



HAL
open science

AntBot : un robot qui s'oriente comme une fourmi

Julien Dupeyroux, Stéphane Viollet, Julien Serres

► **To cite this version:**

Julien Dupeyroux, Stéphane Viollet, Julien Serres. AntBot : un robot qui s'oriente comme une fourmi : Applications à la navigation à vue sans GPS ni magnétomètre. Les Techniques de l'Ingenieur, 2020, IN236. hal-02500157

HAL Id: hal-02500157

<https://amu.hal.science/hal-02500157>

Submitted on 5 Mar 2020

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.

Ref. IN236

AntBot : un robot qui s'oriente comme une fourmi

Applications à la navigation à vue sans GPS ni magnétomètre

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

¹*Docteur d'Aix-Marseille Université*

²*Directeur de recherche CNRS*

³*Maître de Conférences, Aix-Marseille Université*

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

January 7, 2020

Résumé

La navigation autonome est un enjeu technologique majeur du XXI^{ème} siècle. Les besoins de mobilité sont immenses en robotique de service et dans les transports. Plusieurs systèmes de localisation sont actuellement disponibles : le GPS civil, aux performances variables, et la vision par ordinateur, coûteuse en ressources calculatoires mais aussi sensible à la luminosité. Inspiré de la fourmi du désert, le robot hexapode AntBot estime les distances en comptant ses foulées et en intégrant le défilement visuel du sol. Son cap, quant à lui, est estimé à l'aide d'une boussole céleste. AntBot se repositionne avec une erreur d'à peine 7 cm, soit presque 100 fois plus faible que celle du GPS civil.

Mots-clés : hexapode, navigation, compas céleste, vision, biomimétisme, bionique, biorobotique.

Abstract

Autonomous navigation is a major technological challenge of the 21st century. Mobility needs are immense in service robotics and transports. Several location systems are now available: civilian GPS, which is very efficient but with variable performances, and computer vision, expensive in terms of computing resources and sensitive to variations in light. Inspired by the desert ant, the AntBot hexapod robot is located on the basis of step counting and visual odometry by integrating the visual scrolling of the ground, while its heading is estimated using a celestial compass. AntBot repositioned itself with an error of just 7 cm, almost 100 times lower than the civilian GPS.

Keywords : hexapod, navigation, celestial compass, vision, biomimicry, bionics, biorobotics.

Ref. IN236

AntBot : un robot qui s'oriente comme une fourmi

Applications à la navigation à vue sans GPS ni magnétomètre

Un des instruments de navigation du robot AntBot repose sur un *compas céleste* détectant le rayonnement diffusé par l'atmosphère en bande spectrale UltraViolet (UV). Cet instrument est inspiré de la partie dorsale des yeux composés des insectes, et plus particulièrement de la fourmi du désert *Cataglyphis fortis*. Ce compas céleste bio-inspiré est doté de seulement deux photodiodes surmontées de filtres polarisants linéaires rotatifs permettant de balayer la voûte céleste, mesurant ainsi l'Angle de Polarisation, noté mathématiquement ψ (AdP) de la lumière du ciel afin de fournir une information de cap au robot. Le modèle de détermination du cap s'inspire de celui proposé par Thomas Labhart (Université de Zürich, Suisse) sur la vision de la polarisation chez le grillon. Bien que ce modèle biologique doive être considéré avant tout comme une vue de l'esprit, il n'en reste pas moins très intéressant de par sa parcimonie sensorielle pour développer des instruments bio-inspirés capables de fournir une information de cap. Les performances de ce nouvel instrument de navigation, dénommé *compas céleste*, seront décrites dans cet article et attesteront du caractère novateur, minimaliste, fiable et robuste de cette boussole optique pour l'estimation du cap d'un véhicule autonome naviguant en environnement extérieur.

1 Introduction

1.1 Stratégies actuelles de navigation en robotique

La navigation autonome est aujourd’hui un enjeu majeur dans le développement de véhicules et de robots autonomes. On compte en moyenne chaque année plus de 5000 porte-conteneurs en service, plus d’un milliard de voitures circulent sur les routes, et on estime que près de 5000 avions sont dans les airs à chaque 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 répétables. Les applications de ces systèmes de navigation autonomes sont nombreuses : l’exploration d’environnements ayant subi des catastrophes naturelles ou technologiques, d’infrastructures urbaines, mais aussi à l’occasion d’exploration extra-terrestre, dont on peut citer le rover Curiosity (NASA) et prochainement le rover ExoMars (ESA) ; le transport de biens et de personnes sur de longues distances ; l’inspection et le ramassage automatiques des récoltes dans les champs ; la navigation maritime autonome (projet norvégien de développement du tout premier porte-conteneurs autonome entièrement électrique, le Yara Birkeland, par exemple) ; et enfin les applications militaires telles que les missions de reconnaissance (drones, avions sans pilote, par exemple).

Le Global Positioning System (GPS) civil est à ce jour la principale méthode utilisée pour se localiser sur Terre. On le retrouve dans une multitude d’objets du quotidien tels que les téléphones portables, les voitures, et même les montres connectées. Pourtant sa précision reste variable, s’accompagnant généralement d’une incertitude de l’ordre de 5 m dans des conditions d’utilisation standard (couverture nuageuse faible, peu ou pas d’occultation, etc.) [1]. En environnement urbain, la précision du GPS est facilement 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, les ponts ou même les arbres.

Outre le GPS, les stratégies de navigation visuelles représentent également un domaine en expansion, particulièrement dans le cadre robotique (drones, rovers) ainsi que pour la voiture autonome. L’utilisation croissante des stratégies de type SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) permet d’obtenir d’excellents résultats sur le terrain [2, 3, 4]. Ces performances sont toutefois entachées d’un coût calculatoire très important. De plus, leur utilisation reste limitée par la difficulté de traiter les perturbations visuelles telles que l’éblouissement et les fortes variations de contraste du fait de l’utilisation de caméras conventionnelles (passage sous un tunnel, etc.) [5, 6]. Les caméras événementielles (*event-based*, caméras DVS ou DAVIS) pourraient permettre de répondre à ces deux contraintes et fournir des indices odométriques fiables dans un contexte de navigation [7]. On peut également mentionner les méthodes par détection laser (LIDAR), lesquelles fournissent des données de haute résolution très intéressantes [8]. Mais là encore, la charge

de calcul reste élevée, et les contraintes physiques liées à l'encombrement de ces systèmes peut fortement réduire leurs applications en robotique.

Enfin, une approche indirecte de la localisation réside dans l'intégration d'indices proprioceptifs tels que les accélérations linéaires et les vitesses angulaires, mesurées à l'aide de centrales inertielles 9 axes comprenant généralement un gyroscope, un accéléromètre et un magnétomètre. La combinaison de tels outils avec le GPS civil a d'ailleurs permis d'accroître considérablement les performances de navigation [9]. Les centrales inertielles sont relativement simples d'utilisation et peu coûteuses, mais restent néanmoins limitées dans leur application du fait de leur tendance à dériver à la fois en régime statique (gyroscope) et en régime dynamique (accéléromètre). Des parades à ces contraintes existent, comme par exemple la possibilité de réinitialiser la centrale à chaque fois que l'on sait que le système est à l'arrêt (valable par exemple si on l'embarque sur une chaussure connectée), ou encore l'utilisation de techniques de filtrages complémentaires, permettant de réduire considérablement la dérive selon le contexte. La sensibilité aux interférences électromagnétiques, pour les accéléromètres à détection capacitive notamment ainsi que pour les magnétomètres, reste cependant une limite importante dans des environnements urbains.

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 fusion 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 de la navigation autonome reste à déterminer, et ne réside pas en une solution unique, mais combinée.

1.2 Vers une solution bio-inspirée ?

De par notre connaissance de plus en plus fine des comportements de navigation dans le règne animal, et fort de l'approche pluridisciplinaire de l'équipe de Biorobotique de l'Institut des Sciences du Mouvement - Etienne-Jules Marey (UMR7287), nous avons choisi de nous intéresser aux stratégies de navigation développées par les fourmis du désert, plus particulièrement celles du genre *Cataglyphis* que l'on retrouve généralement sur le pourtour méditerranéen, ou encore les fourmis *Melophorus* qui vivent en Australie. Ces fourmis sont particulièrement connues pour leurs aptitudes remarquables à s'orienter dans des environnements pourtant arides et hostiles. Ces navigatrices hors-pairs peuvent parcourir plusieurs centaines de mètres et retrouver leur nid sans utiliser de pistes de phéromones comme le font leurs cousines européennes [10]. 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 d'intérêt (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, en anglais *path integrator* et souvent abrégé *PI*, qui requiert des indices odométriques (comptage de foulées, flux optique ventral) et d'orientation (polarisation de la lumière du ciel) [11] ;
- 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.

L'intégrateur de chemin est souvent décrit comme le fil d'Ariane des fourmis du désert. L'odométrie par intégration du flux optique est un mécanisme connu et maîtrisé dans les domaines de la vision par ordinateur et en robotique, notamment depuis les travaux de Koenderink [12], mais aussi ceux de Horn et Schunck [13], et ceux de Lucas et Kanade [14]. De plus, 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 [15]. Ces insectes sont capables de détecter l'angle de polarisation linéaire dans le domaine spectral ultraviolet (UV). Toutefois, en dépit du nombre non négligeable de tentatives d'implémentations robotiques de compas célestes inspirés de ces insectes, il n'existe que deux exemples aboutis d'applications à des tâches de navigation [16, 17]. D'autre part, la vision UV reste un domaine peu exploité, sans doute pour des raisons de coût de développement lié à ces technologies, ou tout simplement pour son caractère invisible ou anti-anthropocentrique.

Au vu de ces éléments de littérature, le choix de l'intégrateur de chemin comme alternative parcimonieuse aux techniques de navigation traditionnelles s'est naturellement imposé en vue notamment de se substituer à celles-ci en cas d'échec, ou bien encore d'être utilisé comme mécanisme complémentaire visant à consolider la robustesse de l'estimation de position.

1.3 Quid du robot ?

Les deux solutions d'application d'un compas céleste à la navigation autonome en robotique auxquelles nous faisons référence précédemment concernaient des robots à roue [16, 17]. Ces robots sont faciles à programmer et à utiliser, mais ne peuvent malheureusement pas être déployés sur tous les types de terrains. L'idée d'un robot marcheur hexapode est donc rapidement apparue comme une évidence dans le cadre de ce projet sur la navigation

bio-inspirée, appuyée notamment par le contexte du développement d'une stratégie de navigation inspirée des fourmis, dotées de six pattes.

Appliquant les méthodes de la bio-inspiration et du biomimétisme, ce robot insectoïde nous offre un spectre de possibilités bien plus vaste. Initialement destiné à tester des capteurs et des algorithmes inspirés d'études comportementales et physiologiques portant sur les fourmis du désert, l'hexapode mime le mode de locomotion des fourmis et offre des perturbations visuelles semblables à celles que subissent ces insectes. Les retombées en termes de réflexion sur la plausibilité des modèles biologiques sont significatives pour travailler sur la robotique à pattes et tester notre intégrateur de chemin (PI).

2 Le robot hexapode AntBot

La question du nombre de pattes du robot pourrait sembler anodine, et pourtant c'est précisément le nombre de pattes qui va déterminer les performances dynamiques du robot, lesquelles auront une incidence certaine, nous le verrons, sur la perception de l'environnement et sur la navigation autonome. Tout d'abord, la conception d'un robot hexapode se justifie fondamentalement par la nécessité de faire coïncider le plus possible la machine avec l'animal, c'est-à-dire la fourmi du désert dont nous nous inspirons et qui, parce que c'est un insecte, possède six pattes réparties le long de son thorax.

Par ailleurs, notre choix d'utiliser un robot hexapode, et non doté de quatre ou huit pattes, voire de concevoir un robot bipède, se justifie également d'un point de vue de l'efficacité. En effet, les robots quadrupèdes consomment moins d'énergie mais sont par essence très instables. Cette instabilité est due au fait qu'à chaque instant, une des quatre pattes est en transfert et met donc en porte-à-faux l'ensemble de la plateforme. A l'inverse, un robot hexapode sera toujours stable, s'il marche en mode tripode, comme le font les insectes, assurant ainsi que la plateforme repose toujours sur un trépied formé par trois pattes réparties symétriquement et en contact avec le sol. La consommation énergétique est cependant plus importante. Enfin, un robot octopode n'offrirait pas de différence significative en termes de stabilité, mais le coût énergétique serait à coup sûr un inconvénient pour l'automatisation du robot.

La robotique à pattes est un défi technique et technologique à bien des égards. Depuis les toutes premières machines hexapodes créées à la fin des années 1960, un grand nombre de progrès ont été réalisés tant au niveau mécatronique qu'au niveau algorithmique, notamment pour le développement de la locomotion adaptative. Les avantages qu'offrent de tels robots sont nombreux, en effet, la majeure partie des organismes vivants ont des pattes

leur permettant ainsi de s'adapter à leur environnement. Un robot à pattes peut donc se déplacer sur n'importe quel type de surface accidentée ou non, mais aussi sauter par-dessus des obstacles et grimper sur des structures. C'est également un formidable outil pour comprendre la locomotion dans le règne animal. Pourtant les robots à roues restent aujourd'hui les plus répandus pour plusieurs raisons : ils sont très faciles à développer, coûtent bien moins cher que leurs homologues à pattes, et sont également plus rapides, moins énergivores, souvent plus robustes et montrent de meilleures performances en stabilité dynamique.

Aujourd'hui, les robots hexapodes sont des systèmes maîtrisés offrant une large gamme de possibilités en termes de déploiement en environnement extérieur, et peuvent donc être utilisés à des fins de navigation autonome.

Le robot AntBot [18, 19, 20], présenté en figure 1, a été développé entre 2017 et 2019 afin de succéder à Hexabot [21]. AntBot possède une masse de 2,3 kg en incluant les capteurs, l'électronique et la batterie (LiPo 3S 12,4 V 5300 mAh). Son envergure est de 45 cm. Il est doté de six pattes, chacune comprenant un total de trois actionneurs (liaisons pivots) opérés par des servomoteurs Dynamixel AX18-A. Le micro-logiciel de locomotion d'AntBot embarqué sur une OpenCM 9.04C, permet de marcher en mode tripode de manière biomimétique et assurer un compromis entre la vitesse du robot, sa consommation énergétique et sa stabilité en roulis et tangage. AntBot est équipé d'une tête articulée en roulis; cette liaison supplémentaire sert en particulier à lever l'indétermination du cap donné par sa boussole céleste. Sur cette tête sont notamment disposés les capteurs du robot, ainsi que son micro-ordinateur (une carte Raspberry Pi 2B). Pour gérer les communications entre la carte Raspberry Pi 2B et les autres appareils électroniques (boussole céleste, centrale inertielle (IMU MinImu9 v.3), capteur de flux optique Michaelis-Menten Auto-adaptive Pixel (M²APix) et moteur pas à pas pour actionner en rotation les filtres polarisants), un carte *shield* sur mesure a été développée. Enfin, le robot dialogue avec un ordinateur via un réseau local privé sans fil (WLAN).

Les performances dynamiques d'AntBot montrent une dérive caractéristique en lacet. Cette dérive s'explique par le déséquilibre des masses d'une part, mais aussi par les interactions entre les extrémités des pattes et les aspérités du sol (particulièrement en extérieur sur le goudron, par exemple). AntBot peut marcher jusqu'à 90 cm·s⁻¹ sur un sol lisse. Ces aptitudes remarquables sont toutefois entachées d'une limite d'utilisation : les servomoteurs utilisés sont constitués d'engrenages en plastique fragiles, dont la durée de vie est limitée, mais aussi d'une forte charge à embarquer (capteurs et batteries). De plus, le comportement dynamique est très dépendant de la température, ce qui a eu une double incidence sur les expériences de navigation : (i) une

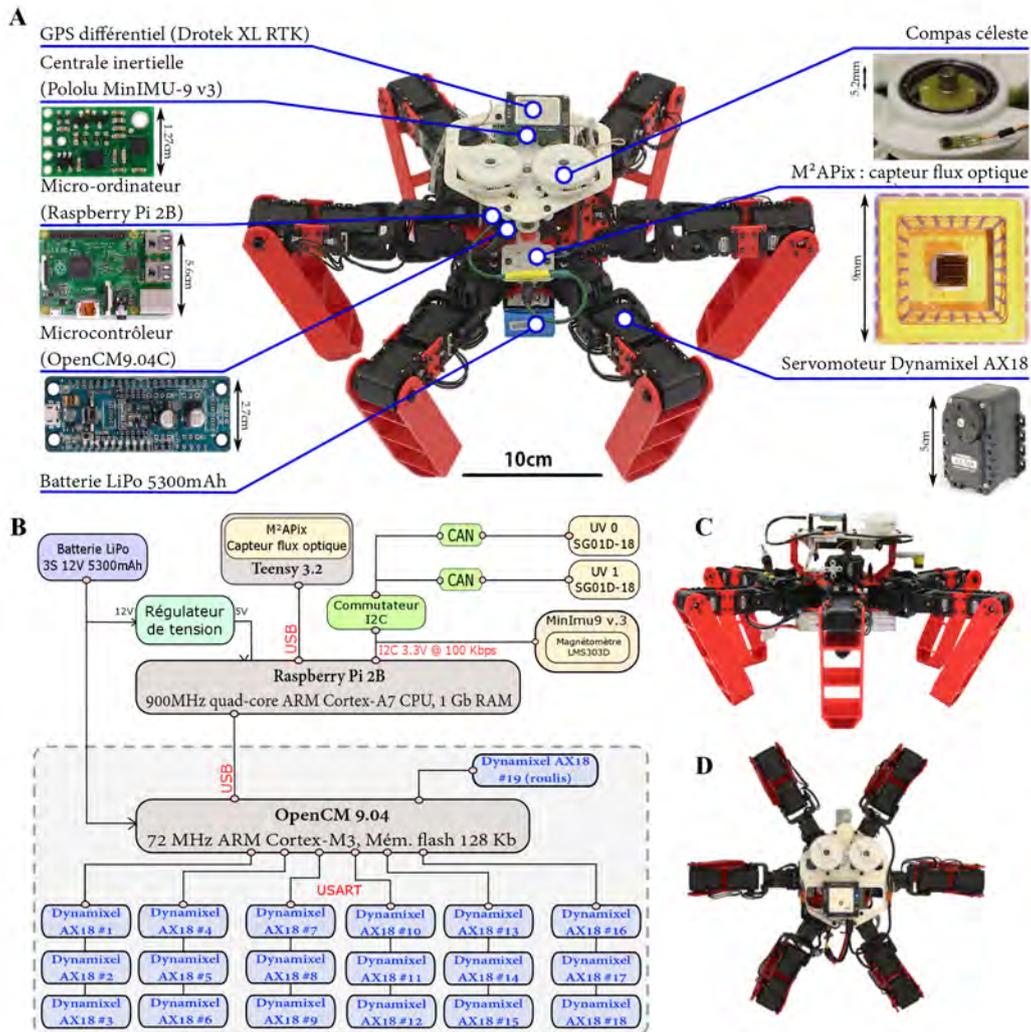


FIGURE 1 : Le robot hexapode AntBot. (A) Structure du robot avec ses capteurs et ses composants électroniques. (B) Architecture matérielle de la plate-forme robotique AntBot. (C) Vue de côté et (D) vue de dessus d'AntBot. Adapté de [18].

influence sur la distance moyenne parcourue par foulée, (ii) un risque élevé de mise en sécurité d'un servomoteur (température critique de $70^{\circ}C$).

