.1	Conception de capteurs optiques innovants	99
4.3.2	Conception de plateforme robotique innovante	100
4.4	Appels d'offres scientifiques obtenus	101

4.1 Valorisation actuelle des mes recherches

4.1.1 Robotique de service : projet MIMICOMPAS

Le projet MIMICOMPAS fait l'objet d'une déclaration d'invention (n°19D088) auprès de la SATT Sud-Est (ref. 1205). Ce projet sera subventionné à hauteur de 20k€ pour l'année 2020. Le but de cette pré-maturation est de dessiner les contours d'une boussole céleste à bas coût compatible avec les contraintes de la robotique de service.

La navigation autonome constitue l'un des enjeux majeurs de notre époque. Il est donc impératif d'augmenter la précision et la fiabilité des systèmes de navigation pour mieux se localiser dans l'espace, et par conséquent optimiser les trajets des différents besoins de mobilité. En s'inspirant des modalités sensorielles des fourmis du désert, il est possible aujourd'hui de concevoir de nouveaux capteurs optiques permettant de se localiser avec une précision centimétrique plutôt que métrique. Ainsi, en observant simplement les propriétés optiques du ciel en bande spectrale ultraviolette, le robot marseillais dénommé "AntBot" fut capable de s'orienter et de revenir à sa base avec une précision 100 fois meilleure que

celle du GNSS¹, sans pour autant avoir besoin d'une infrastructure supplémentaire dédiée, ni émettre des ondes électromagnétiques polluantes et gourmandes en énergie pour se localiser tel que le déploiement d'un réseau national RTK² constitués de balises actives émettrices ou du réseau mobile (LAHAYE et LADET 2014). Utiliser un réseau RTK avec ses propres antennes permettrait d'atteindre une précision de localisation centimétrique, mais celle-ci dépendrait de la distance à l'antenne (e.g., distance maximale de travail 15 km autour de l'antenne), ou bien utiliser un réseau RTK des opérateurs mobiles, ce qui vous garantit une précision de 4 cm mais nécessite de payer un abonnement annuel pour bénéficier de ce service qui permet de corriger votre position GNSS.

4.1.1.1 État de l'art - Concurrent direct : SkyPASS

La géolocalisation par satellite permet de se localiser, mais sa précision dans le domaine civil stagne à 5 mètres dans des conditions optimales de réception des signaux satellites (RENFRO, STEIN, BOEKER et al. 2018). A l'aube de la navigation autonome pour les véhicules en tout genre, les automobiles, les drones et autres robots, l'amélioration de la précision de la localisation requiert le développement de nouvelles solutions. Les stratégies actuelles recourent à la fusion de données issues de nombreux capteurs, incluant le GNSS, les centrales inertielles (accéléromètre, gyroscope, et magnétomètre), les lidars et les caméras embarquées (FALLON 2018 ; MUEGGLER, REBECQ, GALLEG0 et al. 2017). Néanmoins, il serait bien trop coûteux d'installer autant de capteurs sur un robot de livraison au dernier kilomètre, un drone de service (inspection de superstructure, éoliennes, ou de lignes électriques, par exemple), ou bien un robot de tonte.

Chaque solution technologique comporte des avantages et des inconvénients en fonction des conditions environnementales. La précision du GNSS se dégrade rapidement avec la couverture nuageuse et les interférences en milieu urbain liées aux occultations des signaux GNSS mais aussi à cause des infrastructures métalliques et électriques (e.g. inspection des lignes électriques, inspection des éoliennes). Quant aux centrales inertielles, elles dérivent au cours du temps. Enfin, les caméras offrent une excellente perception de l'environnement ; toutefois, ces performances s'obtiennent au prix d'un important besoin en ressources calculatoires et mémoire de stockage. De plus, la navigation visuelle peut facilement être mise en défaut, notamment en cas de forte variation de luminosité. Déterminer un cap sans nécessiter de mesures électromagnétiques est intéressant, d'autant que [les modèles magnétiques de la Terre](#) ne fournissent pas une mesure robuste de cap absolu via un compas magnétique (CHULLIAT, MACMILLAN, AL-

1. GNSS : nom donné aux systèmes utilisant des satellites pour calculer la position, la vitesse et l'altitude d'un mobile placé en tout lieu et notamment sur la surface de la terre. Le plus connu est le GPS (Américain). Ces concurrents sont Glonass (Russe), Galiléo (Européen) et Beidou (Chinois).

2. RTK : Real Time Kinematic, ou cinématique temps réel, une technologie associée au GNSS.

KEN et al. 2015). Par ailleurs, on observe depuis quelques décennies une accélération de la migration du pôle Nord du Canada vers la Norvège sans pour autant en comprendre les mécanismes ni le devenir (WITZE 2019, Fig. 4.1). Disposer d'une mesure de cap optique en complément d'une mesure de cap magnétique permettrait donc de fiabiliser les futurs systèmes de localisation permettant une navigation fine dans l'espace.

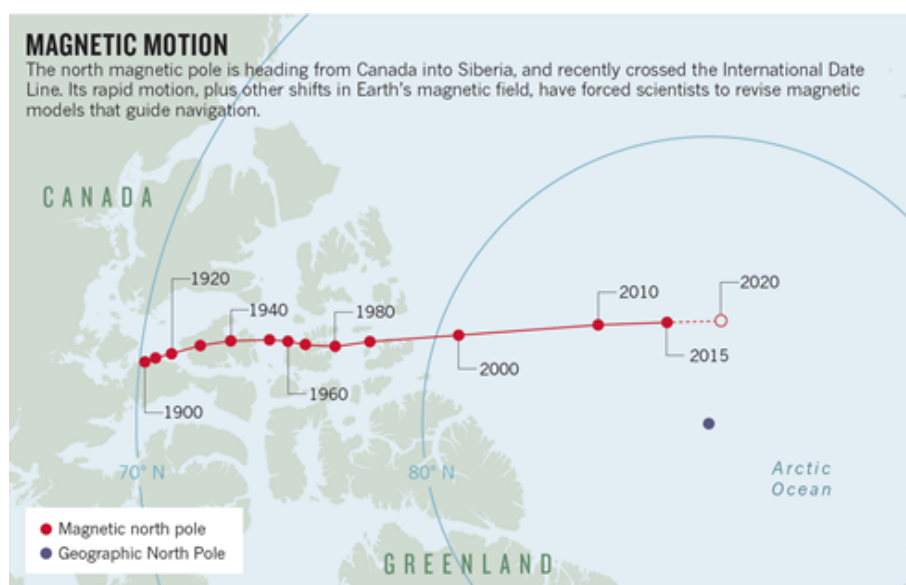


FIGURE 4.1 – Le pôle Nord (pôle sud magnétique) se déplace en accélérant depuis quelques décennies du Canada vers la Norvège. Il a récemment franchi la ligne de démarcation internationale. Son mouvement rapide, ainsi que d'autres changements dans l'âge magnétique de la Terre, forcent actuellement les scientifiques à réviser les modèles magnétiques qui guident la navigation. Néanmoins son évolution demeure difficile à prédire. D'après WITZE 2019.

Il est techniquement possible de parvenir à une bonne localisation en fusionnant toutes ces données, mais il est nécessaire d'assurer la sécurité des déplacements, dans toutes les conditions et quel que soit le milieu en évolution permanente en exploitant toutes les propriétés physiques du milieu ainsi que tout le spectre électromagnétique à disposition. La boussole céleste bio-inspirée MIMI-COMPAS ne viendrait pas en remplacement de technologies existantes telles que la géolocalisation ou le compas magnétique, mais en complément, redondance, en cas de défaut de mesure de ces capteurs dits conventionnels ; tout en visant l'amélioration de l'efficacité énergétique des déplacements.

Polaris Sensor Technologies, Inc. est un fabricant américain de capteurs optiques fonctionnant dans le visible et exploite ce phénomène fondamental de la lumière atmosphérique se polarisant dans le ciel afin de révéler des détails non détectés par d'autres dispositifs d'imagerie. Polaris Sensor Technologies, Inc. a développé une méthode de mesure de l'orientation absolue dans un environne-

ment sans GNSS, dénommé **SkyPASS** (AYCOCK, CHENAULT, LOMPADO et al. 2018, Fig. 4.2).



FIGURE 4.2 – Compas céleste SkyPASS Gen3 commercialisé aux États-Unis par Polaris Sensor Technologies, Inc.. Le module SkyPASS pèse $\sim 370\text{ g}$ pour une taille de $8 \times 2,5 \times 5\text{ cm}$. D’après polarissensor.com.

La technologie SkyPASS exploite des images polarisées obtenues dans le visible au moyen d’une caméra conventionnelle (mode diurne uniquement), réalise ensuite du “*pattern matching*” (i.e., mise en correspondance avec des images de référence) sur deux indices optiques : la distribution d’angle de polarisation et le degré de polarisation du ciel. SkyPASS compense également les mouvements du soleil au moyen d’une fonction éphéméride (i.e., ce qui nécessite de connaître sa localisation sur Terre et la date des mesures). Actuellement SkyPASS Gen3 se commercialise au prix de 25 000\$ hors taxe (le coût d’acquisition d’une unité pour l’Europe pourrait atteindre les 36 000\$ pièce). A cette heure, SkyPASS n’est pas autorisé à être vendu hors des Etats-Unis, car dépourvu de licence d’exportation. Sur la base d’un imageur fonctionnant en ultraviolet, la méthode MIMICOMPAS mise en œuvre par notre capteur à bas coût sera complètement différente de SkyPASS, et visera la robotique de service (coût du capteur inférieur à 1 000€, soit au moins 25 fois moins cher que la version américaine). SkyPASS pèse $\sim 370\text{ g}$ pour une taille de $8 \times 2,5 \times 5\text{ cm}$. MIMICOMPAS par une détection en UV et un traitement de l’information visuelle de manière bio-inspirée fournira un cap en dépit de la couverture nuageuse, la brume, et le brouillard et d’éventuelles occlusions visuelles dans le ciel en ville causées par les structures ou bien les feuillages des arbres. Par ailleurs, SkyPASS génère une fréquence de mesure à 1Hz, ce qui ne permet pas un asservissement temps réel du robot de service, terrestre peut-être, mais pas aérien. Notre approche bio-inspirée permettra d’atteindre des fréquences de mesure supérieures à 10 Hz, voire plus, du fait de notre faible nombre de pixels UV (i.e., quelques centaines), contre plusieurs millions pour SkyPASS. Par ailleurs, MIMICOMPAS vise aussi à explorer la détection de cap céleste de nuit, pour étendre les possibilités de mesure 24/7 sous toutes conditions.

En 1949, l'armée américaine fit l'acquisition de quatre *Pfund sky compass* pour équiper son aviation (MOODY 1950). En effet, durant la guerre froide, surveiller l'Alaska et franchir le pôle Nord pour bombarder l'URSS était vital sur le plan militaire. Le lieutenant-commandant Alton B. Moody rapporte que le *Pfund sky compass* avait une précision de cap de 1° , que les calculs pouvaient être conduits aussi bien de jour lorsque le soleil était sous l'horizon, ou bien de nuit lorsque la lune était aussi sous l'horizon. La nuit offrant 1/450 000 fois moins de luminosité que le jour. Seule la couverture nuageuse pouvait contrevenir à la mesure de cap céleste. Finalement le compas SkyPASS est une re-découverte américaine de son propre *Pfund sky compass*. En 1954, Scandinavian Airlines (SAS) a lancé le premier vol régulier de passagers entre Copenhague (Danemark) et Los Angeles (État-Unis), [le premier raccourci polaire au monde](#). Cette nouvelle liaison a permis de réduire la durée du voyage entre la Californie et la Scandinavie de 36 à 22 heures. SAS a apporté d'autres améliorations et a utilisé le compas céleste pendant de nombreuses années sur ses vols polaires. Aujourd'hui, tout un chacun peut construire son propre compas céleste en visitant ce [site internet allemand](#).

"[La nouvelle guerre du GPS et ses risques](#)" vient de naître (GUIBERT 2019), plutôt comprendre "la nouvelle guerre de la localisation et les risques du tout communiquant". En ce qui me concerne, il existera à l'horizon 2030, i.e. d'ici le déploiement de la 5G, un problème de sécurité nationale dans nos futurs "smart cities" hyper connectées. Nos infrastructures communicant avec les véhicules autonomes ou autres robots pourront être victimes de désorientation. La menace n'est donc pas seulement la perte du signal ou de la communication liée à la configuration environnementale, mais bel et bien des actions malveillantes tant sur les plans civils que militaires. Par conséquent, copier le système de navigation des insectes et des animaux en général, sera donc non seulement un enjeu industriel majeur pour l'Europe mais aussi un enjeu en terme de défenses nationale et européenne au cours de ce siècle. En prendre conscience est le premier pas vers la résolution de ce problème qui finira par émerger.

4.1.1.2 Objectifs du projet MIMICOMPAS

Le projet MIMICOMPAS (Fig. 4.3B) a pour objectifs de lever les verrous technologiques du dispositif expérimental AntBot pour en faire un véritable instrument de navigation compatible avec la robotique de terrain et les contraintes de l'industrie robotique. Tout d'abord, AntBot était composé d'un mécanisme entraînant en rotation des filtres polariseurs dans le but de scanner la voûte céleste (Fig. 4.3A). Cette astuce permettait de minimiser le nombre de pixels à deux (Fig. 4.3A), mais de fait, limite la fréquence d'acquisition de l'information optique car il fallait attendre une rotation complète (de 4 à 20 secondes) pour estimer un cap optique, limitant de facto son utilisation temps réel. AntBot est un prototype encombrant et lent en termes de temps acquisition à cause du dispositif méca-

nique. En effet, il faut attendre entre 4 et 20 secondes pour faire une mesure. Par ailleurs, le dispositif de détection avait été conçu pour des applications diurnes et non nocturnes, il s'agira donc de construire une électronique compatible avec un fonctionnement 24/7 sous toutes conditions météorologiques. Enfin, l'astro-navigation nécessite de compenser les mouvements des astres (ici le Soleil ou la Lune), pour se faire, il faudra développer les algorithmes prédisant leurs positions à partir des acquisitions pour estimer correctement le cap 24/7.

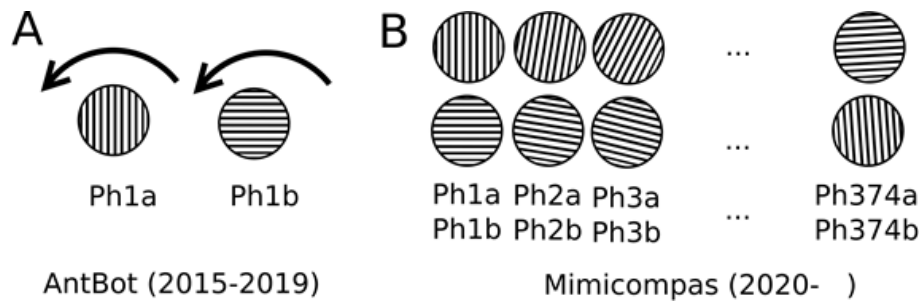


FIGURE 4.3 – A. Version de la boussole céleste équipant le robot AntBot. Une seule paire de photorécepteurs sensibles à l'UV (Ph1a & Ph1b), surmontée de filtres polarisants entrainés en rotation, scanne la voûte céleste. B. Version de la boussole céleste MIMICOMPAS. Il n'y a plus de système de rotation mais cela nécessite un nombre beaucoup plus important de photorécepteurs UV et de filtres polarisants. Pour atteindre le même niveau de performance en étant 200 fois plus rapide, il est nécessaire d'utiliser deux rangées de 374 photorécepteurs UV (Ph1a-Ph374a et Ph2b-Ph374b).

Le projet MIMICOMPAS aura pour objectifs de lever les verrous technologiques suivants :

- ☐ construire un instrument de navigation 200 fois plus rapide d'AntBot pour permettre une mesure "temps réel" du cap optique du robot ;
- ☐ caractériser la disponibilité du signal UV par forte couverture nuageuse, la brume, ou bien le brouillard, de jour, mais également effectuer des mesures de nuit ;
- ☐ construire une électronique auto-adaptative capable de s'adapter aux conditions de luminosité de jour comme de nuit, cela permettra d'élargir la plage d'utilisation horaire du capteur ; étudier l'influence de la sensibilité angulaire des pixels sur la précision de la mesure du cap céleste ;
- ☐ développer de nouveaux algorithmes permettant de démoduler la phase de la loi d'Étienne Louis Malus (1809, CHAPPERT [1977](#)) ;
- ☐ développer de nouveaux algorithmes de calcul de cap optique permettant de s'affranchir de la courbe des astres solaire et lunaire pour compenser les dérives de mesure.

4.1.2 Automobile : partenariat ISM/PSA OpenLab 2.0

Dans le cadre du partenariat ISM/PSA OpenLab 2.0 renouvelé sur la période 2020-2024, une thèse CIFRE a débuté sur la période Novembre 2019 - Octobre 2022 en recrutant Léo Poughon sur le sujet de thèse “Utilisation de la polarisation ultraviolette pour l’obtention d’un cap en automobile”, classé dans l’Axe 4. "Light in car", Action 4.2 UV Polarisation. Cette thèse CIFRE inclut un contrat d’accompagnement de 50k€ pour 3 ans.

Dans le cadre du véhicule autonome, un système de localisation le plus fiable et disponible possible est nécessaire. La localisation est une brique essentielle pour la conduite autonome. L’élément principal de ces systèmes de localisation est le système de positionnement par satellite (GNSS).

Cependant, différents éléments peuvent perturber ces systèmes de positionnement par satellite :

- activité ionosphérique (éruptions solaires, par exemple) ;
- interférences avec d’autres systèmes émettant des radiofréquences (intentionnelles ou non-intentionnelles) ;
- zones urbaines denses (dans ces zones, les bâtiments peuvent bloquer totalement les signaux GNSS ou générer des réflexions parasites par réflexion).

Une autre limitation des systèmes actuels est liée aux exigences de sûreté de fonctionnement pour le véhicule autonome. Actuellement, il n’existe pas de solution pouvant garantir le niveau de “*safety*” demandé pour un véhicule de niveau 3, une redondance est donc nécessaire. De plus, les solutions existantes permettant de garantir le bon niveau de précision et l’intégrité du positionnement nécessaires au véhicule autonome sont aujourd’hui très chères. Pour pallier aux limitations des systèmes de navigation actuels décrits précédemment, nous proposons de développer un compas optique basé sur un principe bio-inspiré issu d’études comportementales menées chez la fourmi du désert *Cataglyphis* (MÜLLER et Rüdiger WEHNER 1988 ; M. COLLETT, T. S. COLLETT, BISCH et al. 1998 ; LABHART et MEYER 1999 ; Rudiger WEHNER 2003 ; Rüdiger WEHNER 2008).

Cette thèse CIFRE aura pour objectifs de lever les verrous technologiques suivants :

- ☐ développer un compas céleste compatible avec l’intégration sur une automobile ;
- ☐ étudier la possibilité d’utiliser plusieurs bandes spectrales pour améliorer les performances et être robuste dans les zones sous faible luminosité (UV et visible : bleu, vert). Des solutions devront être proposées pour supprimer les systèmes tournants pas adaptés à une application automobile (i.e, comme préalablement sur AntBot) ;

- développer des algorithmes spécifiques pour être robuste aux conditions météorologiques et aux réflexions parasites ;
- tester et démontrer la qualité et la plus-value de cette modalité sensorielle supplémentaire pour améliorer la détection de cap d'un véhicule sur de trajets de plusieurs kilomètres ;
- investiger des stratégies de fusion de cette nouvelle information visuelle avec les autres capteurs à bord des véhicules (accéléromètres, GNSS, gyro-mètres, caméras, lidars) pour améliorer la localisation du véhicule.

Les recherches sur ce sujet sont peu nombreuses. Un laboratoire en France, un laboratoire aux États-Unis, et 7 laboratoires en Chine travaillent actuellement sur la détection de cap céleste :

- l'ISM à Marseille en partenariat avec le Groupe PSA dont le centre technique est situé à Vélizy-Villacoublay (MONNOYER, DUPEYROUX, Stéphane VIOLLET et al. [2020](#)) ;
- U.S. Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, Maryland 21005, USA (HAMAOU [2017](#)) ;
- the Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China (CHU, K. ZHAO, Qiang ZHANG et al. [2008](#) ; CHU, H. WANG, W. CHEN et al. [2009](#) ; CHU, Z. WANG, GUAN et al. [2014](#) ; J. LI, CHU, R. ZHANG et al. [2020](#) ; Yinlong WANG, CHU, R. ZHANG et al. [2019](#) ; GUAN, S. LI, ZHAI et al. [2018](#) ; GUAN, ZHAI, H. CAI et al. [2020](#)) ;
- School of Instrumentation Science & Opto-Electronics Engineering, Beihang University, No. 37, Xueyuan Road, Haidian District, Beijing, 100191, China (H. ZHAO et XU [2016](#) ; H. ZHAO, XU, Y. ZHANG et al. [2018](#) ; YANG, DU, NIU et al. [2018](#) ; X. LIU, YANG, GUO et al. [2020 \(in press\)](#)) ;
- School of Automation Science and Electrical engineering, Beihang University, Beijing 100191, China (YANG, DU, NIU et al. [2018](#) ; YANG, DU, X. LIU et al. [2019](#) ; Qingyun ZHANG, YANG, X. LIU et al. [2020](#) ; X. LIU, YANG, GUO et al. [2020 \(in press\)](#)) ;
- School of Computer Science and Information Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China (B. LIU, Z. FAN et X. WANG [2020](#)) ;
- Key Laboratory of Marine Intelligent Equipment and System, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China (AHSAN, Y. CAI et Weidong ZHANG [2020](#)) ;

- Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, School of Instruments and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China (J. TANG, Yubo WANG, D. ZHAO et al. [2019](#));
- National University of Defense Technology, Deya Road No. 109. Kaifu District, Changsha 410073, China (XIAN, HU, LIAN et al. [2014](#); Wenjing ZHANG, CAO, X. ZHANG et al. [2015](#); Wenjing ZHANG, X. ZHANG, CAO et al. [2016](#); C. FAN, HU, X. HE et al. [2018](#); R. HE, HU, L. ZHANG et al. [2019](#));

4.2 Unifier et clarifier les théories sur le guidage visuel des insectes volants

4.2.1 Le contrôle d'altitude chez les insectes volants exploite-t-il différents invariants optiques ?

Ce projet de recherche exploratoire étudie le contrôle d'altitude chez l'abeille et s'inscrit dans le cadre de la thèse de Aimie Berger Dauxère [financement ED463, 2018-2021]. Cette thèse a pour but de démontrer que plusieurs invariants optiques sont impliqués dans le contrôle d'altitude de l'abeille, ce qui participera à unifier la théorie optimotrice de John Kennedy (KENNEDY [1940](#); KENNEDY [1951](#)), développée chez les insectes, avec l'approche écologique de la perception visuelle de James Gibson (GIBSON [1979](#)), développée chez les humains.

À cet effet, les travaux antérieurs chez l'abeille ont largement mis en évidence le rôle de la vitesse optique ventrale dans le contrôle du décollage, du suivi de terrain, de la traversée de tunnel, et enfin de l'atterrissage (Nicolas FRANCESCHINI, RUFFIER et J. SERRES [2007a](#); SRINIVASAN [2011](#); Julien R SERRES et RUFFIER [2017](#)). Une célèbre expérience de Heran et Lindauer (1963) a d'ailleurs démontré que les abeilles ne parviennent pas à voler au-dessus d'une eau dormante sans heurter la surface de l'eau (HERAN et LINDAUER [1963](#)), néanmoins une eau dormante supprime tout le support informationnel ventral, ce qui ne permet pas d'identifier d'autres invariants optiques impliqués dans le contrôle d'altitude. La suppression de la vitesse optique ventrale semble donc rédhibitoire et seule sa restauration (via l'ajout d'une texture, i.e., un pont de planches en bois) a permis de rétablir un survol normal des abeilles à la surface de l'eau (HERAN et LINDAUER [1963](#)). Cependant, cet enrichissement visuel introduit plusieurs informations visuelles ne permettant pas de les différencier. Toutefois, comme mentionné précédemment, d'autres invariants optiques pourraient intervenir dans le contrôle de l'altitude des insectes volants. Des travaux réalisés chez la drosophile (STRAW, LEE et DICKINSON [2010](#)), au moyen d'un système de réalité virtuelle extrêmement perfectionné, corroborent cette possibilité (Fig. [4.4](#)).

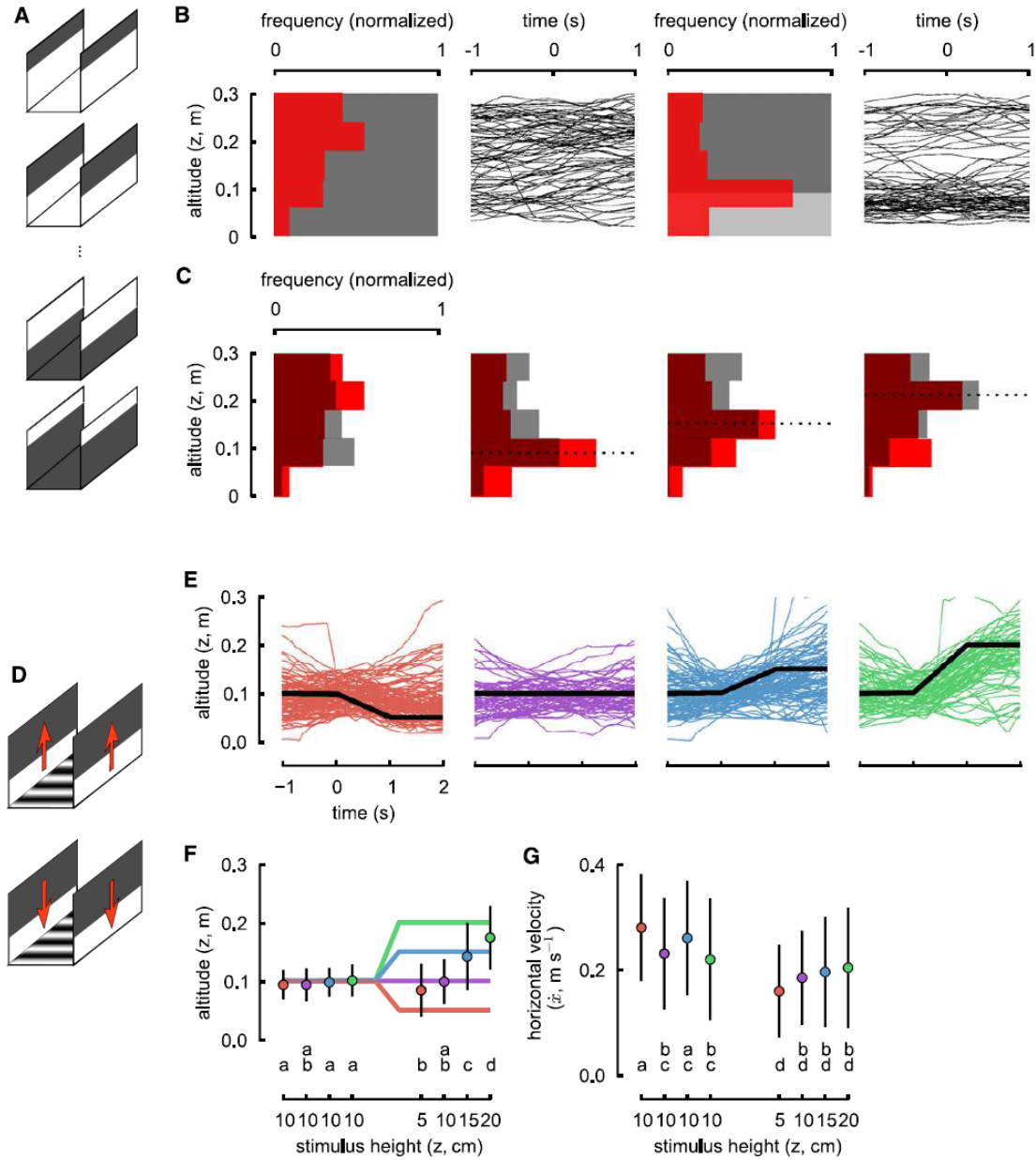


FIGURE 4.4 – Expériences en réalité virtuelle sur la drosophile. D’après STRAW, LEE et DICKINSON 2010.

Les animaux et les humains sont capables de naviguer de manière prospective dans des environnements complexes composés d’objets stationnaires et/ou mobiles. Il est maintenant clairement établi que le flux optique, résultant des déplacements combinés de l’agent dans l’environnement et/ou d’éléments de l’environnement par rapport à lui, fournit des informations sur le “futur courant”, potentiellement utiles au contrôle des tâches de navigation spatiale (GIBSON 1950 ;

GIBSON 1979). Ce flux optique peut être défini comme un champ vectoriel des vitesses angulaires des objets contrastés défilant sur la rétine. Le flux optique de translation est tout particulièrement intéressant pour la navigation de proximité, en effet, il dépend conjointement de la vitesse de déplacement de l'agent et de la distance le séparant des objets qui composent l'environnement. Ce flux optique de translation contient ainsi un grand nombre de propriétés transformationnelles remarquables (les invariants optiques) pouvant être utilisées afin de contrôler, par exemple, la vitesse (chez les apidés : PORTELLI, RUFFIER, ROUBIEU et al. 2011 ; SRINIVASAN 2011 ; Julien R SERRES et RUFFIER 2017 ; LECOEUR, Marie DACKE, FLOREANO et al. 2019 ; LECOEUR 2019, chez l'humain : FRANÇOIS, A. H. MORICE, BOOTSMA et al. 2011 ; chez le robot : SRINIVASAN 2011 ; J. SERRES et RUFFIER 2016 et la position (chez l'abeille : SRINIVASAN 2011 ; Julien R SERRES, MASSON, RUFFIER et al. 2008 ; LECOEUR, Marie DACKE, FLOREANO et al. 2019 ; chez l'humain : FLACH, R. WARREN, GARNESSE et al. 1997 ; DUCHON et WARREN JR 2002 ; L. LI et J. CHEN 2010 ; chez le robot : SRINIVASAN 2011 ; J. SERRES et RUFFIER 2016).

Ces différents invariants sont disponibles dans le flux optique, ils peuvent théoriquement être détectés et utilisés à des fins de régulation, pour peu que l'agent (e.g., humain, animal, robot) dispose de capteurs à même de les détecter. L'objectif de ces travaux sera précisément de tester l'hypothèse selon laquelle un même invariant du flux optique peut être utilisé par différents agents afin de réaliser une tâche de navigation spatiale. En effet, les agents qui seront étudiés dans le cadre de ce projet possèdent des spécificités différentiantes. Une abeille ouvrière possède un système visuel d'environ 100 000 photorécepteurs par oeil composé (SEIDL et KAISER 1981) et un cerveau miniature d'environ 1 million de neurones (HADDAD, SCHAUPP, BRANDT et al. 2004). A titre de comparaison, le système visuel de l'humain comporte 126 millions photorécepteurs par oeil et un cerveau comprenant 100 milliards de neurones. L'abeille n'en demeure pas moins une virtuose de la navigation spatiale en percevant et en évitant les obstacles tout en étant capable de se déplacer en quête de nectar jusqu'à 13 km de sa ruche (VON FRISCH et CHADWICK 1967), en dépit du caractère imprévisible et complexe de l'environnement. La (ou les) informations utilisées par l'abeille afin de guider ses déplacements est (sont) étroitement liée(s) au flux optique, car son système visuel est majoritairement dédié au traitement du flux optique au moyen de neurones spécialisés (IBBOTSON 2001 ; IBBOTSON, HUNG, MEFFIN et al. 2017).

Le suivi de terrain est la tâche utilisée dans ce projet ; elle suppose le maintien d'une altitude constante grâce à la prise en compte d'un certain nombre de régularités perceptives. Les travaux réalisés chez l'humain (en l'occurrence les pilotes d'avion) ont permis de démontrer sa capacité à utiliser un certain nombre d'invariants optiques afin de réguler sa trajectoire, parmi lesquels le taux de chan-

gement de l'angle d'évasement (*splay angle rate* en anglais - $\dot{s}$, FLACH, HAGEN et LARISH 1992) ou la vitesse de défilement optique globale (*global optic flow rate* - *GOFR*, LARISH et FLACH 1990). Un certain nombre d'études ont d'ores et déjà démontré la capacité de l'insecte à réguler sa hauteur de vol sur la base de la vitesse optique ventrale (PORTELLI, RUFFIER, ROUBIEU et al. 2011 ; SRINIVASAN 2011 ; Julien R SERRES et RUFFIER 2017). A l'inverse, aucune a entrepris d'examiner la capacité de l'insecte à prendre en compte d'autres invariants optiques, voire même à utiliser de manière conjointe différents invariants, comme cela a pu être démontré chez l'humain (DUCHON et WARREN JR 2002). Ce projet a précisément pour ambition la mise au jour et la modélisation des principes de guidage visuel communs aux insectes et aux humains, raison pour laquelle cette thèse est co-supervisée par moi-même (bioroboticien, expert en guidage visuel chez les insectes) et Prof. Gilles Montagne (expert en psychologie expérimentale). La modélisation de ces principes, trouvera également des applications en robotique pour rendre plus réactifs les robots par un couplage plus écologique entre information visuelle et mouvement du robot.

Cette thèse aura pour objectifs de répondre aux questions suivantes :

- ☐ Peut-on construire un paradigme expérimental, basé sur un tunnel, permettant de décorréler différents invariants optiques ? L'utilisation de tunnels permettant de réduire drastiquement les coûts expérimentaux.
- ☐ Peut-on éviter l'utilisation de la réalité virtuelle chez les insectes volants, dont les coûts de mise en oeuvre sont exorbitants ? (e.g., [The Straw Lab](#) à l'Université de Freiburg en Allemagne, STOWERS, HOFBAUER, BASTIEN et al. 2017)
- ☐ Existe t-il différents invariants optiques impliqués dans le contrôle d'altitude de l'abeille ? En particulier le taux de changement d'angle d'évasement formé au sol par un couloir (*splay angle rate* en anglais), qui est également un invariant optique extrait du flux optique ;
- ☐ Si oui, comment une abeille en vol exploite t-elle simultanément ces différents invariants optiques ?
- ☐ Peut-on modéliser le contrôle d'altitude de l'abeille sous la forme de différentes boucles visuo-motrices imbriquées ?
- ☐ Peut-on exploiter ce modèle en robotique pour faire voler des robots au-dessus d'environnements appauvris visuellement ? Peut-on rendre les robots volants plus réactifs en les pilotant de manière "écologique" ?

1. L'angle d'évasement correspond à l'angle formé par la direction du déplacement et une ligne parallèle à la trajectoire au point de jonction situé au niveau de l'horizon

4.2.2 Les affordances existent-elles chez les insectes volants ?

Le concept heuristique d'affordance (du verbe anglais *afford* ou s'offrir/se permettre) a été introduit par Gibson en 1966 et développé par la suite jusqu'à la fin de sa vie (GIBSON 1966 ; GIBSON 1977 ; GIBSON 1979 ; GIBSON 1986). Ce néologisme traduit la faculté qu'ont les animaux de guider leurs comportements en percevant ce que leur environnement leur offre en terme de potentialités d'actions.

L'affordance est spécifiée par un cas particulier d'invariant qui émerge du système animal-environnement. L'affordance illustre parfaitement bien l'idée de lien mutuel entre l'animal et l'environnement. En effet, l'affordance nous dit que l'environnement est évalué non pas par rapport à un standard extérieur, absolu mais par rapport à l'animal et à ses propres contraintes (son poids, sa taille, sa fatigue, sa motivation...). Mais l'affordance pose trois types de questions : (i) l'affordance a-t-elle une existence propre ? (ii) Est-elle une propriété de l'environnement ou une propriété relationnelle émergente du système animal-environnement ? (iii) Quel invariant spécifie une affordance donnée ? Nous verrons que ces questions sont au centre des différentes formalisations du concept qui ont été proposées, depuis James Gibson.

Depuis les travaux de James Gibson, de nombreuses affordances chez l'humain ont été étudiées comme la *montabilité* (*climbability* en anglais) des escaliers (W. H. WARREN 1984), l'*assoyabilité* des surfaces (MARK 1987 ; MARK et VOGELE 1987), la *passabilité* des ouvertures (WARREN JR et WHANG 1987), la *posturabilité* d'une surface (CORTE et LUYAT 2004), le caractère *attrapable* d'un objet (SOLOMON et TURVEY 1988 ; CARELLO, GROSOFSKY, REICHEL et al. 1989), la *franchissabilité* des fossés (BURTON 1992 ; CORNUS, MONTAGNE et LAURENT 1999) ou, encore, la possibilité de passer sous une barrière (MEER 1997).

Différentes questions vont émerger de l'application du cadre théorique des affordances aux insectes volants, j'ai déjà pu identifier des similarités entre humains et insectes, comme la *passabilité* des ouvertures chez le bourdon (RAVI, BERTRAND, SIESENOP et al. 2019) qui ne fait pas explicitement référence au cadre théorique des affordances, ou bien encore la *montabilité* des obstacles chez la blatte (RITZMANN et ZILL 2019). Je souhaite personnellement m'investir sur l'*atterrabilité* chez l'abeille (Fig. 4.5) en appliquant le cadre théorique des affordances, tout comme nous sommes en train de chercher à les formuler chez l'humain dans le cadre de la thèse de Mathieu Thomas à l'ONERA [2018-2022] (Fig. 4.6, MATHIEU, PEREIRA FIGUEIRA, Julien R SERRES et al. 2019). Je chercherai alors à répondre aux questions ci-dessous :

- Existe-t-il des similarités de couplages perceptivo-moteurs entre le système hélicoptère-bateau (Fig. 4.6) et le système abeille-fleur (Fig. 4.5) ?



FIGURE 4.5 – Atterrissage d’une abeille sur un chardon-marie. Crédits : Firooo2, Wikimedia commons.



FIGURE 4.6 – Hélicoptère Caïman Marine en train d’apponter sur la frégate Aquitaine.
Sources : [Marine Nationale](#), 5 mars 2012.