Somme toute, le robot AntBot présente de nombreux atouts, à commencer par la stabilité remarquable de la tête lorsque celui-ci avance. Cela permet de minimiser les artéfacts visuels qui pourraient mettre en défaut l'estimation de la position du robot lorsqu'il navigue. Les pièces qui composent le robot,

toutes imprimées en 3D, permettent une maintenance rapide et facile en cas d’avarie. AntBot est également suffisamment petit et léger pour permettre des applications en extérieur en totale autonomie ; par exemple, l’autonomie d’AntBot lorsque celui-ci est équipé d’une batterie LiPo 5300 *mAh* peut atteindre 30 minutes selon le mode de locomotion choisi. Enfin, le micro-logiciel gérant la locomotion permet de modifier un grand nombre de paramètres, permettant ainsi de définir une configuration proche de celle des fourmis du désert. Ce dernier point est important en ce sens que l’un des objectifs de ces travaux de recherche est de confirmer ou non la plausibilité de certains modèles biologiques. L’insecte et la machine doivent donc partager un maximum de caractéristiques morphologiques et locomotrices communes.

3 La perception de la lumière polarisée chez les fourmis du désert

3.1 L’œil composé de la fourmi

Comme tous les arthropodes, les fourmis sont dotés d’yeux composés (Figs. 2A-C). Un œil composé est une structure convexe composée d’une myriade de systèmes optiques, aussi appelés ommatidies. Chacune d’entre elle forme un récepteur visuel unique et indépendant (Fig. 2D). Une ommatidie se compose d’une cornée formant une facette hexagonale (Fig. 2E), d’un cône cristallin (i.e. lentille) transparent permettant de guider les rayons lumineux jusqu’au rhabdome (Fig. 2D), d’un rhabdome, axe central de l’ommatidie, transparent et conduisant la lumière à la manière d’un guide d’onde jusqu’aux cellules photoréceptrices (Fig. 2D), de cellules photoréceptrices, au nombre de 8 chez *Cataglyphis* et réparties radialement autour du rhabdome (Fig. 2F), et enfin de cellules pigmentées assurant à la manière d’un iris une modulation du flux lumineux absorbé (Fig. 2F). Contrairement aux idées reçues, les insectes ne voient pas le monde comme une mosaïque où la scène serait dupliquée par le nombre d’ommatidies. En réalité, chaque cellule photoréceptrice voit une petite zone de la scène, et l’ensemble de ces cellules permet de reconstituer la scène dans sa globalité. Les insectes tels que les abeilles, les grillons ou les fourmis sont dotés d’une vision quasi-panoramique à très basse résolution optique : alors que les êtres humains possèdent une acuité visuelle de $1/60^{\text{ème}}$ de degré dans la fovéa, celle des abeilles atteint environ $1,9^\circ$ dans sa partie frontale [22], et les fourmis du désert jusqu’à 5° [23, 24].

L’œil des fourmis, mais également d’autres arthropodes tels que le criquet migrateur, l’abeille mellifère et la crevette mante, est à apposition (Fig. 2D).

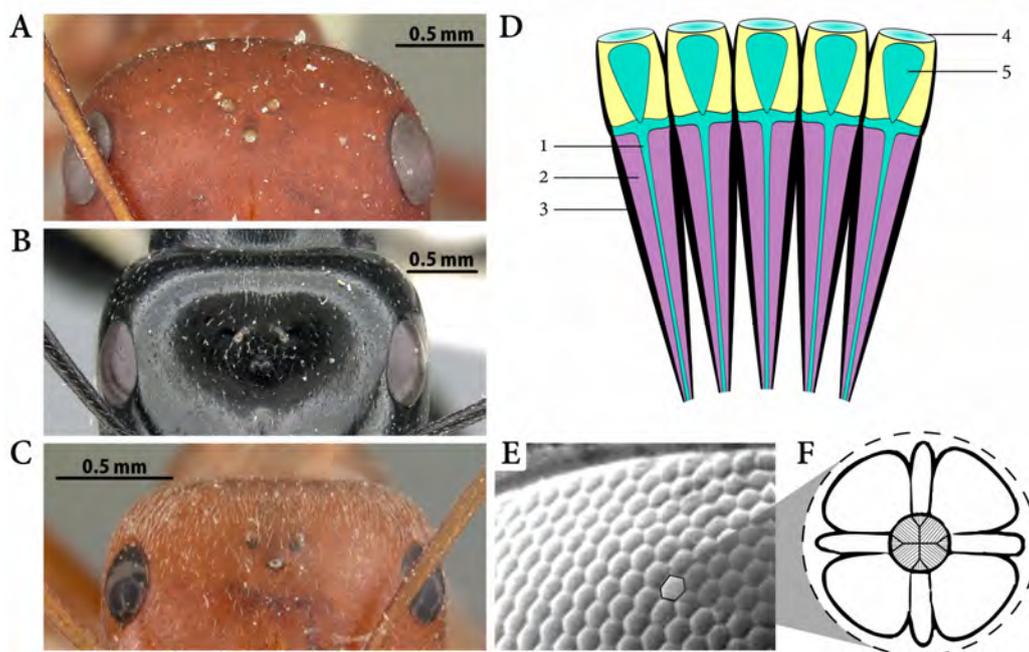


FIGURE 2 : Le système visuel des fourmis *Cataglyphis*. **A-C** Vue agrandie des yeux composés respectivement chez *Cataglyphis bicolor* (Crédits : April Nobile), *Cataglyphis fortis* (Crédits : Estella Ortega) et *Cataglyphis bombycinus* (Crédits : April Nobile). Modifié de AntWeb.org, licence CC-BY-SA. **D** Schématisation des ommatidies d'un œil composé en apposition. 1- Rhabdome. 2- Cellules photoréceptrices. 3- Cellules pigmentées. 4- Cornée. 5- Cône cristallin. **E** Photographie de l'œil composé de *Cataglyphis bicolor*. Adapté de [15]. **F** Structure d'une ommatidie chez *Cataglyphis* comprenant 8 photorécepteurs et des microvillosités pour filtrer la lumière polarisée linéairement.

Dans cette configuration, le groupe de récepteurs à l'intérieur de chaque ommatidie reçoit une image inversée par la lentille. Chaque ommatidie voit une petite zone de l'espace visuel, en d'autres termes un "pixel" de l'image, correspondant à l'intensité lumineuse moyenne (filtrage basses fréquences) des rayons incidents parallèles au rhabdome. L'apposition ou la juxtaposition organisée des ommatidies ou "pixel" permet alors de reconstruire l'image d'une scène quasi-panoramique [25, 26].

3.2 Le ciel projette un motif de polarisation

Le ciel vu au travers d'un filtre polarisé linéairement

Le cap est une composante décisive en navigation. Pourquoi les fourmis du désert [27], les grillons [28, 29] ou les papillons monarques [30] utilisent-ils la lumière polarisée pour estimer leur cap lorsqu'ils naviguent ?

Les êtres humains ne sont pas sensibles à la polarisation de la lumière du ciel. Aussi la voûte céleste nous apparaît-elle uniforme comme le montre la figure 3A. Sur cette photographie du ciel, nous ne percevons que le gradient de couleur dû à la position du soleil, ici proche de l'horizon. En revanche, si l'on observe le ciel à travers un filtre polarisé linéairement, on constate la présence d'un contraste net dans le ciel (Fig. 3B,C).

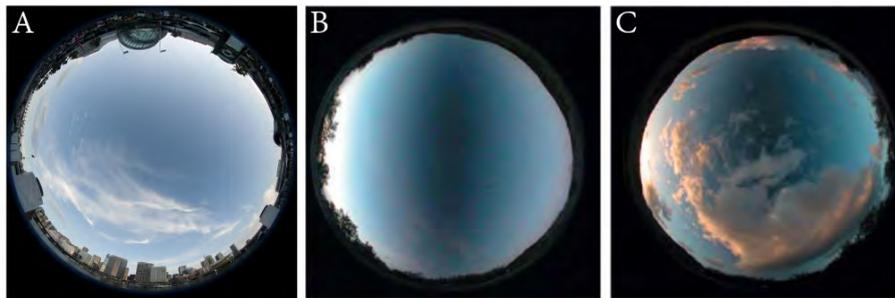


FIGURE 3 : Vues *fish-eye* du ciel. **A** Photographie prise sans filtre polarisant linéaire. (Crédits : Nigel Howe, CC-BY). **B,C** Photographies prises avec un filtre polarisant linéaire sous un ciel dégagé et nuageux. Dans les deux cas, le filtre est orienté selon le méridien solaire. Source : <https://aibolita.com/eye-diseases/38640-polarized-light-in-nature.html>.

En pratique, l'orientation de cette barre dépend de l'orientation du filtre polarisant. Si le filtre polarisant et l'axe du méridien solaire (i.e. le demi-cercle passant par le soleil et le zénith) sont colinéaires, alors le contraste sera perpendiculaire au méridien. En revanche, si l'on oriente le filtre perpendiculairement au méridien, alors le contraste sera parallèle au méridien solaire. La figure 4 montre l'effet de l'orientation du filtre polarisant linéaire sur la lumière du ciel. Au regard de ces observations, on pressent qu'il existe dans le ciel une sorte de droite qui pourrait servir de référence pour s'orienter, à la manière du Nord magnétique sur une boussole céleste.

Le motif de polarisation de la lumière du ciel

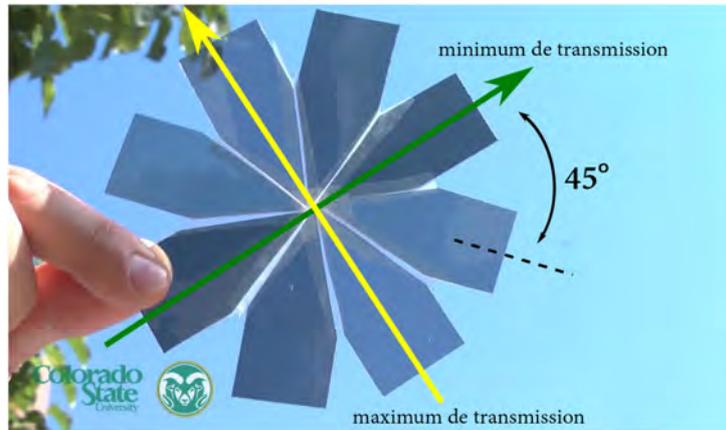


FIGURE 4 : Photographie montrant l'absorption plus ou moins importante de la lumière du ciel lorsque celle-ci traverse un filtre polarisant linéaire. En fonction de l'orientation de ce dernier, la lumière est plus ou moins transmise : le maximum de transmission est obtenu selon l'orientation décrite par la flèche jaune ; le minimum est atteint dans l'orientation perpendiculaire (flèche verte). Extrait et adapté 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, les interactions entre les photons et les molécules de notre atmosphère entraînent une polarisation linéaire de la lumière du ciel selon un motif régulier et symétrique par rapport au méridien solaire et dont l'organisation spatiale dépend de la position du soleil dans le ciel [31, 32, 33, 34] (Fig. 5).

La lumière du soleil est naturellement dépolarisée : les ondes électromagnétiques qui la composent oscillent dans toutes les directions (Fig. 6). L'atmosphère terrestre se comporte comme un polariseur linéaire partiel en polarisant une partie de la lumière du soleil selon une orientation principale. L'état de polarisation de l'onde lumineuse comprend l'angle de polarisation, noté AdP, déterminant l'orientation de l'axe des oscillations par rapport au méridien solaire, et le Degré de Polarisation Linéaire (DPL), correspondant à l'intensité de la lumière polarisée linéairement divisée par l'intensité totale. Ainsi, en fonction de la longueur du chemin parcouru dans l'atmosphère par le rayonnement solaire, l'AdP et le DPL seront différents. L'état de polarisation du rayonnement du ciel dépend de la position de l'observateur sur la surface de la Terre, de la longueur d'onde du rayonnement, ainsi que de la zone de la voûte céleste qui est observée. Le maximum de polarisation de la lumière se produit à 90° du soleil. Le DPL augmente avec la distance par rapport au

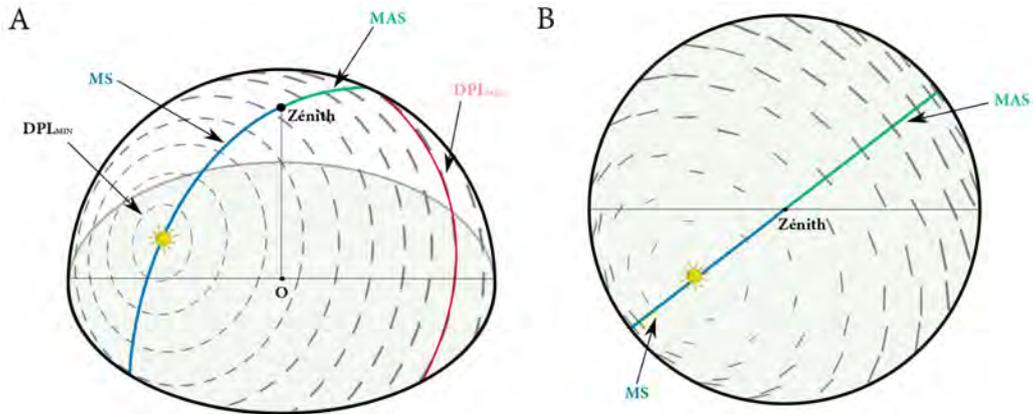


FIGURE 5 : La polarisation de la lumière du ciel. **A** Diagramme de polarisation linéaire de la lumière du ciel en fonction de la position du soleil (S) et relativement à un observateur (O). Le disque plan est considéré tangent à la surface de la terre; l'axe (OZ) est défini comme la normale à ce plan. L'orientation des tirets noirs donne l'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 antisolaire (MAS). **B** Projection du motif de polarisation sur le disque plan. Le long du MS, toutes les orientations sont parallèles entre elles et perpendiculaires au méridien. Adapté de [35, 36].

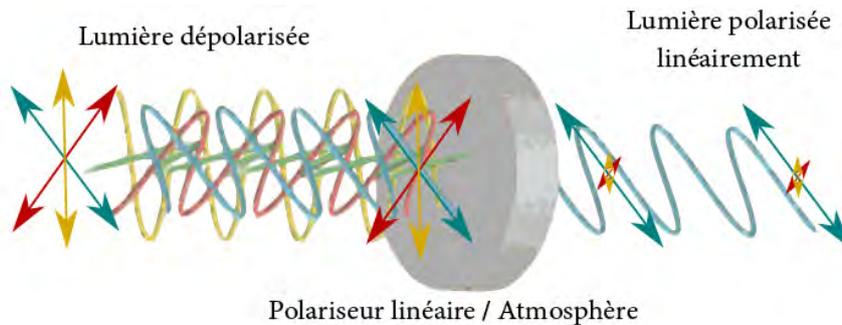


FIGURE 6 : Schéma représentant l'effet de l'atmosphère terrestre (i.e. un polariseur linéaire) sur la lumière dépolarisée provenant du soleil. L'angle de polarisation correspond donc à l'orientation de la lumière polarisée.

soleil, puis diminue au-delà de 90° (Fig. 7). 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 nor-

males) [31, 37]. Quelle que soit la position du soleil, la distribution des AdP est symétrique par rapport aux méridiens solaire et antisolaire (Fig. 5A). 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.

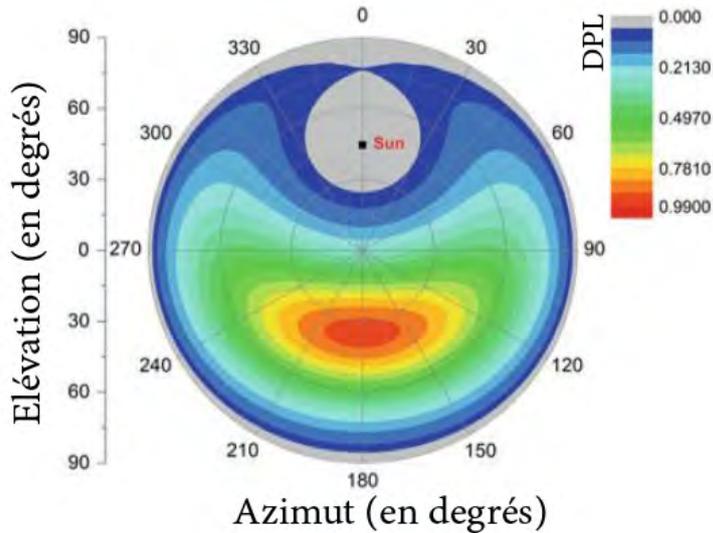


FIGURE 7 : Diagramme simulé de la distribution du DPL d'après la théorie de Rayleigh, en fonction de la position du soleil dans la voûte céleste. Extrait de [38].