- Les affordances pourront-elles aider à guider visuellement les futurs robots? A cet effet, des modèles computationnels basés sur les affordances commencent à apparaître en robotique (ANDRIES, CHAVEZ-GARCIA, CHATILA et al. [2018](#)).

4.3 Perspectives de recherche à plus long terme

4.3.1 Conception de capteurs optiques innovants

La vision ultraviolette est répandue dans le règne animal (HUNT, WILKIE, BOW-MAKER et al. 2001), chez les invertébrés (T. W. CRONIN et BOK 2016), mais aussi chez les oiseaux (BENNETT et CUTHILL 1994; CUTHILL, PARTRIDGE, BENNETT et al. 2000; KEVAN, CHITTKA et DYER 2001; LIND, MITKUS, OLSSON et al. 2014; RAJCHARD 2009), mais aussi la vision de la polarisation chez les oiseaux (ABLE 1982; MOORE 1986; MUHEIM, PHILLIPS et ÅKESSON 2006; MUHEIM 2011). Finalement, nous savons assez peu de choses sur l'utilité des UV ou de la polarisation dans la compréhension du comportement des oiseaux.

En effet, la capacité des rapaces à discerner les UV a donné lieu à des résultats contradictoires. Initialement, des études comportementales ont montré la capacité des faucons crécerelles européens à percevoir les UV dans les urines des micro-mammifères (VIITALA, KORPLMÄKI, PALOKANGAS et al. 1995; KOIVULA, VIITALA et KORPIMÄKI 1999). Par la suite, il a été montré chez 4 espèces de rapace (faucon crécerelle, buse variable, épervier d'Europe, milan royal) que les photorécepteurs présents dans leur rétine ne permettaient pas de voir les UV (en tout cas, pas ceux réfléchis par les urines) (LIND, MITKUS, OLSSON et al. 2013).

Aujourd'hui, l'origine de ces différences entre espèces de rapaces sont peu comprises. Néanmoins, les photorécepteurs chez le busard des roseaux, seraient capables de percevoir dans les UV (communication personnelle avec Dr. Simon Potier). Selon lui, la plupart des rapaces diurnes ont 4 types de photorécepteurs (avec les opsines et leurs longueurs d'ondes associées : SWS1 (UV ou violet), SWS2 (bleue), RH2 (verte) et LWS (rouge)). Mais, deux espèces étudiées à ce jour ne possèdent pas le SWS1 (le vautour moine et l'élanion blanc). Par conséquent, ces espèces semblent être trichromatiques. Les photorécepteurs SWS1 et RH2 sont absents chez tous les rapaces nocturnes, et chez les tytonidés. La vision chez les rapaces est ainsi bien plus complexe que ce que l'on peut se l'imaginer (voir les articles de revues de questions : POTIER 2020; POTIER, MITKUS et KELBER 2020).

Très récemment, des habitats végétalisés ont été visualisés à l'aide d'une caméra multispectrale dont les canaux imitent la sensibilité des photorécepteurs des oiseaux sur l'ensemble du spectre de l'UV au visible. Les auteurs ont constaté que le contraste entre les surfaces supérieures et inférieures des feuilles est plus élevé dans l'ultraviolet que le visible, ce qui fait ressortir clairement la position et l'orientation des feuilles (TEDORE et Dan-Eric NILSSON 2019).

Mes travaux de recherches futurs viseront donc à construire des capteurs bio-inspirés sensibles aux UV-A, mais aussi multi-spectraux combinant à la fois les spectres ultraviolet et visible. La disponibilité du flux optique en bande UV-A sera aussi évaluée à des fins de navigation. Des capteurs panoramiques très basse résolution comme celui de l'optique de la fourmi du désert seront construits avec une résolution de 7° - 10° , c'est-à-dire des matrices de pixels de 36×10 pour tester des algorithmes de navigation des fourmis sur terrain encombré (e.g., MURRAY, KOCSI, DAHMEN et al. 2019). Les routes de navigation des fourmis peuvent être différentes à l'aller et au retour vers leur nid. Antoine Wystrach et son équipe (CRCA, Toulouse) ont développé, en simulation, un modèle simple basé sur les circuits neuronaux des insectes qui explique le suivi de route et le retour au nid de la fourmi de façon remarquablement robuste (MANGAN et WEBB 2012 ; WYSTRACH, LE MOEL, CLEMENT et al. 2020). En collaboration avec le CRCA, il s'agira de mettre en oeuvre ce modèle sur un petit robot mobile pour confirmer qu'une seule séquence d'exploration visuelle de l'environnement permettra d'apprendre à retourner directement au nid, et ainsi former des routes pour naviguer.

4.3.2 Conception de plateforme robotique innovante

Dans le cadre de la thèse d'Ilya Brodoline [2018-2021] financée par la DGA, un nouveau robot hexapode de basse consommation énergétique sera construit afin de parcourir quelques centaines de mètres en conditions extérieures (Fig. 4.7) contre seulement quelques dizaines pour le robot AntBot (DUPEYROUX, Julien R SERRES et Stéphane VIOLLET 2019). Les servomoteurs seront remplacés par des systèmes vis-écrou, et les efforts articulaires seront mesurés pour déterminer la force de réaction au sol, ce qui permettra d'évoluer sur des terrains en pente ou plus rugueux, mais aussi de générer des patrons de locomotion asymétriques comme le font les fourmis pour faire varier le cap du robot en temps réel en fonction de la tâche à exécuter.

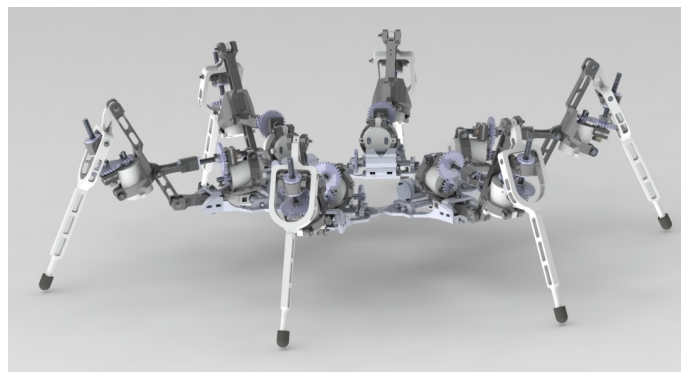


FIGURE 4.7 – Conception assistée par ordinateur du nouveau robot hexapode construit dans l'équipe Biorobotique. Crédits photographiques : Ilya Brodoline. Non publiée. Voir [Nature = Futur ! Le Bio-Robot](#) du 26 novembre 2020.

4.4 Appels d'offres scientifiques obtenus

Période	Type de financement	Titre ou acronyme	Rôle	Montant
2016	ACI actions incitatives ISM	Approche transdisciplinaire des principes de guidage perceptivo-moteurs par flux optique	PI	4k€
2018-2021	Bourse de thèse DGA	Navigation longue distance avec un robot hexapode	PI	118k€
2018-2021	Bourse de thèse AMU	Contrôle d'altitude chez l'abeille	PI	92k€
2019-2022	Bourse CIFRE	La polarisation UV dans les applications automobiles	PI	162k€
2020	Pré-maturation SATT	MiMiCOMPAS Une boussole céleste à bas prix pour la robotique de service	PI	20k€
2020	PEPS CNRS	MIMIC-ANT Étude de la locomotion lors du transport de charges chez la fourmi : application à la robotique hexapode	PI	20k€

5 Conclusion

5.1 Mon expérience scientifique

Dans mon habilitation à diriger des recherches, j'ai tout d'abord décrit de manière exhaustive mon parcours universitaire et académique, j'ai ensuite dressé une liste exhaustive de mes différentes publications démontrant ma capacité à conduire des recherches au plus haut niveau dans des domaines très variés tels que : l'entomologie, l'ornithologie, la modélisation computationnelle, la robotique, la psychologie expérimentale, toutes reliées aux neurosciences visuelles, et enfin la pédagogie.

Fort d'une expérience de 6374 heures d'enseignement, du co-encadrement ou de la co-direction de 8 doctorants, de l'encadrement ou du co-encadrement de 32 stagiaires (11 M2, 5 M1, 13 L3, et 3 L2), mais aussi du pilotage d'équipe pédagogique pouvant aller jusqu'à une vingtaine de collaborateurs. Je pense, aujourd'hui avoir démontré mes capacités d'innovation tant sur le plan pédagogique que scientifique pour me porter candidat à des fonctions de *leadership* aussi bien en pilotage de formation qu'en animation de la recherche. Aujourd'hui, j'accorde de plus en plus d'importance au triptyque enseignement-recherche-valorisation, que mon pur métier initial d'enseignant. J'observe que les offres de formation en biomimétisme sont assez rares et pauvres en France pour être compétitives au niveau international, parfois cela se présente sous forme de quelques modules ici et là, finalement, plus par curiosité ou par manque d'ambition.

"[Le biomimétisme se déploie dans l'enseignement supérieur](#)" en 2020, avec la création de deux masters en biomimétisme (LE NEVÉ 2019), l'un à l'[Université de Pau et des pays de l'Adour](#) en matériaux bio-inspirés, l'autre à l'[Ecole nationale supérieure de création industrielle \(Ensci\)](#) de Paris en biomimétisme et design. Je pense qu'au contraire, le biomimétisme devrait être enseigné non pas comme une curiosité, ailleurs ou bien ici à Aix Marseille Université, mais plutôt comme une véritable démarche de recherche pour résoudre des problèmes complexes. Aussi, j'envisage de porter une telle ambition au sein d'Aix Marseille Université en regroupant les forces du vivier local. Par ailleurs, l'aspect valorisation de mes recherches devrait prendre de plus en plus d'importance au cours des prochaines années, car le biomimétisme permettrait de résoudre un certain nombre de problèmes sociétaux comme naviguer sans recourir aux ondes électromagnétiques artificielles satellitaires ou terrestres (e.g., GNSS et réseaux mobiles), notam-

ment lors d'interruption de service ou de blackout, ou bien encore automatiser des tâches de livraison, ou enfin faire coexister différents engins de toute taille dans le trafic aérien.

5.2 Ma démarche de recherche

J'ai mis un certain temps à comprendre ma propre démarche de recherche, au départ que je qualifiais simplement de curiosité, pourrait aujourd'hui se qualifier de *sérendipité* pour les trois raisons suivantes : tout d'abord, j'applique ce que je sais à d'autres champs scientifiques dont le point de départ est une niche scientifique, i.e., la biorobotique, la seconde est la mobilité des idées à travers les champs, et la troisième est la combinaison d'un savoir public et partagé, avec mon savoir particulier grâce à ma perspicacité, mon l'expérience et mes compétences (Fig. 5.1). Je pense, par exemple, à l'utilisation de points de fonctionnement (ou d'invariants) pour décrire l'état d'un couplage sensorimoteur, l'analogie qui m'est apparue entre détection de l'orientation du camp magnétique dans un moteur électrique avec celle de la détection du cap céleste, ou bien encore la similitude de la tâche entre un appontage sur un navire et l'atterrissage d'une abeille sur une fleur.

Par certains aspects, ma démarche de recherche est aussi *transdisciplinaire* en ce sens qu'elle va au-delà des disciplines d'une part, mais surtout d'autre part que sa finalité ne reste pas inscrite dans la recherche disciplinaire proprement dite (e.g., l'universalité de la régulation des invariants optiques chez tous les animaux, ou bien le caractère non universel de la vision ultraviolette chez les animaux).

Pour expliquer le comportement des animaux, je combine à la fois la méthode dite d'*architecture de subsomption* de Rodney Brooks (BROOKS 1986), pour coupler les modalités sensorielles et le mouvement, et une démarche parcimonieuse pour décrire les couplages sensorimoteurs à la façon de Valentino Braitenberg (ou à la *Braitenberg*) (BRAITENBERG 1986). Un des enseignements majeurs de Braitenberg est que *la synthèse d'un comportement est souvent plus simple que l'analyse d'un comportement*, ce qui signifie que les lois régissant les couplages sensorimoteurs au niveau du système nerveux sont souvent beaucoup plus simples (au sens minimaliste) que ce que l'on pensait pour expliquer des comportements relativement complexes des animaux. Ainsi, on comprend mieux les informations qui sont prélevées par les animaux, nous pourrions alors mieux expliquer leurs comportements, non seulement pour mieux les considérer, mais aussi peut-être mieux les protéger (je pense, par exemple, à la problématique de la pollution lumineuse pour les insectes nocturnes, KYBA, RUHTZ, J. FISCHER

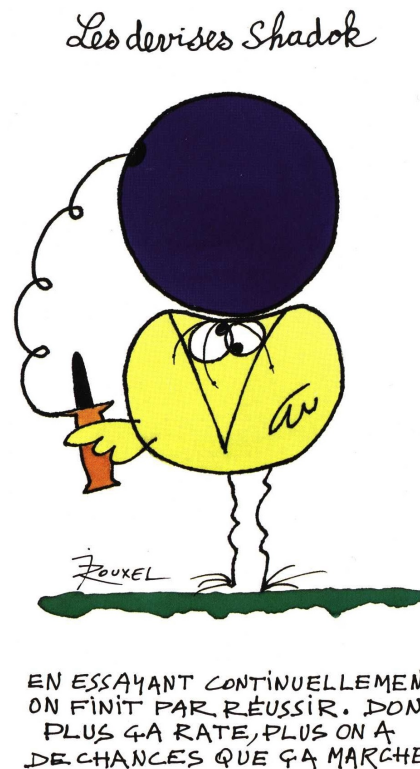


FIGURE 5.1 – Personnage Shadok que j’incarne. D’après les Shadoks de Jacques Rouxel [1931-2004].

et al. 2011). C’est précisément cette combinaison de démarches de recherche qui nous a permis de concevoir et de réaliser le robot fourmi AntBot, qui finalement peut être considéré comme un *véhicule de Braitenberg* par son minimalisme sensoriel et sa stratégie de navigation relativement simple à incarner numériquement.

5.3 Le biomimétisme, une fin en soi

Cela va risquer de surprendre mes lecteurs, mais malheureusement, il faut bien que je vous adresse clairement mes idées sur cette question. Est-ce que le biomimétisme est une science plus vertueuse pour l’Humanité, en ce sens qu’elle produirait des solutions plus durables ou plus écologiques ? Ma réponse est que solutions durables, peut-être, mais certainement pas solutions écologiques. En effet, les capteurs bio-inspirés sont construits à partir de la microélectronique sur puces inorganiques, même si l’organique se développe, nous sommes encore très loin d’un substrat biologique. Je suis aussi d’accord avec l’idée que le biomimétisme véhicule actuellement l’illusion du développement durable, de solutions plus vertes, idée qui s’est confortée à la lecture de KAMILI 2019. Ma vision est que

le biomimétisme est une autre manière de trouver des solutions à un problème complexe, comme par exemple la navigation. En ce sens, développer un système de navigation bio-inspirée, secondant un système de navigation conventionnel, permettrait de robustifier le véhicule autonome. Je n'imagine pas à un seul instant, voir un jour un argument du type, ce robot est biomimétique *garanti 100% sans GPS* ou bien *ce robot est eco-conçu, il est meilleur* en dépit d'un système normatif qui est en train d'apparaître en ce sens et qu'il faudra canaliser (TERRIER, GLAUS et RAUFFLET 2017, Norme ISO 18458 :2015 *Biomimétique – Terminologie, concepts et méthodologie*, Norme ISO 18459 :2015 *Biomimétique – Optimisation biomimétique*, Norme ISO 18457 :2016 *Biomimétisme – Matériaux, structures et composants biomimétiques*). Peut-être, ce que nous appelons aujourd'hui en bio-robotique une interaction plus *écologique* avec l'environnement d'un robot au sens *gibsonien* pour rendre le robot plus réactif avec son environnement, signifiera demain être capable de certifier du caractère biomimétique des algorithmes qui seront à bord de ce dernier.

5.4 Le biomimétisme pour mieux comprendre le guidage visuel chez l'humain

Appréhender la recherche par la voie du biomimétisme permet de regrouper des tâches similaires opérées chez différents agents dont les propriétés de leur système visuel sont très différentes mais aussi leur dynamique comme les insectes, les oiseaux, et les humains. Après tout l'Humanité cherchera aussi à construire des robots ou des véhicules de toutes tailles, tout comme il existe des animaux de toute taille. Lorsque la tâche de navigation spatiale est complexe, comme l'appontage sur un navire en présence de houle, il devient difficile d'identifier le support informationnel utilisé par le pilote. Ainsi, conduire des travaux de recherche transdisciplinaires pourrait permettre de mieux comprendre comment l'humain organise sa prise d'information et coordonne ses mouvements. La modélisation du guidage visuel chez les animaux réalisant des tâches similaires, mais dont les propriétés optiques de leur système visuel sont parfois singulièrement différentes de l'humain, permettrait de comprendre les informations optiques qui sont prélevées et faciliterait la modélisation du couplage perceptivo-moteur des pilotes. Pour conclure, la simulation puis l'incarnation sur plateforme robotique, dont on pourrait ajuster les dynamiques, permettrait à terme de confronter nos modèles aux conditions physiques, mais aussi pour l'humain d'améliorer les interfaces homme-machine. En effet, être capable de prélever une information pertinente au moyen de capteurs bio-inspirés, comme par exemple en conditions visuelles dégradées pour l'humain, permettrait de réaliser des augmentations visuelles facilitant le pilotage, mais aussi mieux faire collaborer l'humain et la machine.



”

Le biomimétisme devrait être enseigné,
non pas comme une curiosité mais,
comme une véritable démarche de recherche
pour résoudre des problèmes complexes.