3.3 La vision de la polarisation chez les insectes

La *Dorsal Rim Area* (aire dorsale marginale) (DRA) de l'œil composé des insectes décrit les ommatidies sensibles à la lumière polarisée [15, 39]. Chaque ommatidie se compose de deux groupes perpendiculaires de microvillosités, sortes de petits cils guidant la lumière. Ainsi, l'absorption des photons est maximale lorsque l'AdP de la lumière coïncide avec l'orientation des microvillosités [27, 40]. La sensibilité spectrale des ommatidies varie entre les insectes (Fig. 8) : les fourmis du désert, les abeilles, le bousier ou encore les drosophiles sont sensibles aux rayonnements UV [15, 41], tandis que le grillon présente une sensibilité maximale dans le bleu (433 nm) [42]. Cette préférence UV pourrait s'expliquer par le fait que le DPL reste suffisant pour permettre la transmission de l'onde polarisée au travers des nuages et des canopées, tandis qu'il est altéré dans le visible et l'infrarouge [43]. Toutefois,

cette hypothèse reste l'objet de nombreux débats car elle n'explique pas la préférence bleue ou verte observée chez d'autres insectes.

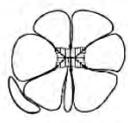
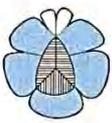
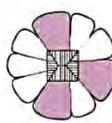
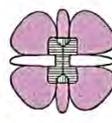
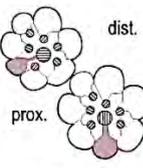
Ommatidies de la DRA	Optique	Aucune	Lentille altérée	Lentille trouble	Lentille trouble	Aucune	Aucune
	Sensibilité spectrale	-	Bleu	Vert	UV	UV	UV
	Nombre de récepteurs	-	5	7	3	6	2
	Nombre de types de récepteurs	-	4/1	6/1	2/1	4/2	1/1
	Structure						
Insecte	Libellule (<i>sympetrum</i>)	Grillon (<i>gryllus</i>)	Hanneton (<i>melolontha</i>)	Abeille (<i>apis</i>)	Fourmi (<i>cataglyphis</i>)	Mouche (<i>drosophila</i>)	

FIGURE 8 : La sensibilité spectrale de la DRA des insectes. Au centre de chaque ommatidie, on observe les microvillosités (cils disposés parallèlement) guidant la lumière polarisée à travers la cellule. Adapté de [15].

Le traitement neuronal de l'AdP a été étudié chez les sauterelles [44], les grillons [45], les fourmis du désert [46], les abeilles [47], les bousiers [48, 49] ainsi que chez les papillons monarques [45]. Un réseau permettant de traiter la lumière polarisée perçue par la DRA a été identifié, s'étendant de la DRA jusqu'au complexe central [50, 51] (Fig. 9). Ce réseau neuronal peut être découpé en trois étages distincts [11, 52]. La lumière polarisée est d'abord captée par les ommatidies de la DRA, dont l'orientation des microvillosités permet de couvrir l'ensemble de l'intervalle $[0^\circ; 180^\circ]$. Comme cela a été observé chez les grillons [28] et les sauterelles [51], l'information est ensuite envoyée vers le lobe optique. Chez le grillon, les neurones sensibles à la polarisation montrent une forte activité synaptique en réponse à trois angles de polarisation précis : 10° , 60° et 130° [45]. Enfin, l'AdP est déterminé dans le complexe central où les neurones du pont protocérébral montrent une activité synaptique en réponse à l'ensemble des orientations comprises dans l'intervalle $[0^\circ; 180^\circ]$ [53, 11].

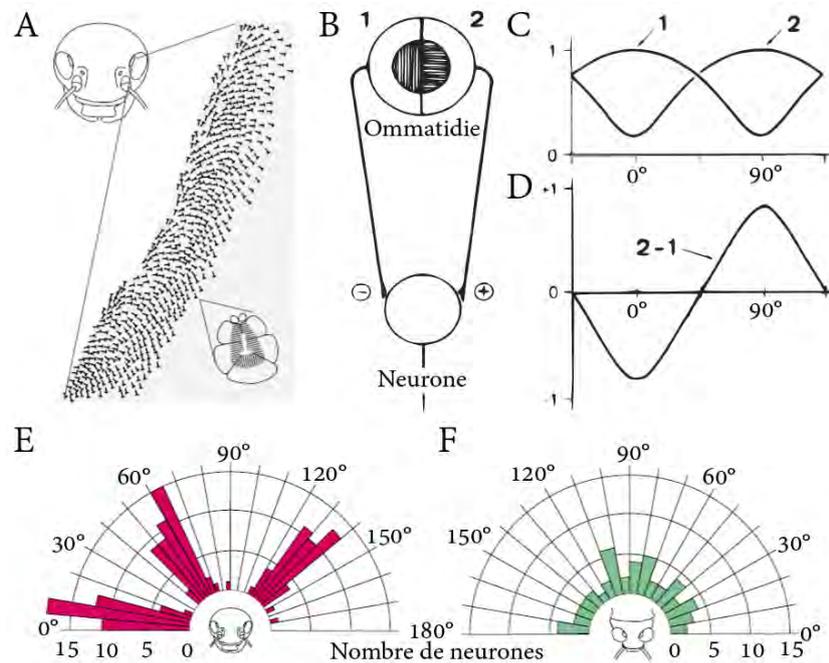


FIGURE 9 : Le traitement neuronal de la lumière polarisée chez les insectes. **A** Distribution et orientation des ommatidies dans la DRA du grillon. **B** Modèle d'un neurone polarisé. **C** Réponse des ommatidies en fonction de l'orientation de leurs filtres polarisés (perpendiculaires entre eux). **D** Signal de sortie du neurone polarisé, équivalente à une différence logarithmique des deux ommatidies. **A–D** Adaptés de [28]. **E,F** Activation des neurones du lobe optique (**E**, chez le grillon) et du complexe central (**F**, chez la sauterelle) en fonction de l'AdP. Adapté de [29].

4 Capteurs bio-inspirés pour la navigation céleste

A la fin des années 1990, D. Lambrinos et ses collègues ont développé la toute première boussole céleste alors embarquée sur le robot Sahabot, un robot à six roues conçu pour réaliser des tâches de navigation autonome en s'inspirant des fourmis *Cataglyphis* pour la partie navigation et des grillons pour la partie capteurs [54, 16]. La boussole était composée de trois unités de polarisation disposées selon des direction préférentielles régulièrement espacées (0° , 60° et 120°), de façon à reproduire la sélectivité angulaire des neurones du lobe optique chez le grillon [28]. Par analogie avec les ommatidies de la DRA, chaque unité de polarisation se compose de deux photodiodes

surmontées de filtres polarisants linéaires disposés orthogonalement l'un par rapport à l'autre. Les tests dans le désert ont conduit à une erreur moyenne de $0,66^\circ$ [54]. Ces résultats furent obtenus sous des conditions météorologiques optimales : ciel parfaitement dégagé ; mesures faites en début de matinée et fin d'après-midi afin d'éviter tout risque de saturation des photodiodes d'une part, et de bénéficier d'un DPL maximal au zénith d'autre part (Fig. 5B).

A la fin des années 2000, J. Chu et ses collègues ont développé une version plus petite du compas embarqué sur Sahabot, composé de trois unités de polarisation de directions préférentielles 0° , 60° et 120° [55]. Les résultats montrèrent une excellente précision du capteur en lumière contrôlée, avec une erreur médiane de seulement $0,2^\circ$. Ce compas a notamment été utilisé en association avec un magnétomètre pour des projets de localisation temps réel du véhicule autonome [56]. Forts de leur succès, ils ont procédé à la miniaturisation du compas céleste, en proposant une version intégrée du capteur en 2014 [57]. Ce capteur a donné lieu à une erreur moyenne de seulement $0,1^\circ$ en lumière contrôlée et après une correction par ajustement polynomial [57]. D'autres prototypes ont été réalisés [58, 59, 60], mais celui de Lambrinos *et al.* d'une part, et plus récemment de Chu *et al.* d'autre part, semblent être les seuls à avoir tenté de reconstruire une DRA artificielle à des fins de navigation terrestre autonome. Ces capteurs innovants se sont montrés très efficaces dans l'estimation du cap des robots sur lesquels ils étaient embarqués [16, 17]. Toutefois, ils se sont principalement focalisés sur l'hypothèse de la préférence angulaire des neurones (POL) du lobe optique pour les orientations 10° , 60° et 130° ainsi que la détection d'une bande spectrale bleue (400 nm).

En complément de ces compas célestes bio-inspirés, plusieurs équipes de recherche ont développé des solutions utilisant des caméras *Charge-Coupled Device* (dispositif à transfert de charge - DTC) (CCD) et *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor* (CMOS) opérant principalement dans le domaine visible (Tab. 1). Carey et Stürzl ont utilisé une caméra CCD proche UV ($300\text{ nm} < \lambda < 420\text{ nm}$ avec un pic de sensibilité à 380 nm) surmontée d'un miroir convexe verticalement aligné avec l'axe optique de la caméra de manière à pouvoir observer l'ensemble de la voûte céleste, et ainsi reconstruire l'ensemble du motif de polarisation [61]. Bien que cette approche soit également inspiré du système visuel des insectes, l'extraction de l'AdP s'est faite par application de la théorie de Stokes (modèle physique) [62, 63]. Daobin Wang et collègues ont utilisé 3 caméras CCD à 1,2 mégapixel et surmontées de filtres bleus et de filtres polarisants linéaires orientés à 0° , 45° et 90° [64]. Pour rendre le tout compatible avec une utilisation en temps réel, les images étaient tronquées et sous-échantillonnées pour une dimension finale de 108 pixels. Après une procédure de calibration, ce compas céleste a donné de bonnes performances avec une erreur de cap égale à $0,3^\circ$ sous conditions

météorologiques favorables. Le même principe a été renouvelé par Wenjing Zhang et collègues en remplaçant les trois caméras par une seule caméra CCD monochrome de 29 mégapixels surmontée d’un filtre polarisant linéaire divisé en trois parties, chacune d’entre elle ayant une direction de polarisation différente (0° , 60° et 120°) [65]. Une alternative, également abordée dans leur étude, utilise un filtre polarisant divisé en 4 secteurs, chacun d’entre eux ayant également une direction de polarisation différente (0° , 45° , 90° et 135° , appelée aussi méthode de Stokes). On note que certains prototypes utilisent des filtres polarisés linéaires radiaux [66]. Enfin, Chen Fan et collègues ont récemment conçu un compas céleste utilisant 4 caméras CCD de 0,8 mégapixel avec des orientations de filtres polarisants à 0° , 45° , 90° et 135° [67]. Toutes ces méthodes ont généralement fait leurs preuves, avec des erreurs moyennes d’estimation du cap ne dépassant pas quelques degrés, mais utilisant des millions de pixels.

Auteurs	Année	Ref.	Photocapteur	Bio-inspiré	UV	Filtres rotatifs	Minimaliste
Lambrinos et al.	1997	[54]	5*Photodiodes	✓	×	×	✓
Chu et al.	2008	[55]		✓	×	×	✓
Chahl et al.	2012	[58]		✓	×	×	✓
Wang et al.	2015	[56]		×	✓	×	×
Dupeyroux et al.	2017	[68]		✓	✓	✓	✓
Zhi et al.	2018	[69]		×	×	×	✓
Sarkar et al.	2010	[70]	3*Capteur intégré	×	×	×	×
Chu et al.	2014	[57]		✓	×	×	✓
Garcia et al.	2017	[71]		Crustacés	×	×	×
Carey et al.	2011	[61]	9*Caméra CMOS	✓	✓	×	×
Sarkar et al.	2013	[72]		✓	×	×	×
Wang et al.	2014	[64]		✓	×	×	×
Zhang et al.	2015	[65]		✓	✓	×	×
Fan et al.	2016	[60]		×	×	×	×
Zhang et al.	2016	[66]		×	✓	×	×
Wang et al.	2017	[73]		×	×	×	×
Han et al.	2017	[74]		×	×	×	×
Fan et al.	2018	[75]		×	×	×	×
Momeni et al.	2006	[76]		VLSI	×	×	×

TABLE 1 : Classification non-exhaustive des compas célestes. Le critère de bio-inspiration ne traite que des insectes (fourmi du désert, sauterelle, grillon, etc.). Le critère de minimalisme concerne le nombre de pixels utilisés. *VLSI* : *Very Large-Scale Integration*.

5 Notre boussole céleste

5.1 Pourquoi un nouveau design ?

Les prototypes minimalistes et bio-inspirés de compas célestes que nous venons de passer en revue montrent clairement des performances intéressantes à des fins de navigation autonome. Toutefois, ces travaux doivent être nuancés. D'une part, les conditions d'expérimentation sont systématiquement favorables (environnement contrôlé ou conditions météorologiques optimales), et d'autre part, les solutions utilisant des caméras CCD ont, certes, donné de bons résultats, mais l'encombrement et le coût en traitement de l'information visuelle représentent une limite forte pour un éventuel déploiement en robotique mobile.

L'enjeu est donc de concevoir un compas céleste nécessitant peu de pixels et de ressources calculatoires, de petite taille, et dont la configuration et le fonctionnement seraient au plus proche des modalités sensorielles de la DRA des insectes. L'accent sera notamment mis sur la sensibilité UV, laquelle n'a que très peu été utilisée dans les précédents prototypes. Or, une grande partie des insectes utilisent la polarisation de la lumière du ciel comme information de cap en bande spectrale UV. Des millions d'années d'évolution témoignent sans aucun doute d'un intérêt concret à utiliser cette bande spectrale et non une autre [77]. De surcroît, les activités humaines n'émettent pas de rayonnement UV, et l'on peut donc considérer que les perturbations visuelles seront bien moins fortes dans les UV que dans le spectre visible.

5.2 Un compas céleste détectant les ultraviolets

Le compas céleste AntBot comporte deux photodiodes (SG01D-18, SgLux) surmontées de filtres polarisants linéaires, lesquels sont fixés sur deux engrenages entraînés par un moteur pas-à-pas (AM0820-A-0.225-7, Faulhaber), lui-même placé entre ces deux engrenages, au centre du compas (Fig. 10). Le rapport de réduction entre l'engrenage moteur et celui du filtre polarisant est de 1 : 7. Afin de reproduire l'ensemble de l'aire dorsale marginale de la fourmi (DRA), les filtres ont été mis en rotation. En combinant cette paire de photodiodes avec des filtres polarisants linéaires mis en rotation, le compas céleste est équivalent à deux rangées de 374 pixels, chacun étant réglé sur un AdP unique. Le prototype est intégralement imprimé en 3D à l'aide de filament PLA (acide polylactique). Les pièces sont accessibles en ligne¹. Les filtres polarisants sont disposés de sorte que la direction de polarisation du premier filtre soit orthogonale à celle du second (déphasage de 90°). Ainsi, du fait de la symétrie du motif de polarisation de la lumière du ciel par rapport au méridien solaire, la rotation complète des filtres génère des signaux sinusoïdaux de période 180° en opposition de phase.

¹<https://github.com/JuSquare/AntBot/tree/master/CelestialCompass>

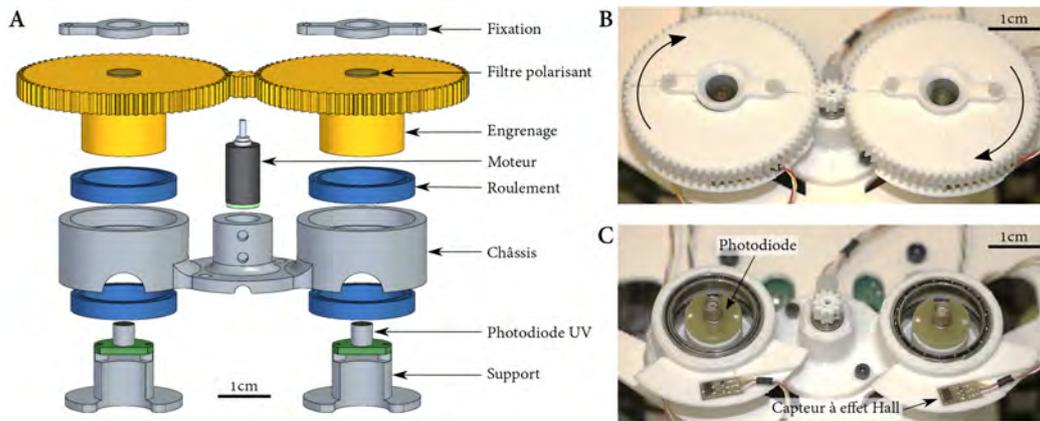


FIGURE 10 : **A** Vue en éclaté du compas céleste. **B** Photographie du compas. **C** Photographie du compas sans les engrenages. On distingue notamment les capteurs à effet Hall, permettant de donner une référence dans la rotation des engrenages équipés des filtres. D’après [18, 78, 20].

Le filtre polarisant utilisé présente un taux de transmission de 52% pour les longueurs d’onde comprises entre 270 nm et 400 nm . Le pic de transmission est atteint pour la longueur d’onde $\lambda \approx 330 nm$. D’autre part, les photodiodes SG01D-18 sont constituées d’une surface de détection de 0,5 mm^2 ; la sensibilité spectrale s’étend de 200 nm à 375 nm , avec une réponse maximale pour les radiations à 280 nm . La gamme spectrale du compas s’étend donc de 270 nm à 375 nm , tandis que les fourmis *Cataglyphis* ont un pic de sensibilité UV situé autour de 350 nm .