 Cap sur le projet **MiMiCOMPAS**

Se localiser
sans GPS
sans GSM
sans ondes radio

JULIEN SERRES
Enseignant-chercheur
Expert en navigation bio-inspirée

INSTITUT
DES SCIENCES
DU MOUVEMENT
JULES
MAREY

(Aix+Marseille
université

SATT
SUD-EST
ACCÉLÉRONS LE TRANSFERT DE TECHNOLOGIES

Crédits photographiques : Patrick Sainton

Bibliographie

- [Abl82] Kenneth P ABLE. « Skylight polarization patterns at dusk influence migratory orientation in birds ». In : *Nature* 299.5883 (1982), p. 550–551. URL : <https://link.springer.com/content/pdf/10.1038/299550a0.pdf> (cf. p. 99).
- [ACZ20] Muhammad AHSAN, Yunze CAI et Weidong ZHANG. « Information Extraction of Bionic Camera-Based Polarization Navigation Patterns Under Noisy Weather Conditions ». In : *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)* 25.1 (2020), p. 18–26 (cf. p. 92).
- [Anco4] F ANCHLING. « La vision chez l’abeille, un sens très complexe ». In : *Abeille de France* 900 (fév. 2004). ISSN : 0373-4625, p. 104–107. URL : <https://www.apiservices.biz/fr/articles/classes-par-popularite/307-la-vision-chez-l-abeille-un-sens-tres-complexe> (cf. p. 57).
- [And+18] Mihai ANDRIES, Ricardo Omar CHAVEZ-GARCIA, Rajaa CHATILA et al. « Affordance equivalences in robotics ». In : *Frontiers in Neurorobotics* 12 (juin 2018). DOI : [10.3389/fnbot.2018.00026](https://doi.org/10.3389/fnbot.2018.00026) (cf. p. 98).
- [Aub+09] Fabrice AUBÉPART, Julien SERRES, Antoine DILLY et al. « Field Programmable Gate Array (FPGA) for Bio-inspired visuo-motor control systems applied to Micro-Air Vehicles ». In : *Aerial Vehicles*. note : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-03042173/>. InTech, Vienna, 2009. Chap. 3, p. 29–54. ISBN : 978-953-7619-411. DOI : [10.5772/6466](https://doi.org/10.5772/6466). URL : https://www.intechopen.com/books/aerial_vehicles/field_programmable_gate_array_fpga_for_bio-inspired_visuo-motor_control_systems_applied_to_micro-a (cf. p. 44).
- [Ayc+18] Todd Michael AYCOCK, David B CHENAULT, Arthur LOMPADO et al. *Sky polarization and sun sensor system and method*. US Patent 9,989,625. Juin 2018. URL : <https://patentimages.storage.googleapis.com/7b/75/97/33bac241c1dc7e/US9989625.pdf> (cf. p. 88).
- [Bai+06] Emily BAIRD, Mandyam V SRINIVASAN, Shaowu ZHANG et al. « Visual control of flight speed and height in the honeybee ». In : *International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. Springer. 2006, p. 40–51. URL : https://www.researchgate.net/profile/Shawu_Zhang/publication/221116427_Visual_Control_of_Flight_Speed_and_Height_in_the_Honeybee/links/00b7d525ccdc1ab820000000.pdf (cf. p. 79).

- [BH04] András BARTA et Gábor HORVÁTH. « Why is it advantageous for animals to detect celestial polarization in the ultraviolet? Skylight polarization under clouds and canopies is strongest in the UV ». In : *Journal of Theoretical Biology* 226.4 (2004), p. 429–437. ISSN : 0022-5193. DOI : [10.1016/j.jtbi.2003.09.017](https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2003.09.017) (cf. p. 57, 58).
- [Bee+98] Randall D BEER, Hillel J CHIEL, Roger D QUINN et al. « Biorobotic approaches to the study of motor systems ». In : *Current Opinion in Neurobiology* 8.6 (1998), p. 777–782. DOI : [10.1016/S0959-4388\(98\)80121-9](https://doi.org/10.1016/S0959-4388(98)80121-9) (cf. p. 14).
- [BC94] Andrew TD BENNETT et Innes C CUTHILL. « Ultraviolet vision in birds : what is its function ? ». In : *Vision research* 34.11 (1994), p. 1471–1478. DOI : [10.1016/0042-6989\(94\)90149-X](https://doi.org/10.1016/0042-6989(94)90149-X) (cf. p. 58, 99).
- [BMS19a] Aimie BERGER DAUXÈRE, Gilles MONTAGNE et Julien R SERRES. « A new experimental design to uncorrelate visual cues in honeybees’ altitude control ». In : *Poster au 19^{ème} Colloque de Biologie de l’Insecte (CBI), Albi, France*. Juin 2019 (cf. p. 46).
- [BMS19b] Aimie BERGER DAUXÈRE, Gilles MONTAGNE et Julien R SERRES. « Uncorrelated optic flow’s invariants controlling altitude in honeybees : a new experimental setup ». In : *Poster au 30^{ème} congrès de l’Union Internationale pour l’Étude des Insectes Sociaux (UIEIS-SF), Avignon, France*. Août 2019 (cf. p. 46).
- [BMson] Aimie BERGER DAUXÈRE, Gilles MONTAGNE et Julien R SERRES. « A new experimental setup for exploring how honeybees control their altitude ». In : *Journal of Insect Physiology* (2020 (en préparation)) (cf. p. 35).
- [Bra86] Valentino BRAITENBERG. *Vehicles : Experiments in synthetic psychology*. MIT press, 1986. URL : http://wiki.t-o-f.info/uploads/BEAM/Braitenberg_vehicles.pdf (cf. p. 103).
- [BG82] Michael L BRINES et James L GOULD. « Skylight polarization patterns and animal orientation ». In : *Journal of Experimental Biology* 96.1 (1982), p. 69–91. URL : <https://jeb.biologists.org/content/jexbio/96/1/69.full.pdf> (cf. p. 63, 64).
- [BVS19] Ilya BRODOLINE, Stéphane VIOLLET et Julien R SERRES. « An energy efficient 3D printed leg for bioinspired hexapod robots ». In : *Poster aux Journées des Jeunes Chercheurs en Robotique (JJCR), Vittel, France*. Oct. 2019 (cf. p. 46).
- [BVS20a] Ilya BRODOLINE, Stéphane VIOLLET et Julien R SERRES. « A full 3D printed hexapod robots with energy efficient joints ». In : *Webinaire aux Journées des Jeunes Chercheurs en Robotique (JJCR)*. Nov. 2020. URL : <https://jjcr-2020.sciencesconf.org/> (cf. p. 46).
- [BVS20b] Ilya BRODOLINE, Stéphane VIOLLET et Julien R. SERRES. « Full 3D printed hexapod robots with energy efficient joints ». In : *Workshop GDR 2088 BIO-MIM 1st Annual Meeting, Nice, France*. Oct. 2020, p. 33 (cf. p. 42).

- [Bro86] Rodney BROOKS. « A robust layered control system for a mobile robot ». In : *IEEE journal on robotics and automation* 2.1 (1986), p. 14–23. DOI : [10.1109/JRA.1986.1087032](https://doi.org/10.1109/JRA.1986.1087032). URL : <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a160833.pdf> (cf. p. 103).
- [Bur92] Gregory BURTON. « Nonvisual judgment of the crossability of path gaps. » In : *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance* 18.3 (1992), p. 698. DOI : [10.1037/0096-1523.18.3.698](https://doi.org/10.1037/0096-1523.18.3.698) (cf. p. 97).
- [Car+89] Claudia CARELLO, Alexis GROSOFSKY, Francene D REICHEL et al. « Visually perceiving what is reachable ». In : *Ecological psychology* 1.1 (1989), p. 27–54. DOI : [10.1207/s15326969eco0101_3](https://doi.org/10.1207/s15326969eco0101_3) (cf. p. 97).
- [Cha77] André CHAPPERT. *Etienne-louis Malus 1775-1812 Et La Theorie Corpusculaire De La Lumiere : Tentative D'explication Dynamique De La Reflexion Et De La Refraction*. ISBN : 978-2711601226. Librairie Philosophique J. Vrin, 1977 (cf. p. 90).
- [Chu+09] Jinkui CHU, Hongqing WANG, Wenjing CHEN et al. « Application of a novel polarization sensor to mobile robot navigation ». In : *2009 International Conference on Mechatronics and Automation*. IEEE, 2009, p. 3763–3768. DOI : [10.1109/ICMA.2009.5245970](https://doi.org/10.1109/ICMA.2009.5245970) (cf. p. 92).
- [Chu+14] Jinkui CHU, Zhiwen WANG, Le GUAN et al. « Integrated polarization dependent photodetector and its application for polarization navigation ». In : *IEEE Photonics Technology Letters* 26.5 (2014), p. 469–472. DOI : [10.1109/LPT.2013.2296945](https://doi.org/10.1109/LPT.2013.2296945). URL : https://www.researchgate.net/profile/Wang_Yinlong/publication/260521212_Integrated_Polarization_Dependent_Photosensor_and_Its_Application_for_Polarization_Navigation/links/543dd4ed0cf2d6934ebcfaba.pdf (cf. p. 92).
- [Chu+08] Jinkui CHU, Kaichun ZHAO, Qiang ZHANG et al. « Construction and performance test of a novel polarization sensor for navigation ». In : *Sensors and Actuators A : Physical* 148.1 (2008), p. 75–82. DOI : [10.1016/j.sna.2008.07.016](https://doi.org/10.1016/j.sna.2008.07.016) (cf. p. 92).
- [Chu+15] Arnaud CHULLIAT, Susan MACMILLAN, Patrick ALKEN et al. « The US/UK world magnetic model for 2015-2020 ». In : *Technical Report, National Geophysical Data Center, NOAA* (2015). DOI : [10.7289/V5TB14V7](https://doi.org/10.7289/V5TB14V7) (cf. p. 86).
- [Col+98] Matthew COLLETT, Thomas S COLLETT, Sonja BISCH et al. « Local and global vectors in desert ant navigation ». In : *Nature* 394.6690 (1998), p. 269. URL : https://www.imls.uzh.ch/static/CMS_publications/wehner/literatur/pdf98/wehner19981.pdf (cf. p. 91).

- [CML99] Sabine CORNUS, Gilles MONTAGNE et Michel LAURENT. « Perception of a stepping-across affordance ». In : *Ecological Psychology* 11.4 (1999), p. 249–267. DOI : [10.1207/s15326969eco1104_1](https://doi.org/10.1207/s15326969eco1104_1). URL : https://www.researchgate.net/profile/Cornus_Sabine/publication/231901293_Perception_of_a_Stepping-Across_Affordance/links/5422c1490cf238c6ea6bef9c/Perception-of-a-Stepping-Across-Affordance.pdf (cf. p. 97).
- [CLo4] Tony Regia CORTE et Marion LUYAT. « Dynamic Constraints on Haptic Perceptual Judgment of Slanted Surfaces ». In : *Current psychology letters. Behaviour, brain & cognition* 1.12 (2004). URL : <https://journals.openedition.org/cpl/419> (cf. p. 97).
- [Cou88] Kinsell L COULSON. *Polarization and Intensity of Light in the Atmosphere*. A Deepak Pub, 1988 (cf. p. 63).
- [Cou59] KL COULSON. « Characteristics of the radiation emerging from the top of a rayleigh atmosphere—I : Intensity and polarization ». In : *Planetary and Space Science* 1.4 (1959), p. 265–276. DOI : [10.1016/0032-0633\(59\)90031-5](https://doi.org/10.1016/0032-0633(59)90031-5) (cf. p. 63, 64).
- [CB16] T. W. CRONIN et M.J. BOK. « Photoreception and vision in the ultraviolet ». In : *Journal of Experimental Biology* 219.18 (2016), p. 2790–2801. URL : <https://jeb.biologists.org/content/jexbio/219/18/2790.full.pdf> (cf. p. 56, 99).
- [CM11] Thomas W. CRONIN et Justin MARSHALL. « Patterns and properties of polarized light in air and water ». In : *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences* 366.1565 (2011), p. 619–626. DOI : [10.1098/rstb.2010.0201](https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0201). URL : <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rstb.2010.0201> (cf. p. 60, 63).
- [Cut+00] Innes C CUTHILL, Julian C PARTRIDGE, Andrew TD BENNETT et al. « Ultraviolet vision in birds ». In : *Advances in the Study of Behavior*. T. 29. Elsevier, 2000, p. 159–214. DOI : [10.1016/S0065-3454\(08\)60105-9](https://doi.org/10.1016/S0065-3454(08)60105-9) (cf. p. 58, 99).
- [Dac+99] M DACKÉ, D-E NILSSON, EJ WARRANT et al. « Built-in polarizers form part of a compass organ in spiders ». In : *Nature* 401.6752 (1999), p. 470. DOI : [10.1038/46773](https://doi.org/10.1038/46773) (cf. p. 57).
- [Dac+02] M. DACKÉ, P. NORDSTRÖM, C. SCHOLTZ et al. « A specialized dorsal rim area for polarized light detection in the compound eye of the scarab beetle *Pachysoma striatum* ». In : *Journal of Comparative Physiology A* 188.3 (avr. 2002), p. 211–216. ISSN : 1432-1351. DOI : [10.1007/s00359-002-0295-9](https://doi.org/10.1007/s00359-002-0295-9) (cf. p. 57).
- [Dar59] Charles DARWIN. *L'origine des espèces par le moyen de la sélection naturelle, ou la préservation des races favorisées dans la lutte pour la vie. Traduit de l'édition anglaise définitive (1896) : On the origin of species by means of naturel selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life*. London : Ed. Barbier, 1859 (cf. p. 14, 56).

- [DS14] Patrick DUBOIS et Julien SERRES. « Décodage de télégrammes KNX ». In : *La Revue 3EI*. 78. SEE, ISSN : 1252-770X, 2014, p. 44–50. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01848912/> (cf. p. 46).
- [Duc+20] David DUCHÉ, Marcel PASQUINELLI, Judikaël LE ROUZO et al. « A bio-inspired optical compass for robotic applications ». In : *Workshop GDR 2088 BIOMIM 1st Annual Meeting, Nice, France*. Oct. 2020, p. 34. URL : https://www.youtube.com/watch?v=f_N2Q6DIxw4 (cf. p. 42).
- [DW02] Andrew P DUCHON et William H WARREN JR. « A visual equalization strategy for locomotor control : of honeybees, robots, and humans ». In : *Psychological Science* 13.3 (2002), p. 272–278. DOI : 10.1111/1467-9280.00450. URL : http://www.cog.brown.edu/Research/ven_lab/Publications/DuchonWarren_Equalization_PS02.pdf (cf. p. 95, 96).
- [DW73] Peter DUELLI et Rüdiger WEHNER. « The spectral sensitivity of polarized light orientation in *Cataglyphis bicolor* (Formicidae, Hymenoptera) ». In : *Journal of Comparative Physiology A* 86.1 (fév. 1973), p. 37–53. ISSN : 1432-1351. DOI : 10.1007/BF00694476. URL : https://www.researchgate.net/profile/Peter_Duelli/publication/226836541_The_spectral_sensitivity_of_polarized_light_orientation_inCataglyphis_bicolor_Formicidae_Hymenoptera/links/5af475c9a6fdcc0c030aef26/The-spectral-sensitivity-of-polarized-light-orientation-inCataglyphis-bicolor-Formicidae-Hymenoptera.pdf (cf. p. 57).
- [Dup19] Julien DUPEYROUX. « Navigation autonome bio-inspirée appliquée à un robot hexapode ». Thèse de doct. ED 463 - École Doctorale des Sciences du Mouvement Humain, Aix Marseille Université, juil. 2019 (cf. p. 75).
- [Dup+18] Julien DUPEYROUX, Victor BOUTIN, Julien R SERRES et al. « M2APix : A Bio-Inspired Auto-Adaptive Visual Sensor for Robust Ground Height Estimation ». In : *Circuits and Systems (ISCAS), 2018 IEEE International Symposium on*. IEEE, Florence, Italy. 2018, p. 1–4. DOI : 10.1109/ISCAS.2018.8351433. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01915657> (cf. p. 38, 76).
- [Dup+17a] Julien DUPEYROUX, Julien DIPERI, Marc BOYRON, Stéphane VIOLLET et Julien SERRES. « A bio-inspired celestial compass applied to an ant-inspired robot for autonomous navigation ». In : *Mobile Robots (ECMR), 2017 European Conference on*. IEEE, Paris, France. 2017, p. 1–6. DOI : 10.1109/ECMR.2017.8098680. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01588859/> (cf. p. 39, 72).
- [Dup+17b] Julien DUPEYROUX, Julien DIPERI, Marc BOYRON, Stéphane VIOLLET et Julien SERRES. « A bio-inspired celestial compass for a hexapod walking robot in outdoor environment ». In : *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2017)*. IEEE, Vancouver, Canada. 2017. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01643182> (cf. p. 39).

- [Dup+17c] Julien DUPEYROUX, Julien DIPERI, Marc BOYRON, Stéphane VIOLETT et Julien SERRES. « A novel insect-inspired optical compass sensor for a hexapod walking robot ». In : *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2017 IEEE/RSJ International Conference on*. IEEE, Vancouver, Canada. 2017, p. 3439–3445. DOI : [10.1109/IROS.2017.8206183](https://doi.org/10.1109/IROS.2017.8206183). URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01643172> (cf. p. 39, 72).
- [Dup+17d] Julien DUPEYROUX, Julien DIPERI, Marc BOYRON, Stéphane VIOLETT et Julien R SERRES. « A bio-inspired celestial compass for a hexapod walking robot in outdoor environment ». In : *13^{ème} Journée de l'École Doctorale des Sciences du Mouvement Humain (JEDSMH)*. Montpellier, France, juin 2017. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01643182> (cf. p. 47).
- [Dup+20] Julien DUPEYROUX, Sean LAPALUS, Ilya BRODOLINE et al. « Insect-inspired omnidirectional vision for autonomous localization on-board a hexapod robot ». In : *28th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), 2020 IEEE International Conference on*. <https://www.youtube.com/watch?v=nxTZKQaXIe4>. IEEE, Saint-Raphaël, France. Sept. 2020, p. 893–898. DOI : [10.1109/MED48518.2020.9183091](https://doi.org/10.1109/MED48518.2020.9183091). URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02873353> (cf. p. 38).
- [Dup+17e] Julien DUPEYROUX, Grégoire PASSAULT, Franck RUFFIER et al. « Hexabot : a small 3D-printed six-legged walking robot designed for desert ant-like navigation tasks ». In : *IFAC World Congress 2017, Toulouse, France*. 2017. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01643176/> (cf. p. 40, 72).
- [DSV19a] Julien DUPEYROUX, Julien R SERRES et Stéphane VIOLETT. « AntBot : A six-legged walking robot able to home like desert ants in outdoor environments ». In : *Science Robotics* 4.27 (2019), eaau0307. DOI : [10.1126/scirobotics.aau0307](https://doi.org/10.1126/scirobotics.aau0307). URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02075700/> (cf. p. 36, 56, 73, 76, 77, 100).
- [DSV18] Julien DUPEYROUX, Julien SERRES et Stéphane VIOLETT. « A Hexapod Walking Robot Mimicking Navigation Strategies of Desert Ants Cataglyphis ». In : *Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems, Paris, France*. Springer. 2018, p. 145–156. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02075674/> (cf. p. 40).
- [DSV19b] Julien DUPEYROUX, Julien SERRES et Stéphane VIOLETT. « AntBot : a Fully Insect-Inspired Hexapod Homing like Desert Ants ». In : *4th International Conference on Invertebrate Vision (ICIV), Bäckaskog, Sweden*. poster number 68. 2019, p. 310. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02272156/> (cf. p. 40, 72).