Pour prendre conscience de l’influence des conditions météorologiques sur la mesure du cap, la réponse de chaque unité de polarisation du compas a été enregistrée en continu pendant 5 minutes sous un ciel variable (vents à 65 $km \cdot h^{-1}$ selon Météo France) et sous un ciel parfaitement dégagé en avril 2017. L’indice UV, donné pour un ciel dégagé, était de 7 selon l’ESA². Les courbes sont affichées dans la figure 11. On observe alors que lorsque le ciel est dégagé, l’enveloppe et la valeur moyenne des signaux restent stables au cours du temps, tandis qu’en cas de ciel variable, l’intensité lumineuse UV moyenne varie rapidement à l’échelle du temps d’acquisition (environ 16 secondes pour que les filtres fassent un tour complet).

Ainsi, on peut s’attendre à une grande variabilité du cap en cas de perturbations nuageuses. Celles-ci sont particulièrement accentuées par les nuages qui tendent à altérer l’AdP de la lumière, mais par des mesures répétées

²<http://www.temis.nl/uvradiation/UVindex.html>

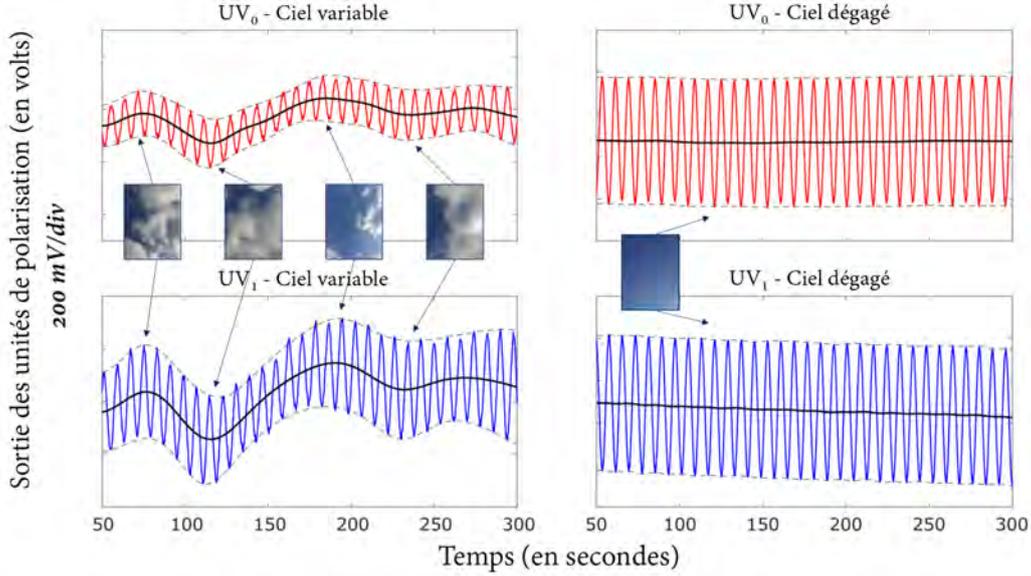


FIGURE 11 : Signaux de sortie des unités de polarisation UV_0 (en rouge) et UV_1 (en bleu) en fonction des conditions météorologiques : ciel variable (à gauche) et ciel dégagé (à droite). Les courbes noires donnent l'intensité lumineuse UV moyenne. Ces sinusoïdes ont été obtenues avec la boussole céleste à Marseille en avril 2017. D'après [18].

et l'application d'un filtre médian, nous verrons que l'on peut obtenir une mesure fiable.

5.3 Détermination du cap céleste : la méthode d'AntBot

La méthode ici décrite donne le calcul de l'AdP ψ tel qu'il a été utilisé pour les expériences de navigation réalisées avec le robot AntBot. Pour déterminer l'angle de cap, on réalise une rotation complète des filtres polarisants. Des capteurs à effet Hall sont utilisés pour repérer la fin de l'acquisition, donnant ainsi précisément le nombre de mesures N faites (Fig. 10C). Le traitement des signaux ainsi obtenus est directement inspiré de l'illustration du fonctionnement des neurones (POL) du lobe optique chez le grillon formulée par Thomas Labhart [28]. On définit la réponse de chaque unité de polarisation UV_0 et UV_1 en fonction de l'orientation ψ_i , $\forall i \in [1..N]$ des filtres polarisants comme suit :

$$\begin{cases} UV_{0,i}(\psi) = A_{0,i} + B_{0,i} \cdot \cos(2 \cdot (\psi + \psi_i)) + \alpha_{0,i} \\ UV_{1,i}(\psi) = A_{1,i} + B_{1,i} \cdot \cos(2 \cdot (\psi + \psi_i + 90^\circ)) + \alpha_{1,i} \end{cases} \quad (1)$$

Les constantes $A_{0,i}$ et $A_{1,i}$ sont dues à l'intensité de la lumière UV ambiante d'une part, et à une composante continue propre à chaque photodiode d'autre part. De même, $B_{0,i}$ et $B_{1,i}$ sont des gains constants qui dépendent notamment du DPL de la lumière UV, mais également du gain provenant de la photodiode et de son circuit électronique. α_0 et α_1 représentent des distributions aléatoires de bruit, en grande partie dues aux bruits de mesure ainsi qu'aux perturbations météorologiques. Les sinusoïdes ainsi obtenues correspondent donc à la variation de l'intensité lumineuse transmise par le filtre polariseur en fonction de l'orientation de celui-ci. Étant donné la symétrie du motif de polarisation (Fig. 5), la périodicité du signal est égale à 180° .

En vue d'en extraire une information fiable, les signaux sont d'abord corrigés au moyen d'un filtrage passe-bas (Fig. 12). On considère alors la transformée de Fourier des deux signaux. Après avoir isolé le premier harmonique, l'ensemble du spectre est mis à zéro au-delà. On applique ensuite la transformée de Fourier inverse, suivie d'une normalisation entre 0 et 1. Les signaux ainsi traités sont appelés $UV_{0,i}^{nc}$ et $UV_{1,i}^{nc}$, où nc signifie normalisé et corrigé :

$$\begin{cases} UV_{0,i}^{nc}(\psi) = \frac{1}{2+\epsilon}(1 + \cos(2 \cdot (\psi + \psi_i)) + \epsilon) \\ UV_{1,i}^{nc}(\psi) = \frac{1}{2+\epsilon}(1 + \cos(2 \cdot (\psi + \psi_i + 90^\circ)) + \epsilon) \end{cases} \quad (2)$$

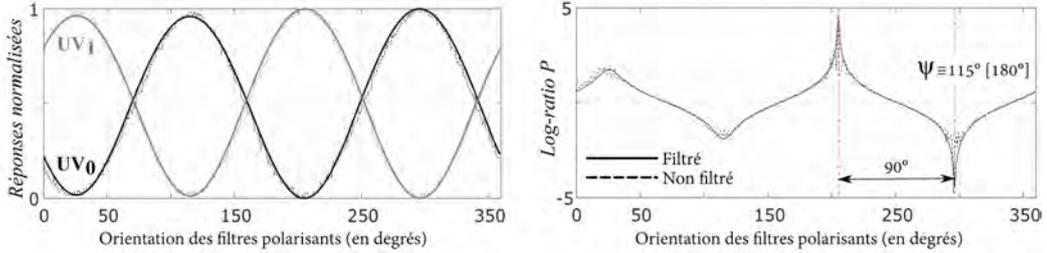


FIGURE 12 : Exemple de signaux obtenus en avril 2017 (ciel dégagé, indice UV égal à 7). **Gauche** Signaux normalisés avant (pointillés) et après filtrage (trait plein). **Droite** Fonctions P (log-ratio) correspondantes. L'AdP détecté est égal à $115^\circ [180^\circ]$. D'après [78].

On calcule alors la fonction P , définie comme le logarithme du quotient entre les deux signaux $UV_{0,i}^{nc}$ et $UV_{1,i}^{nc}$ (Eq. 3, Fig. 12). La constante ϵ , fixée à 10^{-6} , permet de s'assurer qu'il n'y aura pas d'échec dans l'exécution du calcul du logarithme.

$$\forall i \in \llbracket 1..N \rrbracket, P_i = \log_{10} \left(\frac{UV_{0,i}^{nc}(\psi)}{UV_{1,i}^{nc}(\psi)} \right) \quad (3)$$

On en déduit :

$$\forall i \in \llbracket 1..N \rrbracket, P_i = \log_{10} \left(\frac{1 + \cos(2 \cdot (\psi + \psi_i)) + \epsilon}{1 - \cos(2 \cdot (\psi + \psi_i)) + \epsilon} \right) \quad (4)$$

Dans le complexe central des grillons, le cap serait donné par la population de neurones du pont protocérébral ayant le taux de décharge le plus élevé [53]. En effet, le pont protocérébral serait découpé en plusieurs groupements de neurones, chacun étant activé par un AdP spécifique [11]. Pour autant que l'on sache, le modèle expliquant la détermination de l'AdP dans le complexe central reste inconnu chez les grillons ou les fourmis du désert *Cataglyphis*. Nous avons donc choisi d'utiliser un *Winner-Take-All* (WTA) car il s'agit d'un modèle biologiquement plausible et qu'elle représente une solution calculatoire parcimonieuse. L'AdP $\psi \in [0^\circ; 180^\circ[$ peut alors être calculé en tenant compte de tous les extrema de la fonction P . Ci-dessous, nous démontrerons la formule donnant la valeur de l'AdP $\psi \in [0^\circ; 180^\circ[$ à partir de la fonction P :

$$\psi = \frac{1}{4} \left(\Delta\psi \cdot \left(\arg \min_{i \in \llbracket 1..N/2 \rrbracket} P_i + \arg \min_{i \in \llbracket N/2+1..N \rrbracket} P_i + \arg \max_{i \in \llbracket 1..N/2 \rrbracket} P_i + \arg \max_{i \in \llbracket N/2+1..N \rrbracket} P_i \right) - 180^\circ \right) \quad (5)$$

La valeur de l'AdP est déterminée dans l'intervalle $[0^\circ; 180^\circ[$, conformément à l'ambiguïté due à la symétrie du motif de polarisation autour du méridien solaire. La résolution angulaire du capteur $\Delta\psi$ est telle que $\forall i \in \llbracket 1..N \rrbracket, \Delta\psi = \psi_{i+1} - \psi_i = 360^\circ/N$ où $N = 374$, soit $\Delta\psi = 0,96^\circ$.

La détermination du cap à l'aide du compas céleste en bande UV a permis d'aboutir à une précision médiane inférieure à la résolution angulaire du capteur de $0,96^\circ$ [78], et ce quelles que soient les conditions météorologiques testées (ciel dégagé à totalement couvert, indice UV compris entre 1 et 8).

5.4 Comment mesurer le cap de manière absolue ?

De par la symétrie du motif de polarisation de la lumière du ciel le long du méridien solaire, la connaissance de l'AdP est assurée sur un intervalle restreint d'amplitude 180° . Afin d'assurer l'exploitation du cap céleste pour des applications de navigation autonome, il est impératif de permettre la levée de l'ambiguïté angulaire. Dimitrios Lambrinos et *al.* [54, 16] ont exploité la position du soleil afin de lever l'indétermination sur l'angle de cap à l'aide de 8 photodiodes placées de façon à segmenter la voûte céleste en 8 régions angulaires égales. En recourant au même principe, nous proposons de mettre

à profit l'axe de roulis de la tête du robot (Hexabot ou AntBot) pour mesurer le niveau d'UV diffusés par l'atmosphère à gauche et à droite du robot (Fig. 13).

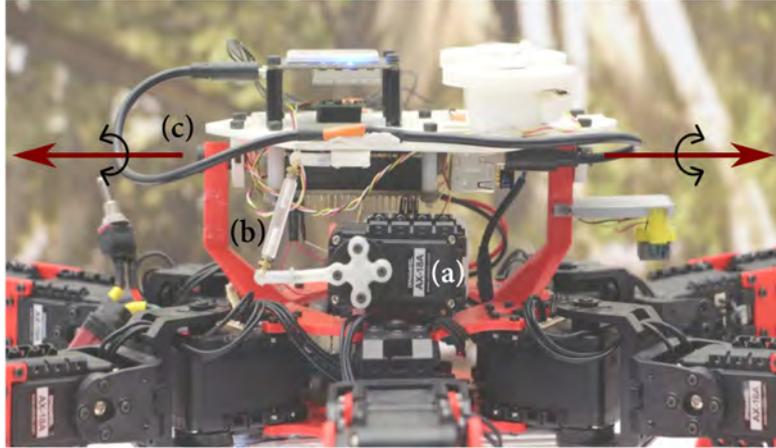


FIGURE 13 : Actionnement de la tête du robot AntBot selon son axe de roulis (c). (a) Servomoteur AX18 pour l'articulation de la bielle (b). le plateau central du robot hexapode a dû être ajusté afin de permettre d'intégrer le 19^{ème} servomoteur pour actionner la tête en roulis avec un débattement angulaire en roulis de $\pm 20^\circ$.

Lors de l'initialisation du robot, celui-ci est orienté de manière à être aligné selon le méridien solaire. On mesure alors l'orientation Ψ_{init} du robot, laquelle permet de marquer la séparation entre la gauche et la droite du robot (Fig. 14). Ainsi, il est possible de différencier l'angle mesuré en fonction de la position du soleil (*i.e.* à la gauche ou à la droite du robot) mesurée par la rotation du compas céleste. Enfin, il est possible d'augmenter la robustesse de ce procédé en considérant l'intégration des foulées de rotation lorsque le robot navigue. Il n'y a cependant aucune preuve de l'utilisation du comptage de pas dans la levée de l'ambiguïté solaire chez les insectes navigateurs, contrairement à l'exploitation de la position du soleil.

Afin de compenser la course du soleil durant les expériences, nous avons utilisé les éphémérides relatives à la position sur la planète mais également la date et l'heure des expériences, dans le système horaire UTC+1 (CET / CEST en fonction de la période dans l'année)³.

³Ces informations sont accessibles à l'adresse suivante : https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=fr.

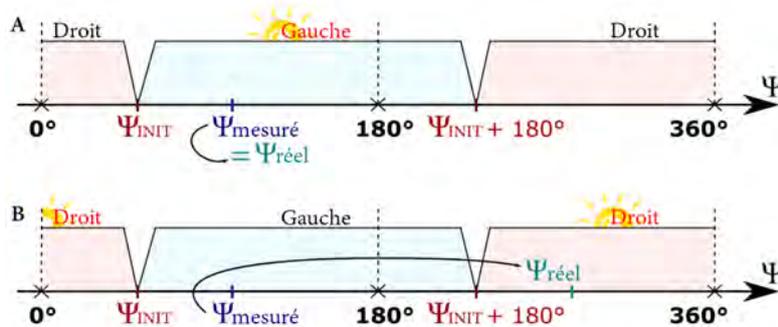


FIGURE 14 : Principe de la résolution de l'ambiguïté solaire sur la mesure du cap à partir de la position du soleil dans la voûte céleste. **A** L'angle Ψ se trouve dans le même secteur angulaire que le soleil. L'angle réel est donc égal à l'angle mesuré. **B** Ici, l'angle mesuré ne coïncide pas avec la position du soleil. L'angle réel est donc égal à l'angle mesuré auquel on ajoute 180° . D'après [20, 18, 19].

6 AntBot : un robot hexapode qui intègre son chemin comme une fourmi

6.1 La fourmi *Cataglyphis* : une navigatrice hors pair

Comme toutes les autres fourmis, le genre *Cataglyphis* appartient à l'ordre des hyménoptères, au même titre que les abeilles et les guêpes pour ne citer qu'elles. Au sein du genre *Cataglyphis*, on dénombre actuellement 110 espèces parmi lesquelles *Cataglyphis fortis*, *Cataglyphis bicolor* ou encore *Cataglyphis bombycinus* que l'on retrouve dans le désert du Sahara [79]. Les fourmis *Cataglyphis* vivent dans des milieux arides (dunes, steppe, brousse), et jusqu'à 3000 mètres d'altitude dans des conditions extrêmes de température. En raison des fortes chaleurs régnant dans leur habitat naturel, mais également de la présence de prédateurs tels que les araignées et les lézards, les fourmis *Cataglyphis* ne sortent que quelques minutes par jour afin de chercher de la nourriture pour leur colonie. Diverses stratégies de résistance à la température ont émergé au cours de leur évolution biologique. Par exemple, *Cataglyphis bombycinus* arbore une couleur argentée reflétant le rayonnement solaire. On note également que les pattes sont généralement plus longues chez *Cataglyphis*, le terme d'échasses étant régulièrement évoqué. D'autre part, la vitesse de déplacement de ces insectes est très élevée. Par exemple, la vitesse maximale observée chez *Cataglyphis fortis* est de $70 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ [80]. Une telle allure leur permet notamment de retrouver rapidement leur nid tout en

minimisant le risque d'hyperthermie.

Les fourmis *Cataglyphis fortis* sont particulièrement connues pour leur aptitude à survivre dans des conditions de température extrêmes. Malheureusement, la navigation par suivi de phéromones, particulièrement utilisée par leurs cousines européennes, est impossible dans le désert du fait de la température au sol. En effet, les phéromones déposées sur le sol par les ouvrières fourrageuses seraient instantanément détruites et ne permettrait donc plus à l'individu de retrouver son nid. Ainsi, les fourmis du désert nord africain *Cataglyphis fortis*, tout comme leurs cousines des déserts australiens *Melophorus bagoti* utilisent la vision pour se repérer et retrouver leur nid. En particulier, elles sont capables de mémoriser des scènes visuelles composées de repères saillants. Elles sont également en mesure de voir la lumière polarisée de la voûte céleste afin d'en extraire leur cap. Enfin, elles sont capables de mesurer le flux optique provenant du défilement visuel du sol lors de leur déplacement à des fins d'estimation de distance.

6.2 L'intégrateur de chemin : le fil d'Ariane de la fourmi

Les fourmis du désert peuvent parcourir plusieurs centaines de mètres depuis leur nid à travers des environnements inconnus et hostiles jusqu'à ce qu'elles trouvent un point de ravitaillement. Elles sont ensuite capables de rentrer au nid en ligne droite (Fig. 15). En moins de 25 minutes, ces fourmis sont capables des distances équivalentes à plus de 70000 fois leur taille à la vitesse moyenne de $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [10, 81]. Tout au long de leur trajet, les fourmis intègrent des informations relatives à la distance et au cap afin de maintenir à jour leur connaissance du vecteur de retour, lequel donne le plus court chemin à suivre pour rentrer au nid. On parle alors de navigation vectorielle [82] ou d'intégration de chemin [83]. Ce procédé trouve son équivalent chez l'Homme au travers de la navigation à l'estime, selon laquelle nous pistons en continu la position d'un lieu d'intérêt, une référence, afin de nous orienter relativement à celui-ci. L'insecte navigue donc selon une représentation égocentrique de sa position dans son environnement, relativement au point de départ de sa trajectoire, *i.e.* l'entrée du nid, à la manière d'un fil d'Ariane qui le relirait à chaque instant à son nid [10]. Ainsi, il apparaît peu probable que les fourmis du désert aient recours aux cartes cognitives pour naviguer dans leur environnement. En effet, si tel était le cas, elles seraient en mesure de s'orienter en direction du nid même si elles se trouvent sur un point de cette carte qu'elles n'auraient pas exploré par elles-mêmes, ce qu'elles ne font pas.

Les indices navigationnels égocentriques exploités dans le cadre de l'intégrateur de chemin sont de deux types : directionnels et odométriques.

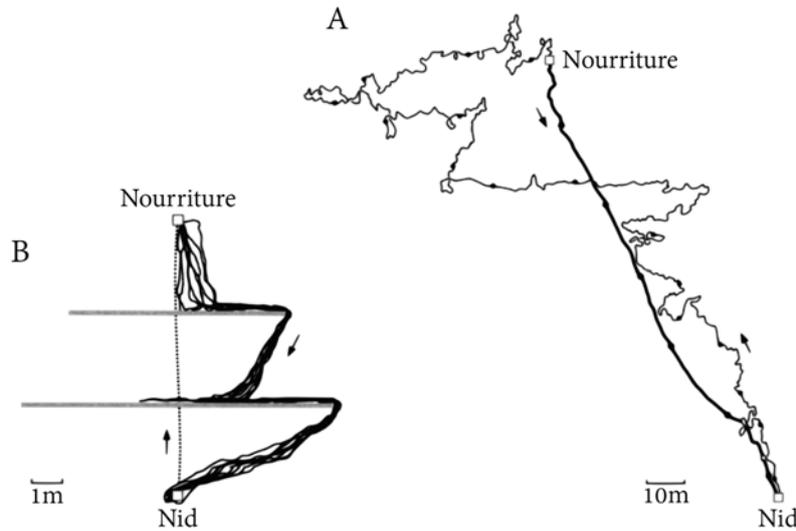


FIGURE 15 : L'intégration de chemin chez les fourmis du désert *Cataglyphis fortis*. Adapté de [81]. **A** Intégration de chemin durant une sortie de l'insecte pour trouver de la nourriture (aller : 592 m en 18,8 min ; retour : 140 m en 6,5 min). Les points noirs correspondent à des intervalles réguliers d'une minute. **B** Intégration de chemin en cas de présence d'obstacles sur le chemin de retour. Dans les deux cas, il s'agit de fourmis naviguant seules.

Les informations relatives au cap. Ils sont déterminées par la polarisation de la lumière du ciel, la position du soleil dans la voûte céleste, et par le gradient spectral céleste [81, 84, 85]. Naturellement, l'utilisation de ces indices célestes implique que l'insecte soit en mesure de corriger la variation de la position du soleil, lequel détermine également le motif de polarisation. On sait maintenant que les fourmis *Cataglyphis* [86], tout comme les abeilles [87], sont dotées d'une connaissance innée et approximative des éphémérides de leur habitat, qu'elles affinent au gré de leurs sorties du nid. Ces éphémérides permettent de connaître la variation de la position du soleil (azimut et élévation) depuis le début de l'itinéraire de l'insecte, et ainsi de compenser la dérive de cap imputable à la course du soleil. En pratique, les fourmis *Cataglyphis fortis* ne sortent pas plus de 20 à 30 minutes par expédition. Durant ce laps de temps, la dérive angulaire n'excède pas quelques degrés, la vitesse moyenne de déplacement du soleil étant de $15^\circ \cdot h^{-1}$. On sait également depuis peu qu'une hypothèse pourtant écartée il y a plusieurs décennies serait finalement probable : les fourmis *Cataglyphis* utiliseraient en effet un compas magnétique comme référence de cap lorsqu'elles naviguent [88]. Ce dernier indice ne sera pas exploité dans ce qui suit, en attendant des études

complémentaires sur la question du magnétomètre chez les hyménoptères en général, toujours non tranchée actuellement.

Les informations relatives à la distance. Aujourd’hui encore, de nombreux débats subsistent quant aux informations utilisées par l’odomètre de l’intégrateur de chemin des fourmis du désert. En effet, plusieurs hypothèses ont été avancées pour expliquer comment ces insectes mesurent leur distance parcourue lorsqu’ils naviguent. Les fourmis *Cataglyphis* (Afrique du Nord) et *Melophorus* (Australie) peuvent collecter des informations odométriques à partir de plusieurs sources : le flux optique panoramique [39, 89, 90], la ligne d’horizon panoramique [91], le flux optique ventral [92], et enfin le comptage de foulées (ou podomètre) [93, 94, 95]. Il est à présent admis que la vision panoramique peut être exclue de la stratégie de navigation par intégration de chemin, dont la principale source d’information serait le comptage de foulées. Le flux optique ventral est utilisé pour déterminer la distance parcourue [92], en revanche, son implication dans l’intégrateur de chemin a dû faire face à de nombreuses mises en défaut pour finalement être abandonnée au profit du podomètre. Toutefois, Sarah Pfeffer et Matthias Wittlinger ont montré que des fourmis *Cataglyphis* rendues aveugles au flux optique ventral étaient incapables de rentrer au nid après avoir été transportées par une de leurs congénères, tandis que les individus non aveugles étaient capables de rejoindre leur nid [96]. Ces travaux démontrent que les fourmis du désert sont capables d’intégrer le flux optique ventral à des fins odométriques au travers de l’intégrateur de chemin. Le critère de confiance et les modalités de fusions des informations proprioceptives (foulées) et exteroceptives (flux optique) restent néanmoins à déterminer.

6.3 Odométrie visuelle par flux optique

Le flux optique correspond aux variations de la structure de la lumière dans une image (rétine ou caméra), provoquées par le déplacement relatif entre l’observateur et la scène [97, 12, 98, 99, 100]. Il mesure donc le déplacement des amers visuels dans la scène et peut être utilisé pour mesurer des distances parcourues, estimer des distances de profondeur, éviter des obstacles, ou suivre des entités mobiles [101, 102, 103, 104].

Le capteur M²APix est le capteur de flux optique bio-inspiré de dernière génération développée au sein de l’équipe Bioroborique [105, 106, 107, 104]. Il est composé de deux lignes de six pixels hexagonaux (Fig. 17A-C) [105, 107]. Ceux-ci sont auto-adaptatifs aux changements de luminosité ambiante grâce à la loi de Michaelis-Menten qu’ils implémentent. La rétine, qui mesure $2\text{ mm} \times$

2 mm, est un circuit CMOS intégré sur une puce LCC24 de 9 mm × 9 mm et dotée de 24 broches (Fig. 17A). La fréquence d'échantillonnage pouvant aller de 100 Hz à 1 kHz, cette dernière a été fixée à 333 Hz pour toutes les expériences avec le robot AntBot. La réponse de chaque photorécepteur, notée V , est donnée par l'équation de Michaelis-Menten [108] :

$$V = V_m \cdot \frac{I^n}{I^n + \sigma^n} \quad (6)$$

V_m est la réponse maximale du photorécepteur, I est l'intensité de la luminosité ambiante, σ est égal à l'intensité lumineuse de mi-saturation du pixel, et n est une puissance arbitraire variant de 0,7 à 1 ($n = 1$ pour le capteur M²APix [105]). Cette équation décrit le phénomène d'adaptation aux changement de luminosité ambiante, initialement observée et modélisée par Naka et Rushton alors qu'ils étudiaient la réponse des cônes dans les yeux des cyprinidés (poissons d'eau douce) [109]. La figure 16 montre la réponse de la fonction Michaelis-Menten $x/(x + x_0)$ en fonction de la constante x_0 de manière à illustrer le rôle de la constante d'adaptation x_0 . On peut voir que lorsque x_0 est faible (ce qui signifie un éclairage ambiant faible) la pente de la courbe et donc le gain est grand pour des faible valeurs du signal d'entrée x tandis que pour un x_0 grand (éclairage ambiant fort) la pente est plus faible, ce qui a du sens pour amplifier de fortes valeurs de x et éviter ainsi la saturation. Il y a donc bien une auto-adaptation de manière à maintenir une sensibilité (gain) constante sur une grande gamme de luminosité ambiante.

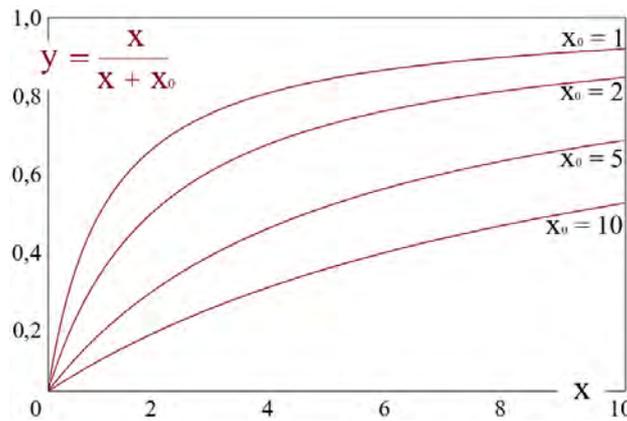


FIGURE 16 : Illustration de la réponse de la fonction Michaelis-Menten.

La constante de temps d'adaptation des pixels, égale à 0,5 s, est fixée par un condensateur externe (47 nF) [105]. Le capteur M²APix pourrait mesurer un flux optique bidimensionnel, mais nous n'en ferons qu'une utilisation

unidimensionnelle dans la direction des deux lignes de pixels, laquelle sera orientée parallèlement à la direction d'avance du robot AntBot.

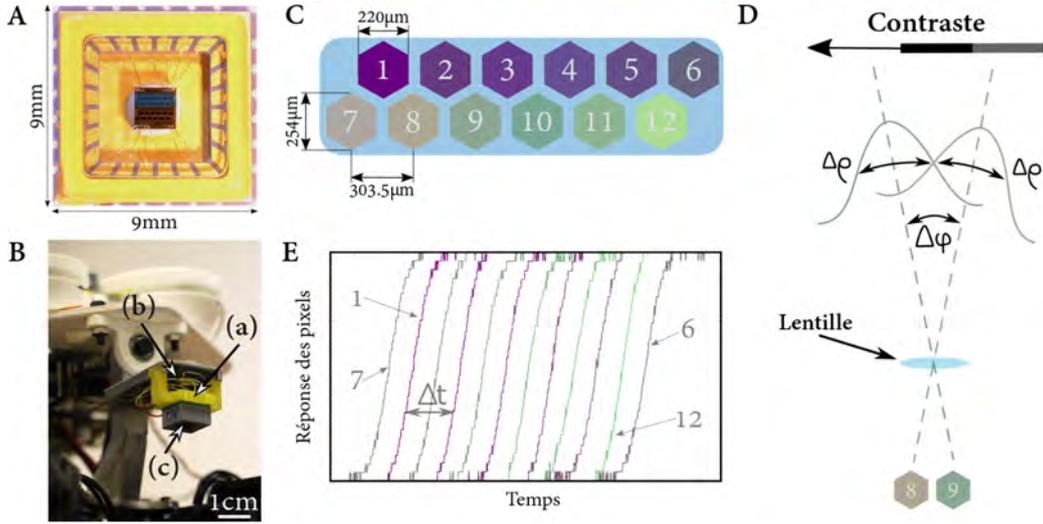


FIGURE 17 : Le capteur de flux optique M²APix. **A** La rétine M²APix. Adapté de [105]. **B** Photographie du capteur M²APix embarqué sur l'avant de la tête du robot AntBot. La rétine (a) est connectée à un microcontrôleur Teensy 3.2 (b), et surmontée d'une lentille défocusée (c) formant un angle interpixel $\Delta\varphi$ en moyenne égal à 3.57° [110]. **C** Vue schématique des 12 pixels hexagonaux de Michaelis-Menten. **D** Schéma de principe montrant la détection d'un contraste par deux pixels adjacents. Les axes optiques sont en pointillés. L'angle interpixel $\Delta\varphi$ ainsi que l'angle d'acceptance $\Delta\rho$ sont représentés. Redessiné à partir de [107]. **E** Exemple de signaux bruts générés pour chaque pixel au passage d'un contraste noir/blanc. Le code couleur reprend celui de la sous-figure C. Δt correspond au temps séparant la détection d'un même contraste par deux pixels adjacents. D'après [18].

Le flux optique translationnel ω (en rad/s), dans le cas où l'axe optique de l'imageur est orthogonal à la direction du mouvement observé, est défini comme suit :

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta T} \quad (7)$$

$\Delta\varphi$ est l'angle interpixel entre deux pixels adjacents sur une même ligne, et ΔT est le délai temporel séparant la détection d'un même contraste par deux pixels adjacents (Fig. 17D,E). Calculer le flux optique ω revient donc à déterminer ce délai ΔT . Deux algorithmes ont été testés pour calculer le flux

optique : soit un algorithme de seuillage, soit un algorithme de corrélation croisée, pour le calcul du délai ΔT [107, 111]. Pour ces performances, c'est l'algorithme de corrélation croisée qui a été employé à bord du robot AntBot.

Chaque paire de pixels adjacents dans une même ligne du M²APix a été utilisée pour calculer une valeur locale de flux optique ω . Au total, le capteur M²APix fournit 10 mesures locales de flux optique, dont la valeur de sortie effective est sélectionnée au moyen d'un filtre médian. En connaissant la hauteur au sol d du capteur M²APix, on peut ainsi déterminer la vitesse \mathcal{V} d'avance du robot :

$$\mathcal{V} = d \cdot \omega \quad (8)$$

Enfin, on détermine la distance parcourue par le robot en utilisant le temps de marche t obtenu par seuillage sur l'enregistrement du flux optique durant une séquence de marche. Ainsi, la distance parcourue D est donnée par la relation :

$$D = \mathcal{V} \cdot t \quad (9)$$

6.4 L'algorithme de navigation d'AntBot

Soit Ψ l'orientation du robot par rapport à l'axe (O, \vec{x}) (Fig. 18), Ψ_{ciel} son orientation par rapport à l'azimut solaire obtenu avec le compas céleste, et Ψ_{init} l'orientation initiale du robot donnée par le compas céleste. Tous les angles sont donnés en degrés. L'origine du repère de l'expérience O est prise comme étant la position du robot à l'initialisation. On appelle segment de navigation la procédure ainsi décrite :

- le robot tourne d'un nombre de foulées $N_{rot,i}$;
- il avance en ligne droite d'un nombre de foulées $N_{marche,i}$;
- le robot s'arrête et détermine la distance parcourue D_i et son orientation Ψ_i afin d'en déduire sa position $C_i = (x_i, y_i)$ dans le plan (O, \vec{x}, \vec{y}) .

Cette procédure est répétée N_{seg} fois, soit le nombre de segments de ligne droite que la trajectoire aller contient (Fig. 18). On distingue deux catégories de segments : ceux appartenant au trajet aller, fixe et imposé au robot, et ceux appartenant au trajet retour, calculés par le robot en fonction de l'intégrateur de chemin utilisé (voir paragraphe 6.5).

Durant la phase d'initialisation, le robot est placé sur le sol de façon à ce que son axe longitudinal soit aligné avec l'axe $(O; \vec{y})$ du repère d'étude.

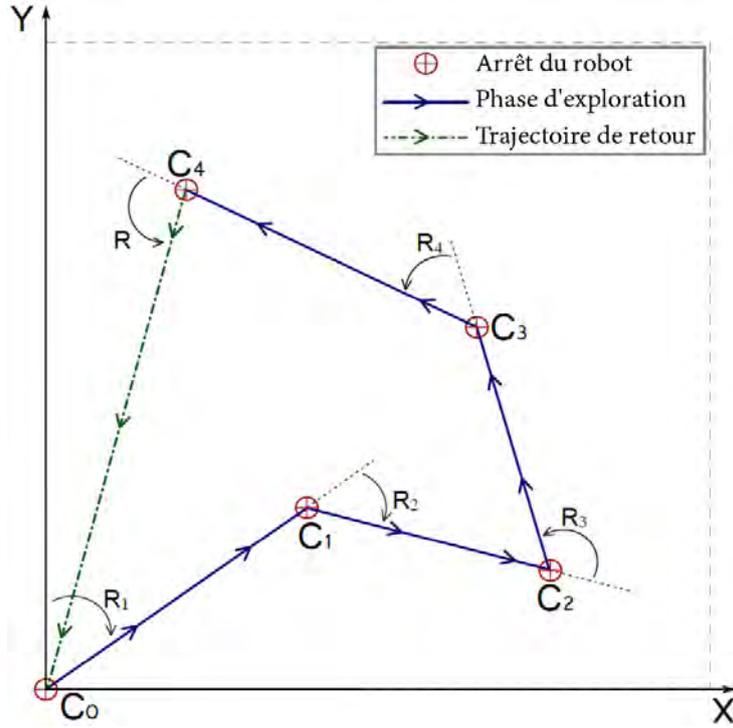


FIGURE 18 : Graphe de principe de l'intégrateur de chemin pour un trajet aller incluant $N_{seg} = 4$ segments de lignes droites. Les angles R_i correspondent aux ordres de rotation du robot, et R est la consigne de retour à la base. D'après [18].