- [DVS20a] Julien DUPEYROUX, Stéphane VIOLLET et Julien R SERRES. « Bio-inspired celestial compass yields new opportunities for urban localization ». In : *28th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, 2020 IEEE International Conference on. <https://www.youtube.com/watch?v=4hcwPFtA>. IEEE, Saint-Raphaël, France. Sept. 2020, p. 881–886. DOI : 10.1109/MED48518.2020.9183367. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02873353> (cf. p. 38).
- [DVS17] Julien DUPEYROUX, Stéphane VIOLLET et Julien R SERRES. « Providing an autonomous hexapod walking robot with the ability to reorientate : application of a novel ant-inspired celestial compass ». In : *Poster aux Journées des Jeunes Chercheurs en Robotique (JJCR)*. Biarritz, France, nov. 2017. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01643195> (cf. p. 47).
- [DVS19a] Julien DUPEYROUX, Stéphane VIOLLET et Julien R SERRES. « An ant-inspired celestial compass applied to autonomous outdoor robot navigation ». In : *Robotics and Autonomous Systems* 117 (2019), p. 40–56. DOI : 10.1016/j.robot.2019.04.007. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02105997> (cf. p. 36, 58, 60, 73).
- [DVS19b] Julien DUPEYROUX, Stéphane VIOLLET et Julien R SERRES. « Polarized skylight-based heading measurements : a bio-inspired approach ». In : *Journal of the Royal Society Interface* 16.150 (2019), p. 20180878. DOI : 10.1098/rsif.2018.0878. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01990800> (cf. p. 36, 73).
- [DVS20b] Julien DUPEYROUX, Stéphane VIOLLET et Julien R SERRES. *AntBot : un robot qui s'oriente comme une fourmi - Applications à la navigation à vue sans GPS ni magnétomètre*. note : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02500157v1>. Editions TI | Techniques de l'Ingénieur, 2020, Ref. IN236. URL : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/innovation-th10/conception-durable-inspiree-du-vivant-le-biomimetisme-42616210/antbot-un-robot-qui-s-oriente-comme-une-fourmi-in236/> (cf. p. 43).
- [Fal18] Maurice FALLON. « Accurate and robust localization for walking robots fusing kinematics, inertial, vision and LIDAR ». In : *Interface focus* 8.4 (2018), p. 20180015. DOI : 10.1098/rsfs.2018.0015. URL : <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rsfs.2018.0015> (cf. p. 86).
- [Fan+18] Chen FAN, Xiaoping HU, Xiaofeng HE et al. « Multicamera polarized vision for the orientation with the skylight polarization patterns ». In : *Optical Engineering* 57.4 (2018), p. 043101. DOI : 10.1117/1.OE.57.4.043101. URL : https://www.researchgate.net/profile/Chen_Fan13/publication/324369443_Multicamera_polarized_vision_for_the_orientation_with_the_skylight_polarization_patterns/links/5ad027dd4585154f3f47ca64/Multicamera-polarized-vision-

for-the-orientation-with-the-skylight-polarization-patterns.pdf (cf. p. 93).

- [FHL92] John M FLACH, Brent A HAGEN et John F LARISH. « Active regulation of altitude as a function of optical texture ». In : *Perception & Psychophysics* 51.6 (1992), p. 557–568. URL : <https://link.springer.com/content/pdf/10.3758/BF03211653.pdf> (cf. p. 96).
- [Fla+97] John M FLACH, Rik WARREN, Sheila A GARNES et al. « Perception and control of altitude : Splay and depression angles. » In : *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance* 23.6 (1997), p. 1764. DOI : 10.1037/0096-1523.23.6.1764. URL : https://www.researchgate.net/profile/John_Flach/publication/232522225_Perception_and_Control_of_Altitude_Splay_and_Depression_Angles/links/02e7e51b7639a5da4f000000/Perception-and-Control-of-Altitude-Splay-and-Depression-Angles.pdf (cf. p. 95).
- [FIS14] Dario FLOREANO, Auke Jan IJSPEERT et Stefan SCHAAAL. « Robotics and neuroscience ». In : *Current Biology* 24.18 (2014), R910–R920. DOI : 10.1016/j.cub.2014.07.058. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096098221400921X#sec1> (cf. p. 14).
- [Flo+13] Dario FLOREANO, Ramon PERICET-CAMARA, Stéphane VIOLLET et al. « Miniature curved artificial compound eyes ». In : *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110.23 (2013), p. 9267–9272. DOI : 10.1073/pnas.1219068110. URL : <https://www.pnas.org/content/110/23/9267> (cf. p. 15).
- [Fra85] Nicolas FRANCESCHINI. « Early processing of colour and motion in a mosaic visual system ». In : *Neuroscience Research Supplements* 2 (1985), S17–S49. DOI : 10.1016/0921-8696(85)90005-2. URL : https://www.researchgate.net/profile/Nicolas_Franceschini/publication/19296091_Early_processing_of_color_and_motion_in_a_mosaic_visual_system/links/5d43f999a6fdcc370a744bc7/Early-processing-of-color-and-motion-in-a-mosaic-visual-system.pdf (cf. p. 66).
- [Fra14] Nicolas FRANCESCHINI. « Small brains, smart machines : from fly vision to robot vision and back again ». In : *Proceedings of the IEEE* 102.5 (2014), p. 751–781. DOI : 10.1109/JPROC.2014.2312916. URL : https://www.researchgate.net/profile/Nicolas_Franceschini/publication/261957721_Small_Brains_Smart_Machines_From_Fly_Vision_to_Robot_Vision_and_Back_Again/links/55cd140708aebd6b88e05d48.pdf (cf. p. 14).
- [FRL89] Nicolas FRANCESCHINI, Alexa RIEHLE et Agnes LE NESTOUR. « Directionally selective motion detection by insect neurons ». In : *Facets of vision*. ISBN : 978-3642740824. Springer, Berlin/Heidelberg, Germany, 1989, p. 360–390 (cf. p. 66).

- [FRSo7a] Nicolas FRANCESCHINI, Franck RUFFIER et Julien SERRES. « A bio-inspired flying robot sheds light on insect piloting abilities ». In : *Current Biology* 17.4 (2007), p. 329–335. DOI : [10.1016/j.cub.2006.12.032](https://doi.org/10.1016/j.cub.2006.12.032). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02295687/> (cf. p. 14, 37, 69, 78, 81, 93).
- [FRSo7b] Nicolas FRANCESCHINI, Franck RUFFIER et Julien SERRES. « Insects as pilots : optic flow regulation for vertical and horizontal guidance ». In : *Proceedings of the International Symposium on Flying Insects and Robots (FIR), Ascona, Switzerland*. 2007, p. 37–38. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02195516/> (cf. p. 42).
- [FRSo7c] Nicolas FRANCESCHINI, Franck RUFFIER et Julien SERRES. « Optic flow based autopilot : From insects to rotorcraft and back ». In : *Comparative Biochemistry and Physiology, Part A. Abstracts of the Annual Main Meetings of the Society for Experimental Biology, Glasgow, Scotland*. T. 146. 4. 2007, S133. DOI : [10.1016/j.cbpa.2007.01.255](https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2007.01.255). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02295426/> (cf. p. 41).
- [FRSo7d] Nicolas FRANCESCHINI, Franck RUFFIER et Julien SERRES. « Y a-t-il un pilote dans l'insecte ? » In : *Voir l'invisible*. Jean-Pierre Gex (Ed.), Omniscience, collection Ecrin, Paris, 2007, p. 216–217. ISBN : 978-291-609-7138 (cf. p. 45).
- [FRSo8] Nicolas FRANCESCHINI, Franck RUFFIER et Julien SERRES. « From insects to robots and back ». In : *Proceedings of the 2nd International Conference on Invertebrate Vision (ICIV), Bäckaskog, Sweden*. 2008. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02195476v1/> (cf. p. 41).
- [FRSi0a] Nicolas FRANCESCHINI, Franck RUFFIER et Julien SERRES. « Aerial navigation and optic flow sensing. A biorobotic approach ». In : *Motor Control*. F. Danion & M. L. Latash (Eds.). Oxford University Press, 2010. Chap. 19, p. 451–447. ISBN : 978-019-539-5273 (cf. p. 44).
- [FRSi0b] Nicolas FRANCESCHINI, Franck RUFFIER et Julien SERRES. « Biomimetic Optic Flow Sensors and Autopilots for MAV Guidance ». In : *Encyclopedia of Aerospace Engineering*. Wiley Online Library, 2010. DOI : [10.1002/9780470686652.eae409](https://doi.org/10.1002/9780470686652.eae409). URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470686652.eae409> (cf. p. 38).
- [FRSi0c] Nicolas FRANCESCHINI, Franck RUFFIER et Julien SERRES. « Insect Inspired Autopilots ». In : *Journal of Aero Aqua Bio-mechanisms* 1.1 (2010), p. 2–10. DOI : [10.5226/jabmech.1.2](https://doi.org/10.5226/jabmech.1.2). URL : https://www.jstage.jst.go.jp/article/jabmech/1/1/1_1_2/_pdf/-char/en (cf. p. 38).
- [Fra+09a] Nicolas FRANCESCHINI, Franck RUFFIER, Julien SERRES et Stéphane VIOLLET. « Optic flow based visual guidance : from flying insects to miniature aerial vehicles ». In : *Aerial vehicles*. note : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-03042183/>. InTech, Vienna, 2009. Chap. 35, p. 747–

770. ISBN : 978-953-7619-411. DOI : [10.5772/6491](https://doi.org/10.5772/6491). URL : https://www.intechopen.com/books/aerial_vehicles/optic_flow_based_visual_guidance_from_flying_insects_to_miniature_aerial_vehicles (cf. p. 44).
- [Fra+08a] Nicolas FRANCESCHINI, Viollet STÉPHANE, Franck RUFFIER et al. « The insect compound eye : from micro-optics and neuronics to biorobotics ». In : *Nanomaterials and Insect Biomimetics*. Masatsugu Shimomura, Tateo Shimozaawa (Ed.). Tokyo : NTS, 2008, p. 1–18. ISBN : 978-486-043-1983 (cf. p. 45).
- [Fra+08b] Nicolas FRANCESCHINI, Stéphane VIOLLET, Franck RUFFIER et al. « Neuro-mimetic Robots inspired by Insect Vision ». In : *Proceedings of the 3rd International Conference “Smart, Materials, Structures and Systems” (CIMTEC), Acireale, Sicily, Italy*. E-4.2 : ILO3. Juin 2008. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02296278/> (cf. p. 41).
- [Fra+09b] Nicolas FRANCESCHINI, Stéphane VIOLLET, Franck RUFFIER et al. « Neuro-mimetic robots inspired by insect vision ». In : *Mining Smartness from Nature*. T. 58. Advances in Science and Technology. P. Vincenzini & S. Graziani (Eds.), Trans Tech Publications Ltd, Switzerland. Fév. 2009, p. 127–136. ISBN : 978-3908-158-240. DOI : [10.4028/www.scientific.net/AST.58.127](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AST.58.127). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01446805> (cf. p. 38).
- [Fra+11] Matthieu FRANÇOIS, Antoine HP MORICE, Reinoud J BOOTSMA et al. « Visual control of walking velocity ». In : *Neuroscience research* 70.2 (2011), p. 214–219. DOI : [10.1016/j.neures.2011.02.003](https://doi.org/10.1016/j.neures.2011.02.003) (cf. p. 95).
- [Fra+76] LI FRANTSEVICH, VV ZOLOTOV, FG GRIBAKIN et al. « Polarotaxis in beetles of genus *Lethrus* (Coleoptera, Scarabaeidae) in different spectral regions ». In : *Doklady Akademii nauk SSSR* 226.3 (1976). in Russian, p. 733 (cf. p. 57).
- [FMoo] Matthias O FRANZ et Hanspeter A MALLOT. « Biomimetic robot navigation ». In : *Robotics and autonomous Systems* 30.1-2 (2000), p. 133–153. DOI : [10.1016/S0921-8890\(99\)00069-X](https://doi.org/10.1016/S0921-8890(99)00069-X). URL : https://www.cs.cmu.edu/afs/cs.cmu.edu/Web/People/motionplanning/papers/sbp_papers/integrated1/franz_navigation.pdf (cf. p. 14).
- [Gál+01] József GÁL, Gábor HORVÁTH, András BARTA et al. « Polarization of the moonlit clear night sky measured by full-sky imaging polarimetry at full Moon : Comparison of the polarization of moonlit and sunlit skies ». In : *Journal of Geophysical Research : Atmospheres* 106.D19 (2001), p. 22647–22653. DOI : [10.1029/2000JD000085](https://doi.org/10.1029/2000JD000085). URL : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2000JD000085> (cf. p. 63, 64).
- [Gib50] James Jerome GIBSON. *The perception of the visual world*. Boston, MA, US : Houghton, Mifflin et Company, 1950 (cf. p. 15, 55, 65, 67, 84, 94).
- [Gib66] James Jerome GIBSON. *The senses considered as perceptual systems*. Boston, MA, US : Houghton, Mifflin et Company, 1966 (cf. p. 84, 97).

- [Gib77] James Jerome GIBSON. « The theory of affordances ». In : *Hilldale, USA* 1.2 (1977) (cf. p. 97).
- [Gib79] James Jerome GIBSON. *The ecological approach to visual perception*. Boston, MA, US : Houghton, Mifflin et Company, 1979 (cf. p. 65, 67, 84, 93, 95, 97).
- [Gib86] James Jerome GIBSON. « The ecological approach to visual perception. Hillsdale ». In : *NJ : Lawrence* (1986) (cf. p. 97).
- [GFR19] Robin GROB, Pauline N FLEISCHMANN et Wolfgang RÖSSLER. « Learning to navigate—how desert ants calibrate their compass systems ». In : *Neuroforum* 25.2 (2019), p. 109–120. DOI : 10.1515/nf-2018-0011. URL : <https://www.degruyter.com/view/journals/nf/25/2/article-p109.xml> (cf. p. 75).
- [Gua+18] Le GUAN, Shiqi LI, Liyuan ZHAI et al. « Study on skylight polarization patterns over the ocean for polarized light navigation application ». In : *Applied optics* 57.21 (2018), p. 6243–6251. DOI : 10.1364/AO.57.006243 (cf. p. 92).
- [Gua+20] Le GUAN, Liyuan ZHAI, Hong CAI et al. « Study on displacement estimation in low illumination environment through polarized contrast-enhanced optical flow method for polarization navigation applications ». In : *Optik* (2020), p. 164513. DOI : 10.1016/j.ijleo.2020.164513 (cf. p. 92).
- [Gui19] Nathalie GUIBERT. « La nouvelle guerre du GPS et ses risques ». In : *Le Monde* (mai 2019), p. 25. URL : https://www.lemonde.fr/idees/article/2019/05/02/la-nouvelle-guerre-du-gps-et-ses-risques_5457320_3232.html (cf. p. 89).
- [Had+04] D HADDAD, F SCHAUPP, R BRANDT et al. « NMR imaging of the honeybee brain ». In : *Journal of Insect Science* 4.1 (2004). DOI : 10.1093/jis/4.1.7. URL : <https://academic.oup.com/jinsectscience/article/4/1/7/882633> (cf. p. 95).
- [Hai44] Wilhelm HAIDINGER. « Ueber das directe Erkennen des polarisirten Lichts und der Lage der Polarisationssebene ». In : *Annalen der Physik* 139.9 (1844), p. 29–39. DOI : 10.1002/andp.18441390903. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/andp.18441390903> (cf. p. 61).
- [Ham17] Moshe HAMAOUI. « Polarized skylight navigation ». In : *Applied optics* 56.3 (2017), B37–B46. DOI : 10.1364/AO.56.000B37 (cf. p. 92).
- [He+19] Ruiguang HE, Xiaoping HU, Lilian ZHANG et al. « A combination orientation compass based on the information of polarized skylight/geomagnetic/MIMU ». In : *IEEE Access* 8 (2019), p. 10879–10887. DOI : 10.1109/ACCESS.2019.2939591. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8936563> (cf. p. 93).

- [HE74] Otto von HELVERSEN et Wolfgang EDRICH. « Der polarisationsempfänger im Bienenauge : ein Ultraviolett-rezeptor ». In : *Journal of comparative physiology* 94.1 (1974), p. 33–47. URL : <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00610156> (cf. p. 57).
- [HL63] Herbert HERAN et Martin LINDAUER. « Windkompensation und seitenwind-korrektur der bienen beim flug über wasser ». In : *Zeitschrift für vergleichende Physiologie* 47.1 (1963), p. 39–55. URL : <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00342890> (cf. p. 79, 83, 93).
- [Hom+11] Uwe HOMBERG, Stanley HEINZE, Keram PFEIFFER et al. « Central neural coding of sky polarization in insects ». In : *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 366.1565 (2011), p. 680–687. DOI : 10.1098/rstb.2010.0199. URL : <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rstb.2010.0199> (cf. p. 74, 75).
- [Hun+01] DM HUNT, SE WILKIE, JK BOWMAKER et al. « Vision in the ultraviolet ». In : *Cellular and Molecular Life Sciences CMLS* 58.11 (2001), p. 1583–1598. URL : https://www.researchgate.net/profile/David_Hunt9/publication/11648015_Vision_in_the_ultraviolet/links/0deec51c9a96b3be1f000000/Vision-in-the-ultraviolet.pdf (cf. p. 59, 99).
- [Ibb01] MR IBBOTSON. « Evidence for velocity-tuned motion-sensitive descending neurons in the honeybee ». In : *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 268.1482 (2001), p. 2195–2201. DOI : 10.1098/rspb.2001.1770. URL : https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rspb.2001.1770?casa_token=OKunce8ISLcAAAAA:XnoZc6_WAaw3307V8Nm99N9fgJxft0W9Iv0IC4ERuTVSaZKKGt9HrnVcQrRf3hhIyF1yL47 (cf. p. 95).
- [Ibb+17] MR IBBOTSON, Y-S HUNG, H MEFFIN et al. « Neural basis of forward flight control and landing in honeybees ». In : *Scientific reports* 7.1 (2017), p. 14591. URL : <https://www.nature.com/articles/s41598-017-14954-0> (cf. p. 95).
- [Ijs14] Auke J IJSPEERT. « Biorobotics : Using robots to emulate and investigate agile locomotion ». In : *science* 346.6206 (2014), p. 196–203. DOI : 10.1126/science.1254486. URL : <https://infoscience.epfl.ch/record/202118/files/Science-2014-Biorobotics-Ijspeert-Preprint.pdf> (cf. p. 15).
- [Jesur] Catherine JESSUS. « Étonnant vivant. Découvertes et promesses du XXIe siècle ». In : CNRS Éditions, 2017 (Contributeur). ISBN : 978-227-109-4032 (cf. p. 45).
- [Kam19] Lauren KAMILI. « Biomimétisme et bio-inspiration : nouvelles techniques, nouvelles éthiques ? » In : *Techniques & Culture. Revue semestrielle d'anthropologie des techniques* (2019). URL : <https://journals.openedition.org/tc/9299> (cf. p. 104).