L'orientation Ψ_i du robot à l'issue du segment $i \in [1..N_{seg}]$ est donnée par la relation :

$$\Psi_i = \Psi_{ciel,i} - \Psi_{init} \quad (10)$$

Connaissant la distance D_i parcourue depuis la dernière position connue C_{i-1} , la nouvelle position C_i du robot est déterminée comme suit :

$$\begin{cases} x_i = x_{i-1} + D_i \cdot \cos(\Psi_i) \\ y_i = y_{i-1} + D_i \cdot \sin(\Psi_i) \end{cases} \quad (11)$$

A l'issue de cette première phase d'exploration, le robot détermine son vecteur de retour à la base, *i.e.* la distance D_R de retour :

$$D_R = \sqrt{x_{N_{seg}}^2 + y_{N_{seg}}^2} \quad (12)$$

et la direction Ψ_R de retour :

$$\Psi_R = \begin{cases} \operatorname{atan}\left(\frac{y_{N_{seg}}}{x_{N_{seg}}}\right) & \text{si } x_{N_{seg}} < 0 \\ 180^\circ + \operatorname{atan}\left(\frac{y_{N_{seg}}}{x_{N_{seg}}}\right) & \text{si } x_{N_{seg}} > 0 \end{cases} \quad (13)$$

La trajectoire de retour est alors décomposée en N_R segments homogènes. Pour chaque nouvelle position du robot C_i , $i \in [N_{seg} + 1..N_{seg} + N_R]$, l'orientation Ψ_i et la distance parcourue entre chaque position D_i sont utilisés pour mettre à jour la position du robot (Eq. 11), puis réévaluer la trajectoire de retour optimale (Eqs. 12 et 13).

6.5 Les modèles d'intégration de chemin

En prenant pour entrée les informations de cap et de distance, 5 modèles différents d'intégration de chemin ont été développés. Le cap pourra être déterminé d'après le comptage de foulées et le compas céleste, tandis que la distance parcourue sera obtenue par le comptage de foulées et le capteur de flux optique M²APix. Ces 5 modèles visent à recréer l'intégrateur de chemin supposé exister chez les fourmis du désert *Cataglyphis* d'une part, tout en permettant une analyse à la fois quantitative et qualitative de l'apport de l'une ou l'autre modalité sensorielle en termes de performance de navigation. Ces modèles sont également l'occasion de voir si, d'un point de vue purement robotique, il est possible de naviguer de manière fiable et robuste avec peu d'indices et peu de ressources calculatoires.

Le modèle *Path Integration based on SStride* (Intégrateur de chemin basée sur la foulée) (PI-ST). Le premier modèle de navigation, dit *aveugle*, ne requiert aucune information visuelle (PI : intégrateur de chemin ; ST : *stride*, ou foulée). Cet intégrateur de chemin estime la distance parcourue et le cap suivi uniquement à partir du comptage de foulées, respectivement en ligne droite et en rotation. Le comptage de foulées s'opère simplement par une copie de la commande motrice envoyée au contrôleur du robot. En conséquence :

$$D_i = N_{marche,i} \cdot d_{marche} \quad (14)$$

$$\Psi_i = N_{rot,i} \cdot \Delta\Psi_{rot} \quad (15)$$

où D_i est la distance parcourue estimée à partir de $d_{marche} = 8,2 \text{ cm}$ la distance parcourue par foulée, et $N_{marche,i}$ le nombre de foulées exécutées, et Ψ_i est le cap du robot déterminé à partir du nombre $N_{rot,i}$ de foulées de rotation

exécutées et la rotation moyenne par foulée $\Delta\Psi_{rot} = 10,9^\circ$.

Le modèle *Path Integration based on Optic Flow and SStride* (Intégrateur de chemin basée sur le flux optique et la foulée) (PI-OF-ST). Le modèle de navigation PI-OF-ST estime toujours l'orientation du robot sur la base du comptage de foulées (ST) en rotation. En revanche, les données odométriques sont calculées avec le flux optique ventral (OF), mesuré au moyen du capteur M²APix. En conséquence :

$$D_i = \frac{d \cdot \Delta\varphi \cdot t}{\Delta t_i} \quad (16)$$

$$\Psi_i = N_{rot,i} \cdot \Delta\Psi_{rot} \quad (17)$$

où d est la distance séparant le capteur M²APix et le sol, $\Delta\varphi = 3.57^\circ$ est l'angle interpixel, t est le temps de marche de C_{i-1} à C_i (en secondes), et Δt_i est le délai mesuré à l'aide de la méthode de corrélation croisée.

Le modèle *Path Integration based on information FUSED between SStride and optic flow* (Intégrateur de chemin basée sur une fusion d'information entre la foulée et le flux optique) (PI-ST-Fuse). Il détermine la distance parcourue par fusion entre les données de flux optique ventral d'une part, et celles du comptage de foulées en ligne droite d'autre part. L'orientation est quant à elle toujours obtenue par intégration des foulées en rotation. En conséquence :

$$D_i = \frac{1}{2} \left(N_{marche,i} \cdot d_{marche} + \beta \cdot \frac{d \cdot \Delta\varphi \cdot t}{\Delta t_i} \right) \quad (18)$$

$$\Psi_i = N_{rot,i} \cdot \Delta\Psi_{rot} \quad (19)$$

où β est une constante empirique fixée à l'avance. Les servomoteurs Dynamixel AX18A utilisés par le robot AntBot (Fig. 1) montrent des comportements dynamiques variables en fonction de la température ambiante. Ainsi, la distance moyenne estimée peut varier selon que les expériences sont menées le matin (jusqu'à $-2^\circ C$) ou l'après-midi (souvent au-dessus de $12^\circ C$). De plus, la première et la dernière foulée tendent à générer des valeurs de flux optiques élevées du fait du passage d'une vitesse nulle à une vitesse maximale, et réciproquement (Fig. 19). Ainsi, plus le nombre de foulées sera petit, plus ces sursauts de flux optique auront une incidence néfaste sur l'estimation de la distance parcourue. La constante β a donc pour objectif d'atténuer ces différents artefacts (Tab. 2).

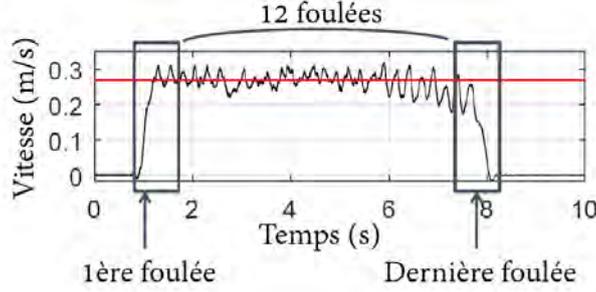


FIGURE 19 : Vitesse d’avance en ligne droite du robot AntBot mesurée à l’aide du système de capture du mouvement de notre institut. La vitesse instantanée est donnée en noir ; la vitesse moyenne est donnée en rouge. La première et la dernière foulée génèrent des profils de vitesses pouvant conduire à des estimations erronées de la vitesse moyenne du robot. La vitesse moyenne du profil est utilisée pour estimer la distance parcourue.

Nombre de foulées	β_M	β_A
1 ou 2	0.667	0.500
3	0.850	0.750
plus de 3	0.980	0.980

TABLE 2 : Constante β utilisée pour l’odométrie. β_M : valeurs retenues pour le matin ; β_A : valeurs retenues pour l’après-midi.

Le modèle *Path Integration based on POLarisation and STRide* (Intégrateur de chemin basée sur la polarisation et la foulée) (PI-POL-ST). Le modèle de navigation PI-POL-ST nécessite un déploiement du robot en extérieur. Il estime la direction suivie par le robot sur la base du compas céleste (POL) embarqué sur sa tête, dont l’ambiguïté angulaire est résolue par localisation du soleil dans la voûte céleste, mais également d’après le nombre de foulées en rotation effectuées. L’intégration des foulées (ST) en ligne droite permet la mesure de la distance parcourue. En conséquence :

$$D_i = N_{marche,i} \cdot d_{marche} \quad (20)$$

$$\Psi_i = \frac{1}{4} \left(\Delta\psi \cdot \left(\arg \min_{i \in [1..N/2]} P_i + \arg \min_{i \in [N/2+1..N]} P_i + \arg \max_{i \in [1..N/2]} P_i + \arg \max_{i \in [N/2+1..N]} P_i \right) - 180^\circ \right) \quad (21)$$

L’angle est ensuite désambiguïté à l’aide du nombre de foulées en rotation exécutées ainsi que de la rotation du capteur (en roulis) pour déterminer de

quel côté du robot se situe le soleil.

Le modèle de la fourmi *Path Integration Full* (intégrateur de chemin complet) (PI-Full). Le modèle de navigation PI-Full est celui qui se rapproche plus de notre connaissance actuelle de l'intégrateur de chemin des fourmis *Cataglyphis*. En particulier, les données de l'intégrateur de foulées sont mises à contribution pour la détermination de la distance parcourue, de même que le flux optique ventral mesuré à l'aide du M²APix. Le cap est déterminé par le compas céleste désambiguïté à l'aide de la position du soleil et du nombre de foulées en rotations. En conséquence :

$$D_i = \frac{1}{2} \left(N_{marche,i} \cdot d_{marche} + \beta \cdot \frac{d \cdot \Delta\varphi \cdot t}{\Delta t_i} \right) \quad (22)$$

$$\Psi_i = \frac{1}{4} \left(\Delta\psi \cdot \left(\arg \min_{i \in [1..N/2]} P_i + \arg \min_{i \in [N/2+1..N]} P_i + \arg \max_{i \in [1..N/2]} P_i + \arg \max_{i \in [N/2+1..N]} P_i \right) - 180^\circ \right) \quad (23)$$

6.6 Le Robot AntBot en action

Les expériences ont été réalisées devant les locaux de l'ISM à Marseille (43°14'02,1"N, 5°26'37,4"E) et dans l'arène de vol de la Méditerranée du 5 janvier au 16 février 2018. Bien que le lieu soit entouré de collines (Parc National des Calanques), le soleil était visible tout au long de la journée. Les conditions météorologiques étaient stables, avec un temps clair et des vents modérés (source : Météo France). Selon l'Agence Spatiale Européenne, l'indice UV se situait autour de 1,0 en janvier (variabilité inférieure à 20%), pour finalement atteindre 1,6 à la mi-février. Les modes de navigation ne nécessitant pas l'utilisation du compas céleste ont été testés en intérieur au moyen d'un système de capture du mouvement.

Lors de ces expériences, AntBot effectuait d'abord un trajet aller constitué de N_{seg} segments en ligne droite et durant lesquels il intégrait son déplacement selon le mode de navigation choisi (Fig. 18). A l'issue de cette trajectoire aller (ou phase d'exploration), l'itinéraire de retour en ligne droite est calculé puis subdivisé en $N_R = 8$ segments. Trois groupes d'expériences ont été menés :

- Groupe A : chaque mode est testé au travers d'une trajectoire aléatoire répétée 20 fois. Cette trajectoire inclut donc $N_{seg} = 5$ arrêts durant la phase d'exploration pour une distance totale théorique de 5 m , et

$N_R = 8$ arrêts durant le trajet de retour pour une distance moyenne théorique de $2 m$.

- Groupe B : chaque mode est testé au travers de 5 trajectoires d'exploration aléatoires aux formes et distances très variables, allant notamment de $4,7 m$ à $10,2 m$.
- Groupe C : chaque mode est testé au travers d'une grande trajectoire aléatoire de $14 m$ (aller-retour), incluant $N_{seg} = 10$ segments d'exploration régulièrement espacés d'un mètre.

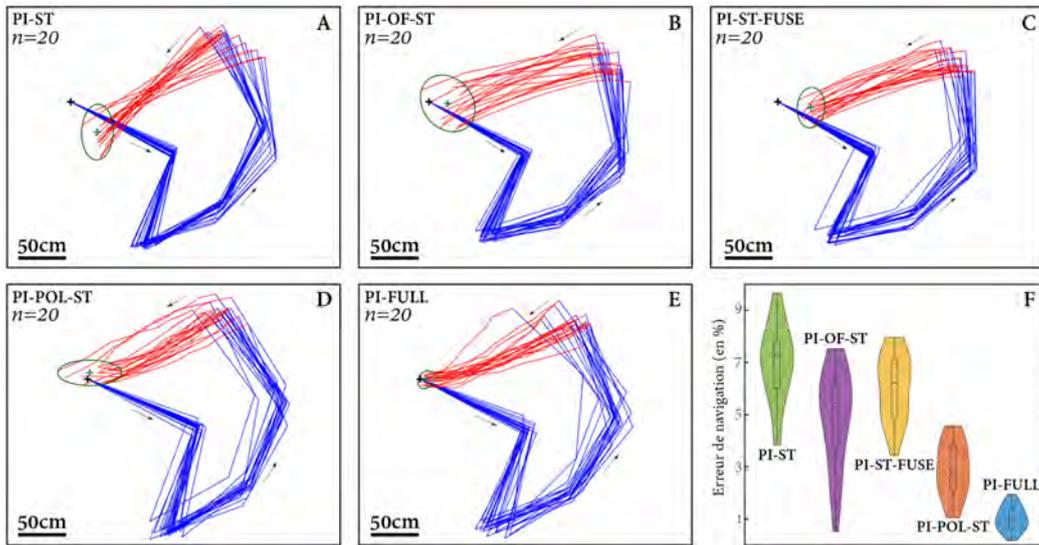


FIGURE 20 : Trajectoires de navigation du Groupe A. **A-E** Les phases d'exploration sont tracées en bleu tandis que les trajets de retour sont tracés en rouge. Pour chaque mode testé, on compte $n = 20$ trajectoires. Les croix noires représentent la position de départ ; les croix vertes symbolisent la moyenne des positions d'arrivée. Les ellipses de confiance à 95% sont également tracées pour chaque mode. **F** Diagrammes "en violons" donnant la répartition statistique des erreurs de navigation (en % de la distance totale parcourue) pour chaque mode de navigation. D'après [18].

Groupe A. Les résultats sont présentés en figure 20. L'erreur médiane maximale a été obtenue avec le mode aveugle PI-ST (7,29% de la distance totale parcourue, lequel présente une haute variabilité des positions finales du robot. Le mode PI-Full en revanche a permis d'atteindre une erreur minimale

évaluée à 0,97% de la distance totale soit une erreur moyenne de 6,7 *cm* (inférieure à une distance de foulée), avec un record atteint pour une trajectoire ayant conduit à une erreur de navigation de seulement 0,17% (ou 1,2 *cm*). Certaines expériences réalisées en extérieur (modes PI-POL-ST et PI-Full) ont été menées alors que le ciel était variable, sans que cela n'ait altéré les résultats. La variabilité maximale a été obtenue avec le mode PI-OF-ST, dont l'aire l'ellipse de confiance à 95% des positions finales est maximale, atteignant 2638 *cm*². Cependant, les performances du mode PI-OF-ST sont nuancées par l'erreur de navigation obtenue, minimale au sein de tous les modes aveugles à la polarisation de la lumière du ciel. En outre, le mode PI-OF-ST se démarque par son taux de succès à 25%, clairement imputable à l'utilisation du flux optique. On remarque alors que l'ajout du flux optique (modes PI-OF-ST et PI-ST-Fuse) permet d'obtenir des trajectoires de retour davantage groupées et orientées vers la cible. Dans l'ensemble, les modes de navigation n'utilisant pas le compas céleste ont donné des résultats insatisfaisants, considérant que moins de 25% des 60 expériences concernées ont été un succès. L'exploitation du motif de polarisation céleste dans le mode PI-POL-ST augmente considérablement les chances de succès de navigation (erreur moyenne de navigation : 2,77%). En comparaison avec le mode aveugle, le mode PI-POL-ST montre la capacité du robot à s'orienter avec précision vers sa cible, comme le montre l'orientation du grand axe de l'ellipse de confiance dont l'aire est de 1409 *cm*². Le fait que cette ellipse soit centrée autour de la cible montre que la modalité sensorielle à l'origine de la variabilité observée est celle de l'odométrie. En effet, la dynamique en conditions réelles des servomoteurs étant variable, les distances parcourues pour chaque foulée sont également variables. On aboutit dès lors tantôt à une surestimation de la distance, tantôt à une sous-estimation, mais l'erreur reste en moyenne de 19 *cm* pour un taux de succès de 60%. Cette tendance se confirme avec le mode PI-Full pour lequel l'ellipse de confiance est minimale (236 *cm*², soit 10% de l'aire maximale obtenue), avec une structure proche de celle d'un cercle.

Groupe B. Au travers de ce deuxième ensemble d'expériences, on s'intéresse aux performances de chaque mode selon la structure de la trajectoire aller. Les résultats sont présentés en figure 21. Le mode aveugle PI-ST a donné une erreur moyenne de navigation égale à 9,37% de la distance totale parcourue, soit une augmentation de 2 points par rapport aux précédents résultats. Contrairement aux performances observées dans le groupe A, le maximum d'erreur de navigation a été obtenu avec le mode PI-OF-ST : 11,8% contre seulement 5,30% avec la trajectoire du groupe A. En considérant les résultats des modes PI-ST et PI-OF-ST, on peut suggérer que l'estimation de la

distance par le flux optique n'est pas robuste quant à la forme de la trajectoire parcourue. La tendance concernant le mode PI-ST-Fuse est la même que pour le mode PI-ST, avec une augmentation de 2 points de l'erreur, passant ainsi de 6,22% à 8,9%. Ce résultat confirme par ailleurs que l'odométrie par comptage de foulées tend à augmenter la robustesse de l'estimation des distances parcourues. Une fois de plus, on observe que l'ajout du compas céleste augmente considérablement les performances de navigation, avec une erreur moyenne s'élevant à 2,99% (écart-type : 0,13%), ce qui correspond aux résultats du groupe A. Enfin, le modèle de la fourmi PI-Full permet d'obtenir une erreur moyenne de navigation de 0,65% de la trajectoire totale, soit en moyenne de $5,3 \text{ cm} \pm 2,3 \text{ cm}$ seulement. Ainsi, l'utilisation du compas céleste dans le cadre de la navigation montre une grande robustesse des performances à l'égard de la forme de la trajectoire suivie.

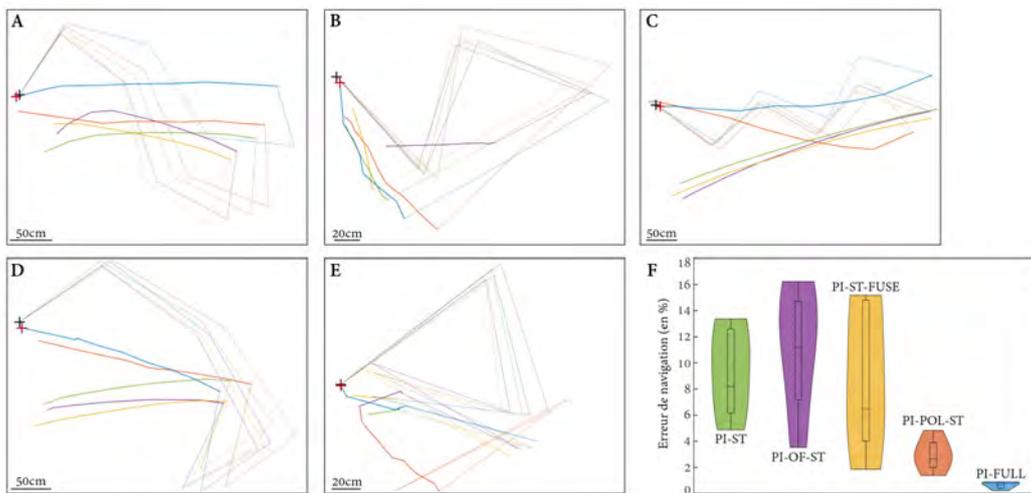


FIGURE 21 : Trajectoires de navigation pour des itinéraires aléatoires (Groupe B). **A-E** Les trajectoires aller sont représentées par un trait fin, celles de retour par un trait épais. **F** Diagrammes "en violons" des erreurs de navigation (en % de la distance totale parcourue) pour chaque mode de navigation. Le code couleur des représentations graphiques **A-E** est indiqué par ces diagrammes. D'après [18].

Groupe C. L'idée ici est de confronter les différents modes de navigation à une trajectoire plus grande. Compte tenu des difficultés de procéder à des expérimentations avec AntBot, particulièrement l'usure et échauffement des servomoteurs ainsi que les conditions hivernales souvent compliquées du fait

du vent et des températures parfois négatives, une seule trajectoire a été testée avec chaque mode. Bien que ne permettant pas de statuer statistiquement sur la robustesse ou non de chaque mode de navigation vis-à-vis de la distance parcourue, ces premiers résultats permettent a minima d’apprécier une tendance exploitable pour notre analyse. Les résultats sont montrés sur la figure 22. L’erreur de navigation maximale de 13,44% a été enregistrée pour le mode PI-ST, correspondant à une distance de 1,71 m pour une trajectoire totale de 12,7 m. Le mode PI-Full a permis d’atteindre une erreur minimale de 6,47 cm soit 0,47% de la distance totale parcourue (13,77 m). Il semble clair que les méthodes utilisant seulement le comptage de pas (PI-ST et PI-POL-ST) pour l’odométrie montrent une défaillance en robustesse pour de grandes distances parcourues. Cela s’explique par le caractère accumulatif des erreurs d’estimation. Enfin, le test de Student permet de montrer que les résultats ainsi obtenus ne sont pas statistiquement différents de ceux obtenus précédemment ($p > \alpha_C$ où $\alpha_C = 0,05/5$ en appliquant une correction de Bonferroni). Les données de la vérité terrain ont été comparées avec la localisation du robot donnée par l’intégrateur de chemin. En particulier, le mode PI-Full donne une erreur au sens des moindres carrés de seulement 4,6 cm entre l’estimation du système de navigation et la vérité terrain. Cette erreur atteint un maximum de 65,0 cm avec le mode PI-ST. L’ensemble des performances de navigation ainsi décrites sont rassemblées dans le tableau 3. Le minimum d’erreur de navigation a donc systématiquement été obtenu avec le mode PI-Full, mimant l’intégrateur de chemin des fourmis du désert, avec une erreur moyenne de $0,67\% \pm 0,27\%$ de la distance totale parcourue, soit une erreur moyenne en distance de $6,67 \text{ cm} \pm 2,7 \text{ cm}$. Cette erreur est inférieure à la résolution en foulée du robot qui, rappelons-le, est de 8,2 cm. La distance ne semble pas altérer les performances de ce mode de navigation. En effet, l’erreur de positionnement était de 6,47 cm après une trajectoire de 14 m de long, laquelle ne diffère que de 3% par rapport à la moyenne globale sur les 26 expériences.

La distance à l’objectif : un critère de réussite. Le critère de succès utilisé dans le cadre de ces expériences était le suivant : si le centre de masse du robot se trouvait à moins de la moitié de sa propre envergure $L = 45 \text{ cm}$ de sa cible, alors la navigation était un succès. La figure 23 donne le taux de succès de navigation en fonction du critère retenu parmi les critères suivants : L , $L/2$, $L/4$, $L/8$ et $L/16$. A l’exception des modes utilisant la polarisation (PI-POL-ST et PI-Full), aucun mode de navigation n’a permis d’atteindre un taux de succès supérieur à 90% tous critères confondus. Le mode PI-POL-ST a donné un taux de succès égal à 97% avec le critère le plus flexible (L), mais ce taux chute rapidement à 60% avec le critère de $L/2$. Avec le mode PI-Full, le taux de succès se maintient à 100% pour les critères les plus favorables (L et

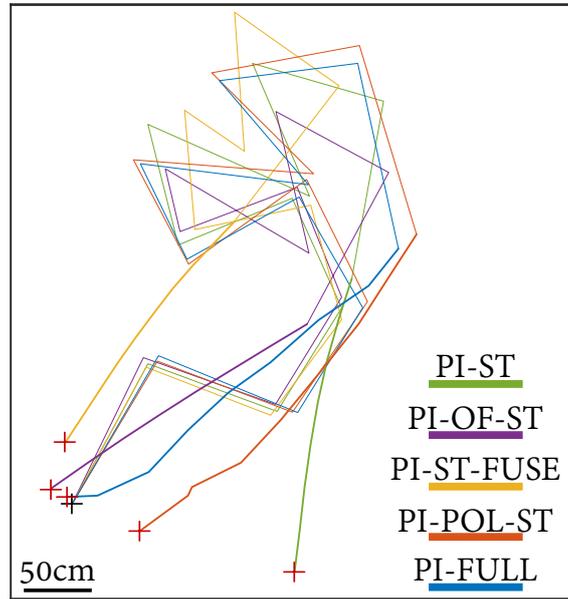


FIGURE 22 : Résultats de navigation du Groupe C. La position initiale est marquée d’une croix noire, tandis que les positions finales pour chaque mode de navigation sont données par les croix rouges. Le trajet aller est tracé en traits fins, celle de retour en traits épais. D’après [18].

$L/2$) et diminue progressivement ensuite. A $L/4 = 11,3 \text{ cm}$, seul le mode PI-Full permet d’aboutir à plus de 90% de succès de navigation, tous les autres étant largement en retrait. D’un point de vue purement navigationnel, de telles performances à $L/4$ sont tout à fait acceptables et concurrencent déjà les principales stratégies de navigation existantes, à plus forte raison si l’on tient compte du très faible nombre de pixels embarqués et du faible coût en traitement de l’information.

7 Conclusions sur le robot AntBot

7.1 Navigation autonome

Dans le but de déterminer un cap, un capteur parcimonieux a été conçu pour mesurer la polarisation de la lumière du ciel au zénith de la voûte céleste avec seulement deux pixels sensibles aux UV et des besoins en ressources calculatoires très faibles. La combinaison de ces deux photodiodes surmontées de filtres polarisants linéaires rotatifs permet de bénéficier d’un capteur aux propriétés comparables à l’œil composé de l’insecte tout en réduisant considé-

Mode	Groupe A	Groupe B					Groupe C	m	s
PI-ST	7,29%	9,57%	6,81%	13,37%	12,21%	4,87%	13,44%	9,65%	3,45%
PI-OF-ST	5,30%	8,99%	13,94%	16,23%	13,32%	3,53%	1,55%	8,98%	5,69%
PI-ST-Fuse	6,22%	7,77%	5,10%	15,18%	14,61%	1,85%	4,05%	7,83%	5,17%
PI-POL-ST	2,77%	2,31%	4,83%	1,38%	3,45%	3,00%	3,77%	3,07%	1,10%
PI-Full	0,97%	0,51%	0,88%	0,77%	0,86%	0,22%	0,47%	0,67%	0,27%
	$n = 20$	$n = 1$	$n = 1$	$n = 1$	$n = 1$	$n = 1$	$n = 1$	$n = 26$	

TABLE 3 : Erreurs de navigation en % de la distance totale parcourue, pour chaque mode de navigation et pour l'ensemble des groupes d'expériences A, B et C (total $5 \times 26 = 130$ expériences). $m \pm s$ représente la moyenne \pm l'écart-type. D'après [18].

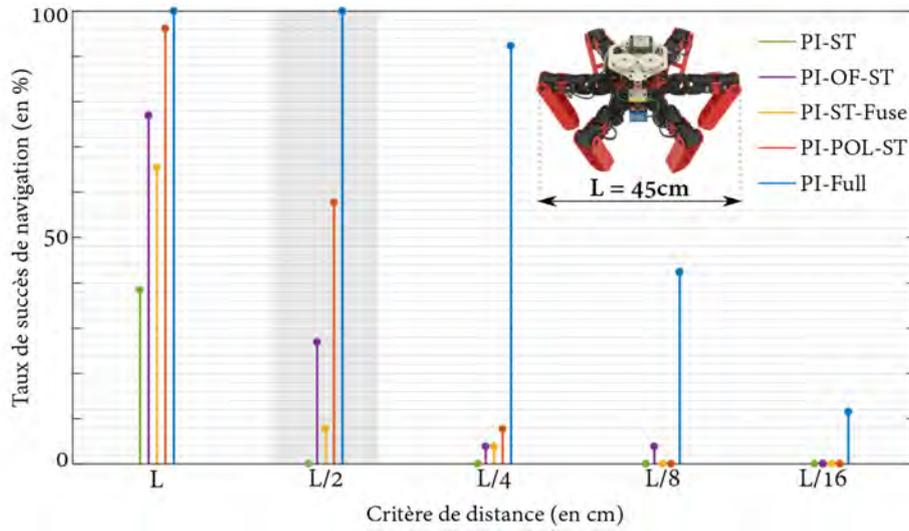


FIGURE 23 : Taux de succès de chaque mode de navigation en fonction du critère en distance retenu. D'après [18].

ablement le coût de production mais également le temps de développement. En effet, tandis que la version rotative du compas coûte environ 500€, une version fixe avec 2×374 unités de polarisation aurait pu se chiffrer autour de 78 000€. Avec seulement le traitement de 748 signaux visuels en entrée de notre compas fonctionnant en lumière polarisée UV, nous arrivons au même niveau de performance de la fourmi qui en compte environ 1 200. Au niveau temps d'acquisition, la méthode par balayage de la voûte nécessite actuellement 16 secondes, ce qui ne permet pas un ajustement en temps réel du cap comme le fait la fourmi, mais ce temps d'acquisition pourrait fortement être réduit en prenant moins de points par tour, mais aussi en développant une DRA artificielle sans mécanisme de rotation. Enfin, la fourmi du désert se

déplace à $0,7 \text{ m/s}$, ce qui est toujours très rapide par rapport à notre robot qui navigue actuellement à $0,25 \text{ m/s}$. Générer des patrons de locomotion plus stabilisant pour la vision serait bénéfique pour naviguer plus vite, mais aussi modifier le mode d'actionnement et la taille du robot pour en réduire les contraintes mécaniques (échauffement, rendement, inertie, par exemple).

La navigation autonome en environnement extérieur a été réalisée avec succès à l'aide du robot hexapode AntBot équipé de deux capteurs optiques parcimonieux comprenant au total seulement 14 pixels, dont deux constituent le compas céleste en bande UV. Les 12 pixels restants, formant le capteur M²APix, permettent la mesure du flux optique ventral unidimensionnel nécessaire à la détermination de la distance parcourue. Ces pixels sont notamment capables d'une adaptation aux changements de luminosité sur 7 décades, rendant leur utilisation optimale en extérieur.

Au travers de l'intégrateur de chemin, notre stratégie de fusion de données permet de réaliser des tâches de navigation à l'estime de manière très précise et robuste, avec une erreur moyenne de trajectoire égale à $4,67 \text{ cm} \pm 1,88 \text{ cm}$, soit en pourcentage de distance parcourue : $0,67\% \pm 0,27\%$ (mode PI-Full). Grâce aux trois groupes d'expériences menées avec AntBot, nous avons pu démontrer que notre approche entièrement inspirée de la fourmi du désert est totalement robuste à la forme et à la distance de la trajectoire d'exploration.

Le robot AntBot a permis de mettre en avant les nombreux avantages que donnent la bio-inspiration tant au niveau perceptif que comportemental. Ces avancées, en plus des récents travaux sur la récupération de la marche chez les robots hexapodes après un accident entraînant l'invalidité partielle ou totale d'une patte [112], ouvrent des possibilités considérables d'exploitation des robots marcheurs autonomes dans le domaine de la navigation dans le monde réel. En outre, nous montrons que les performances navigationnelles d'AntBot sont robustes à l'égard des conditions météorologiques et de l'indice UV. Bien entendu, l'utilisation de l'intégrateur de chemin ne se limite pas aux seuls robots hexapodes et peut donc être envisagé pour n'importe quel véhicule évoluant en extérieur (robots à roues, drones, voitures, bateaux). A long terme, nous pensons que les robots marcheurs autonomes seront suffisamment robustes pour explorer des milieux là où le GPS et les communications sans fil sont fortement limitées par les conditions environnementales, et où les robots à roues ne peuvent pas se déplacer du fait de la complexité du terrain.

7.2 Perspectives

Le développement du véhicule intelligent requiert la fusion de données fiables, précises et redondantes provenant de nombreux capteurs différents tels que le GPS, les caméras embarquées, les centrales inertielles, les radars, etc. En

s’inspirant de la nature, nous avons développé un système de navigation autonome parcimonieux, fonctionnant en extérieur sur la base de seulement 14 pixels. Grâce à plus de 50 ans de recherche en biologie comportementale et en physiologie chez les insectes, nous sommes parvenus à tirer profit d’une partie des radiations lumineuses atmosphériques pourtant invisibles à l’Homme : le rayonnement UV polarisé. Si l’odométrie par flux optique est bien maîtrisée, le principe de détection de cap par l’observation de la voûte céleste représente une innovation prometteuse pour la navigation autonome.

La boussole céleste permet de déterminer le cap du robot relativement aux méridiens solaire et antisolaire. Toutefois, la configuration du méridien est directement liée à la position du soleil dans le ciel. Ainsi, en utilisant des fonctions éphémérides, c’est-à-dire l’évolution de l’azimut et de l’élévation du soleil au cours du temps, il est tout à fait possible de relier le référentiel céleste (i.e. le cap par rapport au méridien) au Nord géographique. Cela permettra à terme d’utiliser la détection de cap par la mesure du rayonnement polarisé céleste en parallèle avec un GPS afin d’en améliorer la précision d’une part, et de maintenir l’estimation de la position du robot ou du véhicule d’autre part, notamment en cas de traversée de canyons urbains.

Au regard de l’art antérieur, l’exploitation du domaine spectral visible est largement plébiscité en ingénierie. Cet état de fait entre en contradiction directe avec la préférence UV très répandue chez les insectes navigateurs (Tab. 4). De nombreuses hypothèses se sont succédées pour expliquer un tel phénomène (voir [43] pour un recensement de ces hypothèses), la plus populaire étant qu’une plus grande fraction de la lumière serait polarisée linéairement dans les UV. Cette hypothèse est cependant mise en défaut par les mesures faites initialement par K. Coulson en 1988 [32] et confirmées ensuite par M.L. Brines et J.L. Gould [37]. La dernière hypothèse recensée stipule que l’intérêt de l’UV réside essentiellement dans une meilleure transmission de l’information angulaire au travers des canopées et des nuages [43].

Sous des conditions météorologiques optimales, l’insecte n’aurait donc aucun intérêt à préférer le rayonnement UV aux autres longueurs d’ondes ; or, on sait que les insectes sortent essentiellement par temps clément, avec peu de vent, car les conditions météorologiques influent considérablement sur leurs chances de survie. De plus, cette hypothèse n’explique pas pourquoi d’autres insectes ont une sensibilité spectrale maximale dans le bleu, à l’image du grillon, ou dans le vert comme c’est le cas pour le hanneton (Fig. 8). Ainsi, il serait intéressant de développer une version similaire de ce compas céleste sur des bandes de rayonnement différentes, pour ensuite en combiner les mesures en fonction du niveau de rayonnement mesuré, fixant ainsi le niveau de confiance de la mesure.

Les applications nocturnes du compas céleste sont aussi envisageables,

Espèce	λ_{POL} (en nm)	Référence
<i>Calliphora erythrocephala</i> (mouche)	330-350	[113]
<i>Apis mellifera</i> (abeille)	345-350	[114]
<i>Bombus hortorum</i> (bourdon)	353 et 430	[115]
<i>Cataglyphis bicolor</i> (fourmi du désert)	380-410	[116]
<i>Cataglyphis setipes</i> (fourmi du désert)	380-410	[117]
<i>Lethrus apterus</i> (scarabée)	350	[117]
<i>Pachysoma striatum</i> (bousier du désert)	350	[41]
<i>Drassodes cupreus</i> (araignée)	350	[118]

TABLE 4 : Etat de la préférence UV chez certains insectes. La longueur d’onde renseignée ici correspond au maximum de sensibilité dans la DRA, sensible à la polarisation de la lumière. D’après [43].

mais du fait de la trop faible luminosité ambiante de nuit, il faudrait construire une électronique adaptée. Or, on sait aujourd’hui que plusieurs espèces naviguent de nuit, comme par exemple le bousier qui se réfère à la voie lactée, ou encore l’abeille du Panama qui navigue de nuit pour éviter ses prédateurs et avoir moins de concurrence pour la nourriture [119, 120]. L’impact de la pollution atmosphérique sur la fiabilité du cap céleste mériterait également d’être mesuré précisément. En effet, dans les grandes régions urbaines, le dôme de pollution peut rapidement devenir si dense que les propriétés de propagation de la lumière s’en trouvent modifiées.