- [Ken40] John Stodart KENNEDY. « The visual responses of flying mosquitoes ». In : *Proceedings of the Zoological Society of London* 109.4 (1940), p. 221–242. DOI : [10.1111/j.1096-3642.1940.tb00831.x](https://doi.org/10.1111/j.1096-3642.1940.tb00831.x) (cf. p. 93).
- [Ken51] John Stodart KENNEDY. « The migration of the desert locust (*Schistocerca gregaria* Forsk.). I. The behaviour of swarms. II. A theory of long-range migrations ». In : *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* (1951), p. 163–290. URL : www.jstor.org/stable/92412 (cf. p. 93).
- [Ker+12] Roland KERN, Norbert BOEDDEKER, Laura DITTMAR et al. « Blowfly flight characteristics are shaped by environmental features and controlled by optic flow information ». In : *Journal of Experimental Biology* 215.14 (2012), p. 2501–2514. DOI : [10.1242/jeb.061713](https://doi.org/10.1242/jeb.061713). URL : <https://jeb.biologists.org/content/215/14/2501.long> (cf. p. 71).
- [KCD01] Peter G KEVAN, Lars CHITTKA et Adrian G DYER. « Limits to the salience of ultraviolet : lessons from colour vision in bees and birds ». In : *Journal of Experimental Biology* 204.14 (2001), p. 2571–2580. URL : <https://jeb.biologists.org/content/204/14/2571.long> (cf. p. 59, 99).
- [KFM77] K KIRSCHFELD, N FRANCESCHINI et B MINKE. « Evidence for a sensitising pigment in fly photoreceptors ». In : *Nature* 269.5627 (1977), p. 386–390. DOI : [10.1038/269386a0](https://doi.org/10.1038/269386a0). URL : https://www.researchgate.net/profile/Nicolas_Franceschini/publication/22244540_Evidence_for_a_sensitising_pigment_in_fly_photoreceptors/links/0f31753c6e435cba73000000Evidence-for-a-sensitising-pigment-in-fly-photoreceptors.pdf (cf. p. 59).
- [KD87] J.J. KOENDERINK et A.J. DOORN. « Facts on optic flow ». In : *Biological Cybernetics* 56 (1987), p. 247–254. URL : <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00365219> (cf. p. 67).
- [KVK99] Minna KOIVULA, Jussi VIITALA et Erkki KORPIMÄKI. « Kestrels prefer scent marks according to species and reproductive status of voles ». In : *Ecoscience* 6.3 (1999), p. 415–420. URL : https://www.researchgate.net/profile/Erkki_Korpimaeki/publication/236947780_Kestrels_prefer_scent_marks_according_to_species_and_reproductive_status_of_voles/links/0deec51a8b9713f992000000.pdf (cf. p. 99).
- [Kra07] Holger G KRAPP. « Polarization vision : how insects find their way by watching the sky ». In : *Current biology* 17.14 (2007), R557–R560. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960982207014017> (cf. p. 74).
- [Kra14] Holger G KRAPP. « Sensory integration : neuronal filters for polarized light patterns ». In : *Current Biology* 24.18 (2014), R840–R841. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960982214010331> (cf. p. 75).

- [KH96] Holger G KRAPP et Roland HENGSTENBERG. « Estimation of self-motion by optic flow processing in single visual interneurons ». In : *Nature* 384.6608 (1996), p. 463–466. URL : <https://www.utoronto.ca/~amason/courses/coursepage/week6/krapp.pdf> (cf. p. 67).
- [Kyb+11] Christopher CM KYBA, Thomas RUHTZ, Jet FISCHER et al. « Lunar skylight polarization signal polluted by urban lighting ». In : *Journal of Geophysical Research : Atmospheres* 116.D24 (2011). DOI : [10.1029/2011JD016698](https://doi.org/10.1029/2011JD016698). URL : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2011JD016698> (cf. p. 103).
- [Lab80] Thomas LABHART. « Specialized photoreceptors at the dorsal rim of the honeybee’s compound eye : Polarizational and angular sensitivity ». In : *Journal of comparative physiology* 141.1 (mar. 1980), p. 19–30. ISSN : 1432-1351. DOI : [10.1007/BF00611874](https://doi.org/10.1007/BF00611874) (cf. p. 57).
- [LM99] Thomas LABHART et Eric P MEYER. « Detectors for polarized skylight in insects : a survey of ommatidial specializations in the dorsal rim area of the compound eye ». In : *Microscopy research and technique* 47.6 (1999), p. 368–379. DOI : [10.1002/\(SICI\)1097-0029\(19991215\)47:6<368::AID-JEMT2>3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0029(19991215)47:6<368::AID-JEMT2>3.0.CO;2-Q) (cf. p. 91).
- [LL14] Renaud LAHAYE et Sylvie LADET. « Les principes du positionnement par satellite : GNSS ». In : *Le Cahier des Techniques de l’INRA* (2014), p. 9–18. URL : http://www.academia.edu/download/36935335/05_CH1_LAHAYE_gnss.pdf (cf. p. 86).
- [Lam+97] Dimitrios LAMBRINOS, Hiroshi KOBAYASHI, Rolf PFEIFER et al. « An autonomous agent navigating with a polarized light compass ». In : *Adaptive behavior* 6.1 (1997), p. 131–161. DOI : [10.1177/105971239700600104](https://doi.org/10.1177/105971239700600104) (cf. p. 75).
- [Lam+00] Dimitrios LAMBRINOS, Ralf MÖLLER, Thomas LABHART et al. « A mobile robot employing insect strategies for navigation ». In : *Robotics and Autonomous systems* 30.1-2 (2000), p. 39–64. DOI : [10.1016/S0921-8890\(99\)00064-0](https://doi.org/10.1016/S0921-8890(99)00064-0). URL : http://www.ims.uzh.ch/static/CMS_publications/neuhauss/literatur_labhart/pdf/Lambrinos_etal_RobAutSyst2000.pdf (cf. p. 75).
- [LF90] John F LARISH et John M FLACH. « Sources of optical information useful for perception of speed of rectilinear self-motion. ». In : *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance* 16.2 (1990), p. 295. DOI : [10.1037/0096-1523.16.2.295](https://doi.org/10.1037/0096-1523.16.2.295). URL : https://www.researchgate.net/profile/John_Flach/publication/21014234_Sources_of_Optical_Information_Useful_for_Perception_of_Speed_of_Rectilinear_Self-Motion/links/0c96051b7646163eca000000.pdf (cf. p. 96).

- [Le 19] Souazing LE NEVÉ. « La nouvelle guerre du GPS et ses risques ». In : *Le Monde* (nov. 2019). URL : https://www.lemonde.fr/campus/article/2019/11/12/des-etudiants-a-l-ecole-de-la-nature_6018820_4401467.html (cf. p. 102).
- [Lec19] Julien LECOEUR. « Insect-Inspired Visual Perception for Flight Control and Collision Avoidance ». Thèse de doct. N°9316, EPFL, jan. 2019. URL : <https://infoscience.epfl.ch/record/265975> (cf. p. 95).
- [Lec+19] Julien LECOEUR, Marie DACKÉ, Dario FLOREANO et al. « The role of optic flow pooling in insect flight control in cluttered environments ». In : *Scientific reports* 9.1 (2019), p. 7707. URL : <https://www.nature.com/articles/s41598-019-44187-2> (cf. p. 95).
- [Ler+11] Amit LERNER, Shai SABBAH, Carynelisa ERLICK et al. « Navigation by light polarization in clear and turbid waters ». In : *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences* 366.1565 (2011), p. 671–679. DOI : [10.1098/rstb.2010.0189](https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rstb.2010.0189). URL : <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rstb.2010.0189> (cf. p. 60).
- [Ler98] Jean-Louis LEROY. *La polarisation de la lumière et l'observation astronomique*. Amsterdam : Gordon & Breach, 1998. ISBN : 905699116pbk (cf. p. 62).
- [Li+20] Jinshan LI, Jinkui CHU, Ran ZHANG et al. « Bio-inspired attitude measurement method using a polarization skylight and a gravitational field ». In : *Applied Optics* 59.9 (2020), p. 2955–2962. DOI : [10.1364/AO.387770](https://doi.org/10.1364/AO.387770) (cf. p. 92).
- [LC10] Li LI et Jing CHEN. « Relative contributions of optic flow, bearing, and splay angle information to lane keeping ». In : *Journal of vision* 10.11 (2010), p. 16–16. DOI : [10.1167/10.11.16](https://doi.org/10.1167/10.11.16). URL : <https://jov.arvojournals.org/article.aspx?articleid=2191630> (cf. p. 95).
- [Lin+13] Olle LIND, Mindaugas MITKUS, Peter OLSSON et al. « Ultraviolet sensitivity and colour vision in raptor foraging ». In : *Journal of Experimental Biology* 216.10 (2013), p. 1819–1826. URL : <https://jeb.biologists.org/content/jexbio/216/10/1819.full.pdf> (cf. p. 99).
- [Lin+14] Olle LIND, Mindaugas MITKUS, Peter OLSSON et al. « Ultraviolet vision in birds : the importance of transparent eye media ». In : *Proceedings of the Royal Society B : Biological Sciences* 281.1774 (2014), p. 20132209. DOI : [10.1098/rspb.2013.2209](https://doi.org/10.1098/rspb.2013.2209). URL : <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rspb.2013.2209> (cf. p. 59, 99).
- [LFW20] Bianbian LIU, Zhiguo FAN et Xianqiu WANG. « Solar Position Acquisition Method for Polarized Light Navigation Based on Characteristic Model of Polarized Skylight Pattern ». In : *IEEE Access* 8 (2020), p. 56720–56729. DOI : [10.1109/ACCESS.2020.2982259](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2982259). URL : <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9043571> (cf. p. 92).

- [Liu+ss] Xin LIU, Jian YANG, Lei GUO et al. « Design and Calibration Model of a Bioinspired Attitude and Heading Reference System Based on Compound Eye Polarization Compass ». In : *Bioinspiration & Biomimetics* (2020 (in press)) (cf. p. 92).
- [Lyn15] David K LYNCH. « Snell's window in wavy water ». In : *Applied optics* 54.4 (2015), B8–B11. DOI : 10.1364/AO.54.0000B8. URL : <https://www.osapublishing.org/viewmedia.cfm?uri=ao-54-4-B8&seq=0> (cf. p. 60).
- [MW12] Michael MANGAN et Barbara WEBB. « Spontaneous formation of multiple routes in individual desert ants (*Cataglyphis velox*) ». In : *Behavioral Ecology* 23.5 (2012), p. 944–954. URL : <https://academic.oup.com/beheco/article-pdf/23/5/944/17281348/ars051.pdf> (cf. p. 100).
- [Mar87] Leonard S MARK. « Eyeheight-scaled information about affordances : A study of sitting and stair climbing. » In : *Journal of experimental psychology : human perception and performance* 13.3 (1987), p. 361. DOI : 10.1037/0096-1523.13.3.361. URL : <http://www.academia.edu/download/44714688/Eyeheight-Scaled-Information-About-Affor20160413-1008-117qjc7.pdf> (cf. p. 97).
- [MV87] Leonard S MARK et David VOGELE. « A biodynamic basis for perceived categories of action : A study of sitting and stair climbing ». In : *Journal of Motor Behavior* 19.3 (1987), p. 367–384. DOI : 10.1080/00222895.1987.10735418 (cf. p. 97).
- [Mar88] N Justin MARSHALL. « A unique colour and polarization vision system in mantis shrimps ». In : *Nature* 333.6173 (1988), p. 557. DOI : 10.1038/333557a0 (cf. p. 60).
- [MMM15] Geoffrey MARTI, Antoine HP MORICE et Gilles MONTAGNE. « Drivers' decision-making when attempting to cross an intersection results from choice between affordances ». In : *Frontiers in human neuroscience* 8 (2015), p. 1026. DOI : 10.3389/fnhum.2014.01026. URL : <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnhum.2014.01026> (cf. p. 84).
- [Mar17] Graham R MARTIN. *The sensory ecology of birds*. ISBN : 978-0199694549. Oxford University Press, 2017 (cf. p. 83).
- [Mat+19] Thomas MATHIEU, José PEREIRA FIGUEIRA, Julien R SERRES et al. « On the functional nature of perceptual-motor coupling during ship deck landing maneuvers ». In : *Journées Françaises d'Informatique Graphique et de Réalité Virtuelle (JF.IG.RV)*, Marseille, France. Nov. 2019. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03039183> (cf. p. 46, 55, 84, 97).

- [Mee97] Audrey LH van der MEER. « Visual guidance of passing under a barrier ». In : *Infant and Child Development* 6.3-4 (1997), p. 149–158. DOI : [10.1002/\(SICI\)1099-0917\(199709/12\)6:3/4<149::AID-EDP154>3.0.CO;2-2](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0917(199709/12)6:3/4<149::AID-EDP154>3.0.CO;2-2). URL : <http://www.academia.edu/download/3542742/ducking.pdf> (cf. p. 97).
- [Mey81] V. B. MEYER-ROCHOW. « Electrophysiology and histology of the eye of the bumblebee *Bombus hortorum* (L.) (Hymenoptera : Apidae) ». In : *Journal of the Royal Society of New Zealand* 11.2 (1981), p. 123–153. DOI : [10.1080/03036758.1981.10419447](https://doi.org/10.1080/03036758.1981.10419447) (cf. p. 57).
- [Mon+20] Jocelyn MONNOYER, Julien DUPEYROUX, Stéphane VIOLET et al. « Dispositif de détection d'un cap d'un véhicule par détection de photons polarisés linéairement ». Patent FR3086088A1 (FR). Mar. 2020. URL : <https://bases-brevets.inpi.fr/en/document-en/FR3086088.html?s=1585818714604&p=5&cHash=8d710a249279c7513ccc66a4066363f0> (cf. p. 48, 56, 92).
- [Moo50] Alton B MOODY. « The Pfund sky compass ». In : *The International Hydrographic Review* 2 (1950). URL : <https://journals.lib.unb.ca/index.php/ihr/article/download/26936/1882519695/> (cf. p. 89).
- [Moo86] Frank R MOORE. « Sunrise, skylight polarization, and the early morning orientation of night-migrating warblers ». In : *The Condor* 88.4 (1986), p. 493–498. URL : <https://academic.oup.com/condor/article-pdf/88/4/493/28188195/condor0493.pdf> (cf. p. 99).
- [Mori9] Olivier MOREL. « Contributions à l'imagerie polarimétrique et à ses applications en vision pour la robotique ». HAL Id : tel-02408798. Thèse de doct. Université Bourgogne-Franche-Comté, 2019. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-02408798> (cf. p. 55, 62).
- [Mor+is] Antoine H P MORICE, Thomas RAKOTOMAMONJY, Julien R SERRES et al. « Ecological design of augmentation improves helicopter ship landing maneuvers : an approach in augmented virtuality ». In : *PLOS One* (2020 (soumis)) (cf. p. 35, 55, 84).
- [Mue+17] Elias MUEGGLER, Henri REBECQ, Guillermo GALLEGO et al. « The event-camera dataset and simulator : Event-based data for pose estimation, visual odometry, and SLAM ». In : *The International Journal of Robotics Research* 36.2 (2017), p. 142–149. DOI : [10.1177/0278364917691115](https://doi.org/10.1177/0278364917691115). URL : <https://arxiv.org/pdf/1610.08336> (cf. p. 86).
- [Muh11] Rachel MUHEIM. « Behavioural and physiological mechanisms of polarized light sensitivity in birds ». In : *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences* 366.1565 (2011), p. 763–771. DOI : [10.1098/rstb.2010.0196](https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0196). URL : <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rstb.2010.0196> (cf. p. 99).

- [MPÅo6] Rachel MUHEIM, John B PHILLIPS et Susanne ÅKESSON. « Polarized light cues underlie compass calibration in migratory songbirds ». In : *Science* 313.5788 (2006), p. 837–839. URL : https://www.researchgate.net/profile/Rachel_Muheim/publication/6885470_Polarized_Light_Cues_Underlie_Compass_Calibration_in_Migratory_Songbirds/links/0912f50c5d002f168a000000.pdf (cf. p. 99).
- [MW88] Martin MÜLLER et Rüdiger WEHNER. « Path integration in desert ants, *Cataglyphis fortis* ». In : *Proceedings of the National Academy of Sciences* 85.14 (1988), p. 5287–5290. DOI : [10.1073/pnas.85.14.5287](https://www.pnas.org/content/pnas/85/14/5287.full.pdf). URL : <https://www.pnas.org/content/pnas/85/14/5287.full.pdf> (cf. p. 91).
- [Mur+19] Trevor MURRAY, Zoltan KOCSI, Hansjürgen DAHMEN et al. « The role of attractive and repellent scene memories in ant homing (*Myrmecia croslandi*) ». In : *Journal of Experimental Biology* (2019). DOI : [10.1242/jeb.210021](https://doi.org/10.1242/jeb.210021) (cf. p. 100).
- [NL74] K NAKAYAMA et JM LOOMIS. « Optical velocity patterns, velocity-sensitive neurons, and space perception : a hypothesis ». In : *Perception* 3.1 (1974), p. 63–80. DOI : [10.1068/p030063](https://pdfs.semanticscholar.org/94fd/f4857d6a3b6593d10541bcd3e8c8df19c5e2.pdf). URL : <https://pdfs.semanticscholar.org/94fd/f4857d6a3b6593d10541bcd3e8c8df19c5e2.pdf> (cf. p. 67).
- [Ou+16] Yawen OU, Pengfei WU, Chaoli TANG et al. « Analysis on the Influence Factors to Atmospheric Polarization Navigation ». In : *China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2016 Proceedings : Volume II*. Springer. 2016, p. 583–593. DOI : [10.1007/978-981-10-0937-2_49](https://doi.org/10.1007/978-981-10-0937-2_49) (cf. p. 65).
- [PW16] Sarah E PFEFFER et Matthias WITTLINGER. « Optic flow odometry operates independently of stride integration in carried ants ». In : *Science* 353.6304 (2016), p. 1155–1157. DOI : [10.1126/science.aaf9754](https://doi.org/10.1126/science.aaf9754). URL : <http://www.dictionnaire-amoureux-des-fourmis.fr/0/Orientation/Pfeffer-Science-2016-Cata-1155.full.pdf> (cf. p. 74).
- [PNH10] Keram PFEIFFER, Mario NEGRELLO et Uwe HOMBERG. « Conditional perception under stimulus ambiguity : polarization-and azimuth-sensitive neurons in the locust brain are inhibited by low degrees of polarization ». In : *Journal of Neurophysiology* 105.1 (2010), p. 28–35. DOI : [10.1152/jn.00480.2010](https://doi.org/10.1152/jn.00480.2010) (cf. p. 63).
- [Pin+07] Philippe PINEL, Bertrand THIRION, Sébastien MERIAUX et al. « Fast reproducible identification and large-scale databasing of individual functional cognitive networks ». In : *BMC neuroscience* 8.1 (2007), p. 91. DOI : [10.1186/1471-2202-8-91](https://doi.org/10.1186/1471-2202-8-91). URL : <https://hal.inria.fr/hal-00784462/> (cf. p. 37).
- [PHW01] István POMOZI, Gábor HORVÁTH et Rüdiger WEHNER. « How the clear-sky angle of polarization pattern continues underneath clouds : full-sky measurements and implications for animal orientation ». In : *Journal of Experimental Biology* 204.17 (2001), p. 2933–2942. URL : <https://jeb.biologists.org/content/jexbio/96/1/69.full.pdf> (cf. p. 58).

- [Por+07] Geoffrey PORTELLI, Maëlle OGIER, Julien SERRES et al. « A bee in the corridor : side-slip control autopilot ». In : *Proceedings of the International Symposium on Flying Insects and Robots (FIR)*, Ascona, Switzerland. 2007, p. 91–92. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02195537/> (cf. p. 42).
- [Por+11] Geoffrey PORTELLI, Franck RUFFIER, Frédéric L ROUBIEU et al. « Honeybees' speed depends on dorsal as well as lateral, ventral and frontal optic flows ». In : *PloS one* 6.5 (2011), e19486. DOI : 10.1371/journal.pone.0019486. URL : <https://journals.plos.org/plosone/article/file?id=10.1371/journal.pone.0019486&type=printable> (cf. p. 95, 96).
- [PSR17] Geoffrey PORTELLI, Julien R SERRES et Franck RUFFIER. « Altitude control in honeybees : joint vision-based learning and guidance ». In : *Scientific reports* 7.1 (2017), p. 9231. DOI : 10.1038/s41598-017-09112-5. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01644531/> (cf. p. 36, 55, 79, 81).
- [Por+08a] Geoffrey PORTELLI, Julien SERRES, Franck RUFFIER et al. « 3D Navigation With An Insect-Inspired Autopilot ». In : *Actes de la 2^{ème} conférence française de Neurosciences Computationnelles (NEUROCOMP)*, Marseille, France. Oct. 2008. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00331566/> (cf. p. 47).
- [Por+08b] Geoffrey PORTELLI, Julien SERRES, Franck RUFFIER et al. « A 3d insect-inspired visual autopilot for corridor-following ». In : *Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2008. BioRob 2008. 2nd IEEE RAS & EMBS International Conference on*. IEEE, Scottsdale, AZ, USA. 2008, p. 19–26. DOI : 10.1109/BIOROB.2008.4762816. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02294590/> (cf. p. 40, 69).
- [Por+08c] Geoffrey PORTELLI, Julien SERRES, Franck RUFFIER et al. « Un pilote automatique inspiré des insectes pour la navigation 3D dans un tunnel ». In : *Actes de la 4^{ème} Journée de l'Ecole Doctorale Sciences du Mouvement Humain (JED-SMH)*, Avignon, France. Mai 2008. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02298370/> (cf. p. 47).
- [Por+09] Geoffrey PORTELLI, Julien SERRES, Franck RUFFIER et al. « Pilote automatique bio-inspiré pour la navigation en 3D ». In : *Actes des Journée des Jeunes Chercheurs en Robotique (JJCR)*, Neuvy-sur-Barangeon, France. Nov. 2009. URL : http://jnrr09.lms.sp2mi.univ-poitiers.fr/IMG/pdf/portelli_jnrr09.pdf (cf. p. 47, 69).
- [Por+10] Geoffrey PORTELLI, Julien SERRES, Franck RUFFIER et al. « Modelling honey-bee visual guidance in a 3-D environment ». In : *Journal of Physiology-Paris* 104.1-2 (2010), p. 27–39. DOI : 10.1016/j.jphysparis.2009.11.011. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02010550/> (cf. p. 37, 69, 79).

- [Pot20] Simon POTIER. « Visual Adaptations in Predatory and Scavenging Diurnal Raptors ». In : *Diversity* 12.10 (2020), p. 400. URL : <https://www.mdpi.com/1424-2818/12/10/400/pdf> (cf. p. 99).
- [PMK20] Simon POTIER, Mindaugas MITKUS et Almut KELBER. « Visual adaptations of diurnal and nocturnal raptors ». In : (2020). URL : <https://epublications.vu.lt/object/elaba:67617417/MAIN> (cf. p. 99).
- [Pou+20] Léo POUGHON, Jocelyn MONNOYER, Stefano MAFRICA et al. « Bio-inspired use of skylight polarization to measure heading for automotive industry ». In : *Workshop GDR 2088 BIOMIM 1st Annual Meeting, Nice, France*. Oct. 2020, p. 87 (cf. p. 43).
- [Pow+18] Samuel B POWELL, Roman GARNETT, Justin MARSHALL et al. « Bioinspired polarization vision enables underwater geolocalization ». In : *Science advances* 4.4 (2018), eaao6841. DOI : 10.1126/sciadv.aao6841. URL : <https://advances.sciencemag.org/content/4/4/eaao6841.full.pdf> (cf. p. 60).
- [Rah+14] Thibaut RAHARIJAONA, Lubin KERHUEL, Julien SERRES et al. « Insect inspired visual motion sensing and flying robots ». In : *Handbook of Biomimetics and Bioinspiration : 2 Electromechanical Systems*. World Scientific, 2014, p. 565–611. ISBN : 978-981-435-4950. DOI : 10.1142/9789814354936_0022. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02294399> (cf. p. 15, 44).
- [Rah+17] Thibaut RAHARIJAONA, Julien SERRES, E VANHOUTTE et al. « Toward an insect-inspired event-based autopilot combining both visual and control events ». In : *Event-based Control, Communication, and Signal Processing (EBCCSP), 2016 2nd International Conference on*. IEEE, Funchal, Portugal. 2017. DOI : 10.1109/EBCCSP.2017.8022822. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01528589/> (cf. p. 39).
- [Raj09] J RAJCHARD. « Ultraviolet (UV) light perception by birds : a review ». In : *Veterinárni medicína* 54.8 (2009), p. 351–359. URL : https://www.agriculturejournals.cz/publicFiles/110_2009-VETMED.pdf (cf. p. 59, 99).
- [Rav+19a] Sridhar RAVI, Olivier BERTRAND, Tim SIESENOP et al. « Gap perception in bumblebees ». In : *Journal of Experimental Biology* 222.2 (2019), jeb184135. DOI : 10.1242/jeb.184135. URL : <https://jeb.biologists.org/content/jexbio/222/2/jeb184135.full.pdf> (cf. p. 97).
- [Rav+19b] Aravind Narain RAVICHANDRAN, Cyril CALMES, Julien R SERRES et al. « Compact and High Performance Wind actuated venturi triboelectric energy harvester ». In : *Nano Energy* 62 (2019), p. 449–457. DOI : 10.1016/j.nanoen.2019.05.053. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02157346> (cf. p. 35).

- [Ren+18] Brent A RENFRO, Miquela STEIN, Nicholas BOEKER et al. « An analysis of global positioning system (GPS) standard positioning service (SPS) performance for 2018 ». In : *GPS : The Global Positioning System* (2018). URL : <https://www.gps.gov/systems/gps/performance/2018-GPS-SPS-performance-analysis.%20pdf> (cf. p. 86).
- [Ric15] Patricia RICARD. « Le biomimétisme : s'inspirer de la nature pour innover durablement ». In : *Les projet d'avis du Conseil économique, social et environnemental (CESE), Paris* (sept. 2015). NOR : CESL1500023X. URL : https://www.lecese.fr/sites/default/files/pdf/Avis/2015/2015_23_biomimetisme.pdf (cf. p. 14).
- [RF84] A RIEHLE et N FRANCESCHINI. « Motion detection in flies : parametric control over ON-OFF pathways ». In : *Experimental brain research* 54.2 (1984), p. 390–394. DOI : 10.1007/BF00236243. URL : <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00236243> (cf. p. 66).
- [RZ19] Roy E RITZMANN et Sasha N ZILL. « Control of Locomotion ». In : *The Oxford Handbook of Invertebrate Neurobiology* (2019), p. 423–438 (cf. p. 97).
- [Rou+14] Frédéric L ROUBIEU, Julien R SERRES, Fabien COLONNIER et al. « A biomimetic vision-based hovercraft accounts for bees' complex behaviour in various corridors ». In : *Bioinspiration & biomimetics* 9.3 (2014), p. 036003. DOI : 10.1088/1748-3182/9/3/036003. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01446797/> (cf. p. 37, 55, 56, 70, 72).
- [Rou+12] Frédéric L ROUBIEU, Julien SERRES, Nicolas FRANCESCHINI et al. « 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, Guangzhou, China. 2012, p. 1311–1318. DOI : 10.1109/ROBIO.2012.6491150. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00743129v2/> (cf. p. 39).
- [Rou+11] Frédéric L ROUBIEU, Julien SERRES, Stéphane VIOLLET et al. « Toward a fully autonomous hovercraft visually guided thanks to its own bio-inspired motion sensors ». In : *International Workshop on Bio-Inspired Robots, Nantes, France.* 2011. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00743520/> (cf. p. 43).
- [RF05] Franck RUFFIER et Nicolas FRANCESCHINI. « Optic flow regulation : the key to aircraft automatic guidance ». In : *Robotics and Autonomous Systems* 50.4 (2005), p. 177–194. DOI : 10.1016/j.robot.2004.09.016. URL : https://www.academia.edu/download/48091660/Optic_flow_regulation_the_key_to_aircraf20160816-9734-1qcszcl.pdf (cf. p. 68, 78).

- [Ruf+08] Franck RUFFIER, Toshiharu MUKAI, Hiromichi NAKASHIMA et al. « Combining sound and optic flow cues to reach a sound source despite lateral obstacles ». In : *System Integration, 2008 IEEE/SICE International Symposium on*. IEEE, Nagoya, Japan. 2008, p. 89–94. DOI : [10.1109/SI.2008.4770432](https://doi.org/10.1109/SI.2008.4770432). URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02294544/> (cf. p. 40).
- [Ruf+11] Franck RUFFIER, Geoffrey PORTELLI, Julien SERRES et al. « From bees' surface following to Lunar landing ». In : *International Workshop on Bio-Inspired Robots, Nantes, France*. 2011. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02194478/> (cf. p. 43).
- [RSF05] Franck RUFFIER, Julien SERRES et Nicolas FRANCESCHINI. « Automatic landing and take-off at constant slope without terrestrial aids ». In : *Proceedings of 31st European Rotorcraft Forum (ERF 2005), Florence, Italy*. T. 71. 92. 2005, p. 92.1–92.8. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02295758/> (cf. p. 42).
- [RSF09a] Franck RUFFIER, Julien SERRES et Nicolas FRANCESCHINI. « Pilotes automatiques biomimétiques : boucles de rétroaction directe sur le flux optique ». In : *Journées ONERA/DGA MSI "Matériaux et Structures Intelligents", Châtillon, France*. Mar. 2009. URL : https://gt-uav.hds.utc.fr/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?media=fr:reunion26mars2009:gtuav_ruffier2.pdf (cf. p. 43).
- [RSF09b] Franck RUFFIER, Julien SERRES et Nicolas FRANCESCHINI. « Pilotes automatiques biomimétiques : boucles de rétroaction directes sur le flux optique ». In : *Workshop inter GdR MACS et Robotique du GT UAV, ENSAM, Paris, France*. Mar. 2009. URL : https://gt-uav.hds.utc.fr/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?media=fr:reunion26mars2009:gtuav_ruffier2.pdf (cf. p. 43).
- [RSF09c] Franck RUFFIER, Julien SERRES et Nicolas FRANCESCHINI. « Pilotes automatiques biomimétiques : boucles de rétroaction directes sur le flux optique ». In : *Workshop Drone LSIS/ISM, avec le concours du Pôle de compétitivité PEGASE, de l'ONERA et de l'École des Officiers de l'Armée de l'Air, Salon-de-Provence, France*. Mai 2009. URL : https://gt-uav.hds.utc.fr/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?media=fr:reunion26mars2009:gtuav_ruffier2.pdf (cf. p. 43).
- [Ruf+07] Franck RUFFIER, Julien SERRES, Guillaume P MASSON et al. « A bee in the corridor : regulating the optic flow on one side ». In : *Proceedings of the 7th meeting of the German neuroscience society—31st Göttingen neurobiology conference*. T14-7B. 2007. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02295700/> (cf. p. 41).

- [Ruf+09] Franck RUFFIER, Julien SERRES, Geoffrey PORTELLI et al. « Boucles visuo-motrices biomimétiques pour le pilotage automatique de micro-aéronefs ». In : *Actes des 7^{ème} Journées Nationales de la Recherche en Robotique (JNRR)*, Newy-sur-Barangeon, France. Nov. 2009, p. 55–67. URL : http://jnrr09.lms.sp2mi.univ-poitiers.fr/IMG/pdf/JNRR_RuffierEtAl.pdf (cf. p. 47).
- [SK81] Reinhard SEIDL et Walter KAISER. « Visual field size, binocular domain and the ommatidial array of the compound eyes in worker honey bees ». In : *Journal of comparative physiology* 143.1 (1981), p. 17–26. DOI : [10.1007/BF00606065](https://doi.org/10.1007/BF00606065) (cf. p. 95).
- [Sero8] Julien SERRES. « De l'abeille au robot : la régulation du flux optique. Contrôle conjoint de vitesse et d'évitements d'obstacles latéraux pour véhicules totalement actionnés. » Thèse de doct. Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc, juil. 2008. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00645272/> (cf. p. 45).
- [Ser10] Julien SERRES. *De l'abeille au robot : la régulation du flux optique. Contrôle conjoint de vitesse et d'évitements d'obstacles latéraux pour véhicules totalement actionnés*. Éditions Universitaires Européennes EUE, 2010. ISBN : 978-613-1543-050. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00645272/> (cf. p. 44).
- [Ser19] Julien SERRES. « Comment organiser une formation Matlab™/Simulink ». In : *La Revue 3EI*. 94. SEE, ISSN : 1252-770X, 2019, p. 38–45. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02423389> (cf. p. 45).
- [Ser18] Julien R SERRES. « Taking Inspiration from Flying Insects to Navigate inside Buildings ». In : *Interdisciplinary Expansions in Engineering and Design With the Power of Biomimicry*. Sous la dir. de Gulden KOKTURK et Tutku Didem Akyol ALTUN. InTech, Vienna, 2018. Chap. 3, p. 31–55. ISBN : 978-953-513-9355. DOI : [10.5772/intechopen.72918](https://doi.org/10.5772/intechopen.72918). URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01758731> (cf. p. 44, 72).
- [SDV20] Julien R. SERRES, Julien DUPEYROUX et Stéphane VIOLLET. « Peut-on naviguer sans GPS ni réseau 5G ? Oui, je suis un robot fourmi ». In : *Webinaire de la Journée Bioinspiration & Services Fondés sur la Nature, Montpellier, France*. note : <https://www.youtube.com/watch?v=6dv7RRqUC9U>. Nov. 2020. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-03042189/> (cf. p. 42).
- [Ser+19a] Julien R SERRES, Thomas J EVANS, Susanne ÅKESSON et al. « Optic flow cues help explain altitude control over sea in freely flying gulls ». In : *Journal of The Royal Society Interface* 16.159 (2019). <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02309725>, p. 20190486. DOI : [10.1098/rsif.2019.0486](https://doi.org/10.1098/rsif.2019.0486). URL : <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/569194v1> (cf. p. 36, 55, 81–83).

- [Ser+o8a] Julien R SERRES, Guillaume P MASSON, Franck RUFFIER et al. « A bee in the corridor : centering and wall-following ». In : *Naturwissenschaften* 95.12 (2008), p. 1181. DOI : [10.1007/s00114-008-0440-6](https://doi.org/10.1007/s00114-008-0440-6). URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02294572/> (cf. p. 37, 68, 95).
- [Ser+19b] Julien R SERRES, Antoine HP MORICE, Constance BLARY et al. « Honeybees flying over a mirror crash irremediably ». In : *4th International Conference on Invertebrate Vision (ICIV)*, Bäckaskog, Sweden. poster number 43. 2019, p. 260. URL : <https://www.youtube.com/watch?v=KH9z8eq0BBU> (cf. p. 40, 55, 79, 83).
- [SR15] Julien R SERRES et Franck RUFFIER. « Biomimetic autopilot based on minimalistic motion vision for navigating along corridors comprising u-shaped and s-shaped turns ». In : *Journal of Bionic Engineering* 12.1 (2015), p. 47–60. DOI : [10.1016/S1672-6529\(14\)60099-8](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(14)60099-8). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01108274/> (cf. p. 36, 69–72).
- [SR17] Julien R SERRES et Franck RUFFIER. « Optic flow-based collision-free strategies : From insects to robots ». In : *Arthropod structure & development* 46.5 (2017), p. 703–717. DOI : [10.1016/j.asd.2017.06.003](https://doi.org/10.1016/j.asd.2017.06.003). URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01644523/> (cf. p. 15, 36, 55, 68, 78, 81, 93, 95, 96).
- [SV18] Julien R SERRES et Stéphane VIOLLET. « Insect-inspired vision for autonomous vehicles ». In : *Current Opinion in Insect Science* 30 (2018), p. 46–51. DOI : [10.1016/j.cois.2018.09.005](https://doi.org/10.1016/j.cois.2018.09.005). URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01882712> (cf. p. 15, 36).
- [SB21] Julien SERRES et Frank BULOUP. « Mesurer une distance au moyen d'un accéléromètre - Une approche interdisciplinaire entre sciences physiques et sciences du sport ». In : *Le BUP physique-chimie*. 94. ALLIANCE PARTENAIRES GRAPHIQUES, ISSN : 2491-830X, 2021, 12 pages. URL : <http://bupdoc.udppc.asso.fr/index.php> (cf. p. 45).
- [Ser+o8b] Julien SERRES, D DRAY, Franck RUFFIER et al. « A vision-based autopilot for a miniature air vehicle : joint speed control and lateral obstacle avoidance ». In : *Autonomous robots* 25.1-2 (2008), p. 103–122. DOI : [10.1007/s10514-007-9069-0](https://doi.org/10.1007/s10514-007-9069-0). URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01758721/> (cf. p. 37, 69, 70).
- [Ser+o8c] Julien SERRES, David DRAY, Franck RUFFIER et al. « A bio-inspired optic flow based autopilot for guiding a miniature hovercraft in corridors ». In : *IEEE-IROS Workshop on Visual Guidance Systems for Small Autonomous Aerial*, Nice, France. Sept. 2008. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02294457/> (cf. p. 43).

- [Ser+o8d] Julien SERRES, David DRAY, Franck RUFFIER et al. « Pilote automatique bio-inspiré basé sur la vision du mouvement. » In : *Actes des 6^{ème} Manifestation des Jeunes Chercheurs en STIC, Marseille, France*. Oct. 2008. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02298360/> (cf. p. 47).
- [SDI3] Julien SERRES et Patrick DUBOIS. « Installation solaire photovoltaïque autonome utilisant des cellules en couches minces CIS ». In : *La Revue 3EI*. 72. SEE, ISSN : 1252-770X, 2013, p. 65–70. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01848791> (cf. p. 46).
- [Ser+o9a] Julien SERRES, Patrick DUBOIS, Christophe JAUNAY et al. « Réseau électrique haute qualité ». In : *La Revue 3EI*. 58. SEE, ISSN : 1252-770X, 2009, p. 20–26. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01848939/> (cf. p. 46).
- [Ser+17] Julien SERRES, Thomas J EVANS, Susanne ÅKESSON et al. « Optic flow and energy invariants combined explain gulls’ altitude profiles during offshore takeoff ». In : *The 6th International Bio-logging Science Symposium (BLS6)*. Lake Constance, Germany, sept. 2017. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02078084> (cf. p. 41, 55, 81).
- [Ser+16] Julien SERRES, T RAHARIJAONA, E VANHOUTTE et al. « Event-based visual guidance inspired by honeybees in a 3D tapered tunnel ». In : *Event-based Control, Communication, and Signal Processing (EBCCSP), 2016 1st International Conference on*. IEEE, Krakow, Poland. 2016, p. 1–4. DOI : 10.1109/EBCCSP.2016.7605273. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01332819> (cf. p. 39).
- [SR16] Julien SERRES et Franck RUFFIER. « Optic Flow-Based Robotics ». In : *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering* (2016), p. 1–14. DOI : 10.1002/047134608X.W8321. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02294347> (cf. p. 14, 37, 95).
- [SRFo5a] Julien SERRES, Franck RUFFIER et Nicolas FRANCESCHINI. « Biomimetic visual navigation in a corridor : to centre or not to centre ? » In : *Proceedings of International Mediterranean Modeling Multiconference (I3M 2005), Marseille, France*. 2005, p. 91–97. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02295829/> (cf. p. 42).
- [SRFo5b] Julien SERRES, Franck RUFFIER et Nicolas FRANCESCHINI. « Réguler le flux optique latéral pour naviguer dans un corridor ». In : *Actes des 5^{ème} Journées Nationales de la Recherche en Robotique (JNRR), Guidel, France*. <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02298950/>. Oct. 2005, p. 289–290. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02298941/> (cf. p. 48).

- [SRFo6] Julien SERRES, Franck RUFFIER et Nicolas FRANCESCHINI. « Two optic flow regulators for speed control and obstacle avoidance ». In : *Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2006. BioRob 2006. The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on*. paper n°284. IEEE, Pisa, Italy. 2006, p. 750–757. DOI : [10.1109/BIOROB.2006.1639180](https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02295748/). URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02295748/> (cf. p. 40, 69).
- [SRFo7] Julien SERRES, Franck RUFFIER et Nicolas FRANCESCHINI. « Guidage visuel d'un aéroglisseur miniature dans un corridor ». In : *Actes des 6^{ème} Journées Nationales de la Recherche en Robotique (JNRR), Obernai, France*. Oct. 2007. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02298992/> (cf. p. 47).
- [SRFii] Julien SERRES, Franck RUFFIER et Nicolas FRANCESCHINI. « A bio-inspired robot accounts for insect behavior ». In : *16th European Conference on Eye Movement (ECEM), Marseille, France*. 2011. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02194432/> (cf. p. 41).
- [Ser+07] Julien SERRES, Franck RUFFIER, Guillaume P MASSON et al. « A bee in the corridor : centring or wall-following? ». In : *Proceedings of the 7th meeting of the German neuroscience society—31st Göttingen neurobiology conference*. T14-8B. 2007. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01445551/> (cf. p. 42).
- [Ser+08e] Julien SERRES, Franck RUFFIER, Guillaume P MASSON et al. « A bee in the corridor : centering and wall-following ». In : *Proceedings of the 2nd International Conference on Invertebrate Vision (ICIV), Bäckaskog, Sweden*. 2008. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02195483/> (cf. p. 41).
- [Ser+06] Julien SERRES, Franck RUFFIER, Stéphane VIOLLET et al. « Toward optic flow regulation for wall-following and centring behaviours ». In : *International Journal of Advanced Robotic Systems* 3.2 (2006), p. 23. DOI : [10.5772/5744](https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02295717/). URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02295717/> (cf. p. 37).
- [Ser+09b] Julien SERRES, Stéphane VIOLLET, Lubin KERHUEL et al. « Régulation de vitesse d'un micromoteur à courant continu sans capteur au moyen d'un micro-contrôleur dsPIC programmé par une passerelle MatlabTM/Simulink ». In : *La Revue 3EI*. 56. SEE, ISSN : 1252-770X, 2009, p. 66–74. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01848804/> (cf. p. 46).
- [SVR17] Julien SERRES, Stéphane VIOLLET et Franck RUFFIER. *Microdrones bio-inspirés - Doter nos futurs robots aériens de l'agilité des insectes*. Editions TI | Techniques de l'Ingénieur, 2017, S7717 VI. URL : https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01574508 (cf. p. 44).

- [SM75] U. SMOLA et P. MEFFERT. « A single-peaked UV-receptor in the eye of *Calliphora erythrocephala* ». In : *Journal of comparative physiology* 103.3 (jan. 1975), p. 353–357. ISSN : 1432-1351. DOI : [10.1007/BF00612027](https://doi.org/10.1007/BF00612027) (cf. p. 57).
- [ST88] H Yosef SOLOMON et Michael T TURVEY. « Haptically perceiving the distances reachable with hand-held objects. » In : *Journal of experimental psychology : Human perception and performance* 14.3 (1988), p. 404. DOI : [10.1037/0096-1523.14.3.404](https://doi.org/10.1037/0096-1523.14.3.404) (cf. p. 97).
- [Sri11] Mandyam V SRINIVASAN. « Honeybees as a model for the study of visually guided flight, navigation, and biologically inspired robotics ». In : *Physiological reviews* 91.2 (2011), p. 413–460. DOI : [10.1152/physrev.00005.2010](https://doi.org/10.1152/physrev.00005.2010). URL : <https://journals.physiology.org/doi/pdf/10.1152/physrev.00005.2010> (cf. p. 14, 79, 93, 95, 96).
- [Sto+17] John R STOWERS, Maximilian HOFBAUER, Renaud BASTIEN et al. « Virtual reality for freely moving animals ». In : *Nature methods* 14.10 (2017), p. 995. DOI : [10.1038/nmeth.4399](https://doi.org/10.1038/nmeth.4399). URL : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6485657/> (cf. p. 96).
- [SLD10] Andrew D STRAW, Serin LEE et Michael H DICKINSON. « Visual control of altitude in flying *Drosophila* ». In : *Current Biology* 20.17 (2010), p. 1550–1556. DOI : [10.1016/j.cub.2010.07.025](https://doi.org/10.1016/j.cub.2010.07.025). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960982210009279/pdf?isDTMRedir=true&download=true> (cf. p. 93, 94).
- [Tan+19] Jun TANG, Yubo WANG, Donghua ZHAO et al. « Application of polarized light compass system on solar position calculation ». In : *Optik* 187 (2019), p. 135–147. DOI : [10.1016/j.ijleo.2019.04.129](https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.04.129) (cf. p. 93).
- [TN19] Cynthia TEDORE et Dan-Eric NILSSON. « Avian UV vision enhances leaf surface contrasts in forest environments ». In : *Nature communications* 10.1 (2019), p. 238. DOI : [10.1038/s41467-018-08142-5](https://doi.org/10.1038/s41467-018-08142-5). URL : <https://www.nature.com/articles/s41467-018-08142-5.pdf?origin=ppub> (cf. p. 58, 99).
- [TGR17] Philippe TERRIER, Mathias GLAUS et Emmanuel RAUFFLET. « Biomimétisme : outils pour une démarche écoinnovante en ingénierie ». In : *VértigO-la revue électronique en sciences de l'environnement* (2017). DOI : [10.4000/vertigo.17914](https://doi.org/10.4000/vertigo.17914). URL : <https://journals.openedition.org/vertigo/17914> (cf. p. 105).
- [Tho+14] Hanne H THOEN, Martin J HOW, Tsyr-Huei CHIOU et al. « A different form of color vision in mantis shrimp ». In : *Science* 343.6169 (2014), p. 411–413. DOI : [10.1126/science.1245824](https://doi.org/10.1126/science.1245824). URL : https://www.researchgate.net/profile/Tsyr-Huei-Chiou/publication/259883148_A_Different_Form_of_Color_Vision_in_Mantis_Shrimp/links/53f168e40cf23733e815b97d/A-Different-Form-of-Color-Vision-in-Mantis-Shrimp.pdf (cf. p. 60).

- [Tho+21] Mathieu THOMAS, José PEREIRA FIGUEIRA, Julien R. SERRES et al. « Helicopter pilots synchronize their altitude with ship heave to minimize energy when landing on a ship's deck ». In : *International Journal of Aviation Psychology* (2021). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03082645> (cf. p. 35, 84).
- [Van+17] Erik VANHOUTTE, Stefano MAFRICA, Franck RUFFIER et al. « Time-of-travel methods for measuring optical flow on board a micro flying robot ». In : *Sensors* 17.3 (2017), p. 571. DOI : [10.3390/s17030571](https://doi.org/10.3390/s17030571). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01551122/> (cf. p. 36, 76).
- [VRS17a] Erik VANHOUTTE, Franck RUFFIER et Julien SERRES. « A honeybee's navigational toolkit on Board a Bio-inspired Micro Flying Robot ». In : *The 9th International Micro Air Vehicle Conference and Competition (IMAV)*. 2017, p. 136–142. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01593819/> (cf. p. 41, 56).
- [VRS17b] Erik VANHOUTTE, Franck RUFFIER et Julien SERRES. « A quasi-panoramic bio-inspired eye for flying parallel to walls ». In : *SENSORS, 2017 IEEE*. IEEE, Glasgow, UK. 2017, p. 1–3. DOI : [10.1109/ICSENS.2017.8234110](https://doi.org/10.1109/ICSENS.2017.8234110). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01630170> (cf. p. 39).
- [Vii+95] Jussi VIITALA, Erkki KORPLMÄKI, Pålvi PALOKANGAS et al. « Attraction of kestrels to vole scent marks visible in ultraviolet light ». In : *Nature* 373.6513 (1995), p. 425–427. URL : <https://www.nature.com/articles/373425a0.pdf> (cf. p. 99).
- [VDS20] Stéphane VIOLLET, Julien DUPEYROUX et Julien SERRES. « Le robot fourmi AntBot. Conception et réalisation d'un robot bio-inspiré ». In : *Techniques & Culture. Revue semestrielle d'anthropologie des techniques* 73 (2020). numéro spécial : "Biomimétisme(s). Imitation du vivant et modélisation de la vie", p. 128–141. DOI : [10.4000/tc.13557](https://doi.org/10.4000/tc.13557). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02892659/> (cf. p. 45).
- [VC67] Karl VON FRISCH et Leigh E CHADWICK. *The dance language and orientation of bees*. Belknap Press of Harvard University Press Cambridge, MA, 1967 (cf. p. 95).
- [Wan+19] Yinlong WANG, Jinkui CHU, Ran ZHANG et al. « A Bio-Inspired Polarization Sensor with High Outdoor Accuracy and Central-Symmetry Calibration Method with Integrating Sphere ». In : *Sensors* 19.16 (2019), p. 3448. DOI : [10.3390/s19163448](https://doi.org/10.3390/s19163448). URL : <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/16/3448/pdf> (cf. p. 92).
- [WW87] William H WARREN JR et Suzanne WHANG. « Visual guidance of walking through apertures : body-scaled information for affordances. » In : *Journal of experimental psychology : human perception and performance* 13.3 (1987), p. 371. DOI : [10.1037/0096-1523.13.3.371](https://doi.org/10.1037/0096-1523.13.3.371). URL : <http://www.cog.brown>.

- edu/Research/ven_lab/Publications/WarrenWang_Aperture_JEP87.pdf (cf. p. 97).
- [War84] William H WARREN. « Perceiving affordances : Visual guidance of stair climbing. » In : *Journal of experimental psychology : Human perception and performance* 10.5 (1984), p. 683. DOI : [10.1037/0096-1523.10.5.683](https://doi.org/10.1037/0096-1523.10.5.683). URL : http://www.cog.brown.edu/research/ven_lab/Publications/Warren_Stairs_JEP84.pdf (cf. p. 97).
- [Wat54] Talbot H WATERMAN. « Polarization patterns in submarine illumination ». In : *Science* 120.3127 (1954), p. 927–932. URL : <https://www.jstor.org/stable/1682610?seq=1> (cf. p. 59).
- [Wato6] Talbot H WATERMAN. « Reviving a neglected celestial underwater polarization compass for aquatic animals ». In : *Biological Reviews* 81.1 (2006), p. 111–115. DOI : [10.1017/S1464793105006883](https://doi.org/10.1017/S1464793105006883) (cf. p. 60).
- [Web00] Barbara WEBB. « What does robotics offer animal behaviour? » In : *Animal behaviour* 60.5 (2000), p. 545–558. DOI : [10.1006/anbe.2000.1514](https://doi.org/10.1006/anbe.2000.1514). URL : <https://www2.cs.sfu.ca/~vaughan/teaching/894/papers/webb-animal.pdf> (cf. p. 14).
- [Web01] Barbara WEBB. « Can robots make good models of biological behaviour? » In : *Behavioral and brain sciences* 24.6 (2001), p. 1033–1050. DOI : [10.1017/S0140525X01000127](https://doi.org/10.1017/S0140525X01000127). URL : http://www.lira.dist.unige.it/papers/papers/Papers_01/webb.2001.pdf (cf. p. 14).
- [Weh03] Rüdiger WEHNER. « Desert ant navigation : how miniature brains solve complex tasks ». In : *Journal of Comparative Physiology A* 189.8 (2003), p. 579–588. DOI : [10.1007/s00359-003-0431-1](https://doi.org/10.1007/s00359-003-0431-1). URL : https://doc.rero.ch/record/318581/files/359_2003_Article_431.pdf (cf. p. 91).
- [Weh08] Rüdiger WEHNER. « The desert ant's navigational toolkit : procedural rather than positional knowledge ». In : *Navigation* 55.2 (2008), p. 101–114 (cf. p. 91).
- [WR79] Rüdiger WEHNER et F RÄBER. « Visual spatial memory in desert ants, *Cataglyphis bicolor* (Hymenoptera : Formicidae) ». In : *Experientia* 35.12 (1979), p. 1569–1571. DOI : [10.1007/BF01953197](https://doi.org/10.1007/BF01953197) (cf. p. 63).
- [WW90] Rüdiger WEHNER et Sibylle WEHNER. « Insect navigation : use of maps or Ariadne's thread? » In : *Ethology Ecology & Evolution* 2.1 (1990), p. 27–48. DOI : [10.1080/08927014.1990.9525492](https://doi.org/10.1080/08927014.1990.9525492) (cf. p. 75, 77).
- [WS70] Thomas CD WHITESIDE et GD SAMUEL. « Blur zone ». In : *Nature* 225 (1970), p. 94–95. DOI : [10.1038/225094a0](https://doi.org/10.1038/225094a0) (cf. p. 67).
- [WWW06] Matthias WITTLINGER, Rüdiger WEHNER et Harald WOLF. « The ant odometer : stepping on stilts and stumps ». In : *science* 312.5782 (2006), p. 1965–1967. DOI : [10.1126/science.1126912](https://doi.org/10.1126/science.1126912) (cf. p. 74).

- [Wit19] Alexandra WITZE. « Earth's magnetic field is acting up and geologists don't know why ». In : *Nature* 565 (2019), p. 143–144. DOI : [10.1038/d41586-019-00007-1](https://doi.org/10.1038/d41586-019-00007-1). URL : <https://www.nature.com/articles/d41586-019-00007-1> (cf. p. 87).
- [WBC11] Antoine WYSTRACH, Guy BEUGNON et Ken CHENG. « Landmarks or panoramas : what do navigating ants attend to for guidance ? » In : *Frontiers in Zoology* 8.1 (2011), p. 21. URL : <https://frontiersinzoology.biomedcentral.com/track/pdf/10.1186/1742-9994-8-21> (cf. p. 75).
- [WBC12] Antoine WYSTRACH, Guy BEUGNON et Ken CHENG. « Ants might use different view-matching strategies on and off the route ». In : *Journal of Experimental Biology* 215.1 (2012), p. 44–55. URL : <https://jeb.biologists.org/content/jexbio/215/1/44.full.pdf> (cf. p. 75).
- [Wys+20] Antoine WYSTRACH, Florent LE MOEL, Leo CLEMENT et al. « A lateralised design for the interaction of visual memories and heading representations in navigating ants ». In : *bioRxiv* (2020). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03052606/> (cf. p. 100).
- [Xia+14] Zhiwen XIAN, Xiaoping HU, Junxiang LIAN et al. « A novel angle computation and calibration algorithm of bio-inspired sky-light polarization navigation sensor ». In : *Sensors* 14.9 (2014), p. 17068–17088. DOI : [10.3390/s140917068](https://doi.org/10.3390/s140917068). URL : <https://www.mdpi.com/1424-8220/14/9/17068/htm> (cf. p. 93).
- [Yan+19] Jian YANG, Tao DU, Xin LIU et al. « Method and implementation of a bio-inspired attitude and heading reference system by integration of polarization compass and inertial sensors ». In : *IEEE Transactions on Industrial Electronics* (2019). DOI : [10.1109/TIE.2019.2952799](https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2952799) (cf. p. 92).
- [Yan+18] Jian YANG, Tao DU, Ben NIU et al. « A bionic polarization navigation sensor based on polarizing beam splitter ». In : *IEEE Access* 6 (2018), p. 11472–11481. DOI : [10.1109/ACCESS.2018.2794524](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2794524). URL : <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8262635> (cf. p. 92).
- [Zha+20] Qingyun ZHANG, Jian YANG, Xin LIU et al. « A Bio-inspired Navigation Strategy Fused Polarized Skylight and Starlight for Unmanned Aerial Vehicles ». In : *IEEE Access* (2020). DOI : [10.1109/ACCESS.2020.2988529](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2988529). URL : <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9069888> (cf. p. 92).
- [Zha+15] Wenjing ZHANG, Yu CAO, Xuanzhe ZHANG et al. « Sky light polarization detection with linear polarizer triplet in light field camera inspired by insect vision ». In : *Applied optics* 54.30 (2015), p. 8962–8970. DOI : [10.1364/AO.54.008962](https://doi.org/10.1364/AO.54.008962). URL : https://www.researchgate.net/profile/Zhang_Jing75/publication/283776491_Sky_light_polarization_detection_with_linear_polarizer_triplet_in_light_field_camera_inspired_by_insect_vision/links/574e91fb08aec988526bcdcb/

Sky-light-polarization-detection-with-linear-polarizer-triplet-in-light-field-camera-inspired-by-insect-vision.pdf (cf. p. 93).

- [Zha+16] Wenjing ZHANG, Xuanzhe ZHANG, Yu CAO et al. « Robust sky light polarization detection with an S-wave plate in a light field camera ». In : *Applied optics* 55.13 (2016), p. 3518–3525. DOI : 10.1364/AO.55.003518. URL : https://www.researchgate.net/profile/Zhang_Jing75/publication/301600284_Robust_sky_light_polarization_detection_with_an_S-wave_plate_in_a_light_field_camera/links/59f13485a6fdcc1dc7b8f9b2/Robust-sky-light-polarization-detection-with-an-S-wave-plate-in-a-light-field-camera.pdf (cf. p. 93).
- [ZX16] Huijie ZHAO et Wujian XU. « A bionic polarization navigation sensor and its calibration method ». In : *Sensors* 16.8 (2016), p. 1223. DOI : doi.org/10.3390/s16081223. URL : <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/8/1223/htm> (cf. p. 92).
- [Zha+18] Huijie ZHAO, Wujian XU, Ying ZHANG et al. « Polarization patterns under different sky conditions and a navigation method based on the symmetry of the AOP map of skylight ». In : *Optics express* 26.22 (2018), p. 28589–28603. DOI : 10.1364/OE.26.028589. URL : https://www.osapublishing.org/DirectPDFAccess/B465346A-C603-41DA-2AF91FA9EB771954_399314/oe-26-22-28589.pdf?da=1&id=399314&seq=0&mobile=no (cf. p. 92).
- [Zho+17] Guanhua ZHOU, Jiwen WANG, Wujian XU et al. « Polarization patterns of transmitted celestial light under wavy water surfaces ». In : *Remote Sensing* 9.4 (2017), p. 324. DOI : 10.3390/rs9040324. URL : <https://www.mdpi.com/2072-4292/9/4/324> (cf. p. 60).