Le modèle de détection du cap céleste du robot AntBot est fondé sur une vue de l’esprit formulée par Thomas Labhart en 1988 d’après ses travaux sur la sauterelle [28]. Cette approche a le mérite d’être mathématiquement simple et en pratique facile à mettre en œuvre. D’autres modèles sont aujourd’hui proposés, à l’image des récents travaux sur l’anneau attracteur chez la drosophile [121], ou encore le modèle proposé par Evripidis Gkaniyas et collègues [122] utilisant un réseau de neurones pour déterminer le cap dans un environnement simulé.

La résolution relativement grossière du système visuel des insectes vis-à-vis de leurs aptitudes remarquables à effectuer des tâches complexes peut surprendre. Comment une acuité visuelle si basse peut-elle permettre de naviguer dans des milieux souvent complexes et hostiles ? Comment la fourmi fait-elle pour reconnaître son environnement avec une acuité visuelle de seulement 5° environ ? Comment le système visuel du bousier lui assure-t-il de percevoir la lumière provenant de la voie lactée pour s’orienter la nuit ? Comme nous avons pu en faire l’expérience au moyen du robot AntBot, la confrontation de la vision robotique avec l’approche biologique permet de faire émerger de

nouvelles solutions technologiques innovantes. Cette confrontation fructueuse aboutit généralement à l'élaboration de systèmes adaptatifs, parcimonieux, voire optimisés, nécessaires à la mise en œuvre de systèmes de navigation fiables et robustes pour des applications en environnement extérieur, comme les applications au véhicule autonome [123].

Glossaire

- AdP** Angle de Polarisation, noté mathématiquement ψ . 1, 11–16, 18–20, 22
- CCD** *Charge-Coupled Device* (dispositif à transfert de charge - DTC). 16–18
- CMOS** *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*. 16, 28
- DPL** Degré de Polarisation Linéaire. 11, 13, 16
- DRA** *Dorsal Rim Area* (aire dorsale marginale). 13–16, 18, 41, 44
- GPS** Global Positioning System. 2, 3, 42, 43
- M²APix** Michaelis–Menten Auto-adaptive Pixel. 6, 27–30, 32, 33, 35, 42
- PI-Full** *Path Integration Full* (intégrateur de chemin complet). 35–40, 42
- PI-OF-ST** *Path Integration based on Optic Flow and STride* (Intégrateur de chemin basée sur le flux optique et la foulée). 33, 37
- PI-POL-ST** *Path Integration based on POLarisation and STride* (Intégrateur de chemin basée sur la polarisation et la foulée). 34, 37, 39
- PI-ST** *Path Integration based on STride* (Intégrateur de chemin basée sur la foulée). 32, 36–39
- PI-ST-Fuse** *Path Integration based on information FUSEd between STride and optic flow* (Intégrateur de chemin basée sur une fusion d'information entre la foulée et le flux optique). 33, 37, 38
- UV** UltraViolet. 1, 13, 16–19, 41, 43, 44
- WTA** *Winner-Take-All*. 22

Bibliographie

- [1] Renfro B, Rosenquest J, Terry A, Boeker N. An Analysis of Global Positioning System (GPS) Standard Positioning System (SPS) Performance for 2015. Space and Geophysics Laboratory Applied Research Laboratories The University of Texas at Austin[Links]. 2017 ;.
- [2] Milford MJ, Wyeth GF. SeqSLAM : Visual route-based navigation for sunny summer days and stormy winter nights. In : 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation ; 2012. p. 1643–1649.
- [3] Weiss S, Scaramuzza D, Siegwart R. Monocular-SLAM-based navigation for autonomous micro helicopters in GPS-denied environments. Journal of Field Robotics. 2011 ;28(6) :854–874.
- [4] Ham Y, Han KK, Lin JJ, Golparvar-Fard M. Visual monitoring of civil infrastructure systems via camera-equipped Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) : a review of related works. Visualization in Engineering. 2016 Jan ;4(1) :1.
- [5] Lowry S, Sünderhauf N, Newman P, Leonard JJ, Cox D, Corke P, et al. Visual Place Recognition : A Survey. IEEE Transactions on Robotics. 2016 Feb ;32(1) :1–19.
- [6] Vidal AR, Rebecq H, Horstschaefter T, Scaramuzza D. Ultimate SLAM? Combining Events, Images, and IMU for Robust Visual SLAM in HDR and High-Speed Scenarios. IEEE Robotics and Automation Letters. 2018 ;3(2) :994–1001.
- [7] Mueggler E, Rebecq H, Gallego G, Delbruck T, Scaramuzza D. The event-camera dataset and simulator : Event-based data for pose estimation, visual odometry, and SLAM. The International Journal of Robotics Research. 2017 ;36(2) :142–149.

- [8] Fallon M. Accurate and robust localization for walking robots fusing kinematics, inertial, vision and LIDAR. *Interface Focus*. 2018 ;8(4).
- [9] Zhao Y. Applying Time-Differenced Carrier Phase in Nondifferential GPS/IMU Tightly Coupled Navigation Systems to Improve the Positioning Performance. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2017 Feb ;66(2) :992–1003.
- [10] Wehner R, Wehner S. Insect navigation : use of maps or Ariadne’s thread? *Ethology Ecology & Evolution*. 1990 ;2(1) :27–48.
- [11] Heinze S, Narendra A, Cheung A. Principles of Insect Path Integration. *Current Biology*. 2018 sep ;28(17) :R1043–R1058.
- [12] Koenderink JJ, van Doorn AJ. Facts on optic flow. *Biological Cybernetics*. 1987 Jun ;56(4) :247–254.
- [13] Horn BK, Schunck BG. Determining optical flow. *Artificial intelligence*. 1981 ;17(1-3) :185–203.
- [14] Lucas BD, Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. 1981 ;.
- [15] Labhart T, Meyer EP. Detectors for polarized skylight in insects : a survey of ommatidial specializations in the dorsal rim area of the compound eye. *Microscopy Research and Technique*. 1999 ;47(6) :368–379.
- [16] Lambrinos D, Möller R, Labhart T, Pfeifer R, Wehner R. A mobile robot employing insect strategies for navigation. *Robotics and Autonomous systems*. 2000 ;30(1-2) :39–64.
- [17] Chu J, Wang H, Chen Li R. Application of a novel polarization sensor to mobile robot navigation. In : *Mechatronics and Automation, 2009. ICMA 2009. International Conference on*. IEEE ; 2009. p. 3763–3768.
- [18] Dupeyroux J, Serres JR, Viollet S. AntBot : A six-legged walking robot able to home like desert ants in outdoor environments. *Science Robotics*. 2019 ;4(27) :eaau0307.
- [19] Dupeyroux J, Serres J, Viollet S. A hexapod walking robot mimicking navigation strategies of desert ants *Cataglyphis*. In : *Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems*. Springer ; 2018. p. 145–156.

- [20] Dupeyroux J, Viollet S, Serres JR. An ant-inspired celestial compass applied to autonomous outdoor robot navigation. *Robotics and Autonomous Systems*. 2019;117 :40–56.
- [21] Dupeyroux J, Passault G, Ruffier F, Viollet S, Serres J. Hexabot : a small 3D-printed six-legged walking robot designed for desert ant-like navigation tasks. In : 20th World Congress of IFAC; 2017. .
- [22] Seidl RA. Die sehfelder und ommatidien divergenzwinkel von Arbeiterin, Königin und drohn der honigbiene (*Apis mellifica*); 1982.
- [23] Zollikofer C, Wehner R, Fukushi T. Optical scaling in conspecific *Cataglyphis* ants. *Journal of Experimental Biology*. 1995;198(8) :1637–1646.
- [24] Schwarz S, Narendra A, Zeil J. The properties of the visual system in the Australian desert ant *Melophorus bagoti*. *Arthropod Structure & Development*. 2011;40(2) :128 – 134.
- [25] Franceschini N. Couleur et Mouvement dans la Vie d'un Insecte. In : Ecole thématique interdisciplinaire du CNRS Couleur et mouvement. Roussillon, France; 2008. p. 56–80.
- [26] Franceschini N. Small Brains, Smart Machines : From Fly Vision to Robot Vision and Back Again. *Proceedings of the IEEE*. 2014 May;102(5) :751–781.
- [27] Labhart T. Polarization-sensitive interneurons in the optic lobe of the desert ant *Cataglyphis bicolor*. *Naturwissenschaften*. 2000;87(3) :133–136.
- [28] Labhart T. Polarization-opponent interneurons in the insect visual system. *Nature*. 1988;331(6155) :435.
- [29] Labhart T, Meyer EP. Neural mechanisms in insect navigation : polarization compass and odometer. *Current opinion in neurobiology*. 2002;12(6) :707–714.
- [30] Reppert SM, Zhu H, White RH. Polarized light helps monarch butterflies navigate. *Current Biology*. 2004;14(2) :155–158.
- [31] Coulson K. Characteristics of the radiation emerging from the top of a rayleigh atmosphere—I : Intensity and polarization. *Planetary and Space Science*. 1959;1(4) :265–276.

- [32] Coulson KL. Polarization and Intensity of Light in the Atmosphere. A Deepak Pub ; 1988.
- [33] Gál J, Horváth G, Barta A, Wehner R. 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. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*. 2001 ;106(D19) :22647–22653.
- [34] Cronin TW, Marshall J. Patterns and properties of polarized light in air and water. *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*. 2011 ;366(1565) :619–626.
- [35] Wehner R, Räber F. Visual spatial memory in desert ants, *Cataglyphis bicolor* (Hymenoptera : Formicidae). *Experientia*. 1979 ;35(12) :1569–1571.
- [36] Pfeiffer K, Negrello M, Homberg U. Conditional perception under stimulus ambiguity : polarization-and azimuth-sensitive neurons in the locust brain are inhibited by low degrees of polarization. *Journal of Neurophysiology*. 2010 ;105(1) :28–35.
- [37] Brines ML, Gould JL. Skylight polarization patterns and animal orientation. *Journal of Experimental Biology*. 1982 ;96(1) :69–91.
- [38] Ou Y, Wu P, Tang C, Wei H. Analysis on the Influence Factors to Atmospheric Polarization Navigation. In : *China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2016 Proceedings : Volume II*. Springer ; 2016. p. 583–593.
- [39] Wehner R. Desert ant navigation : how miniature brains solve complex tasks. *Journal of Comparative Physiology A*. 2003 Aug ;189(8) :579–588.
- [40] Labhart T. The electrophysiology of photoreceptors in different eye regions of the desert ant, *Cataglyphis bicolor*. *Journal of Comparative Physiology A*. 1986 Jan ;158(1) :1–7.
- [41] Dacke M, Nordström P, Scholtz C, Warrant E. A specialized dorsal rim area for polarized light detection in the compound eye of the scarab beetle *Pachysoma striatum*. *Journal of Comparative Physiology A*. 2002 Apr ;188(3) :211–216.
- [42] Herzmann D, Labhart T. Spectral sensitivity and absolute threshold of polarization vision in crickets : a behavioral study. *Journal of Comparative Physiology A*. 1989 May ;165(3) :315–319.

- [43] Why is it advantageous for animals to detect celestial polarization in the ultraviolet? Skylight polarization under clouds and canopies is strongest in the UV. *Journal of Theoretical Biology*. 2004 ;226(4) :429 – 437.
- [44] Pegel U, Pfeiffer K, Homberg U. Integration of celestial compass cues in the central complex of the locust brain. *Journal of Experimental Biology*. 2018 ;221(2).
- [45] Heinze S. In : Horváth G, editor. *Polarized-Light Processing in Insect Brains : Recent Insights from the Desert Locust, the Monarch Butterfly, the Cricket, and the Fruit Fly*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg ; 2014. p. 61–111.
- [46] Schmitt F, Stieb SM, Wehner R, Rössler W. Experience-related reorganization of giant synapses in the lateral complex : Potential role in plasticity of the sky-compass pathway in the desert ant *Cataglyphis fortis*. *Developmental Neurobiology*. 2016 ;76(4) :390–404.
- [47] Stone T, Webb B, Adden A, Weddig NB, Honkanen A, Templin R, et al. An Anatomically Constrained Model for Path Integration in the Bee Brain. *Current Biology*. 2017 ;27(20) :3069 – 3085.e11.
- [48] el Jundi B, Warrant EJ, Byrne MJ, Khaldy L, Baird E, Smolka J, et al. Neural coding underlying the cue preference for celestial orientation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2015 ;112(36) :11395–11400.
- [49] Immonen EV, Dacke M, Heinze S, el Jundi B. Anatomical organization of the brain of a diurnal and a nocturnal dung beetle. *Journal of Comparative Neurology*. 2017 ;525(8) :1879–1908.
- [50] Heinze S, Homberg U. Linking the input to the output : new sets of neurons complement the polarization vision network in the locust central complex. *Journal of Neuroscience*. 2009 ;29(15) :4911–4921.
- [51] Homberg U, Heinze S, Pfeiffer K, Kinoshita M, El Jundi B. Central neural coding of sky polarization in insects. *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*. 2011 ;366(1565) :680–687.
- [52] Dacke M, el Jundi B. The Dung Beetle Compass. *Current Biology*. 2018 ;28(17) :R993 – R997.

- [53] Heinze S, Homberg U. Maplike Representation of Celestial E-Vector Orientations in the Brain of an Insect. *Science*. 2007 ;315(5814) :995–997.
- [54] Lambrinos D, Kobayashi H, Pfeifer R, Maris M, Labhart T, Wehner R. An autonomous agent navigating with a polarized light compass. *Adaptive behavior*. 1997 ;6(1) :131–161.
- [55] Chu J, Zhao K, Zhang Q, Wang T. Construction and performance test of a novel polarization sensor for navigation. *Sensors and Actuators A : Physical*. 2008 ;148(1) :75–82.
- [56] Wang Y, Chu J, Zhang R, Wang L, Wang Z. A novel autonomous real-time position method based on polarized light and geomagnetic field. *Scientific reports*. 2015 ;5 :9725.
- [57] Chu J, Wang Z, Guan L, Liu Z, Wang Y, Zhang R. Integrated polarization dependent photodetector and its application for polarization navigation. *IEEE Photonics Technol Lett*. 2014 ;26(5) :469–472.
- [58] Chahl J, Mizutani A. Biomimetic attitude and orientation sensors. *IEEE Sensors Journal*. 2012 ;12(2) :289–297.
- [59] Karman SB, Diah SZM, Gebeshuber IC. Bio-inspired polarized skylight-based navigation sensors : A review. *Sensors*. 2012 ;12(11) :14232–14261.
- [60] Fan C, Hu X, Lian J, Zhang L, He X. Design and calibration of a novel camera-based bio-inspired polarization navigation sensor. *IEEE Sensors Journal*. 2016 ;16(10) :3640–3648.
- [61] Carey N, Stürzl W. An insect-inspired omnidirectional vision system including UV-sensitivity and polarisation. In : *Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), 2011 IEEE International Conference on*. IEEE ; 2011. p. 312–319.
- [62] Aycock TM, Chenault DB, Lompadro A, Pezzaniti JL. Sky polarization and sun sensor system and method. *Google Patents*; 2018. US Patent 9,989,625.
- [63] Stokes GG. On the composition and resolution of streams of polarized light from different sources. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*. 1851 ;9 :399.

- [64] Wang D, Liang H, Zhu H, Zhang S. A bionic camera-based polarization navigation sensor. *Sensors*. 2014;14(7) :13006–13023.
- [65] Zhang W, Cao Y, Zhang X, Liu Z. Sky light polarization detection with linear polarizer triplet in light field camera inspired by insect vision. *Applied optics*. 2015;54(30) :8962–8970.
- [66] Zhang W, Zhang X, Cao Y, Liu H, Liu Z. Robust sky light polarization detection with an S-wave plate in a light field camera. *Applied optics*. 2016;55(13) :3518–3525.
- [67] Fan C, Hu X, He X, Zhang L, Wang Y. Multicamera polarized vision for the orientation with the skylight polarization patterns. *Optical Engineering*. 2018;57(4) :043101.
- [68] Dupeyroux J, Diperi J, Boyron M, Viollet S, Serres J. A novel insect-inspired optical compass sensor for a hexapod walking robot. In : 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) ; 2017. p. 3439–3445.
- [69] Zhi W, Chu J, Li J, Wang Y. A Novel Attitude Determination System Aided by Polarization Sensor. *Sensors*. 2018;18(1) :158.
- [70] Sarkar M, Bello DSS, Van Hoof C, Theuwissen A. Integrated polarization-analyzing CMOS image sensor for detecting incoming light ray direction. In : Sensors Applications Symposium (SAS), 2010 IEEE. IEEE ; 2010. p. 194–199.
- [71] Garcia M, Edmiston C, Marinov R, Vail A, Gruev V. Bio-inspired color-polarization imager for real-time in situ imaging. *Optica*. 2017;4(10) :1263–1271.
- [72] Sarkar M, Bello DSS, van Hoof C, Theuwissen AJ. Biologically inspired CMOS image sensor for fast motion and polarization detection. *IEEE Sensors Journal*. 2013;13(3) :1065–1073.
- [73] Wang Y, Hu X, Zhang L, Lian J, He X. Polarized Light Compass-Aided Visual-Inertial Navigation Under Foliage Environment. *IEEE Sensors Journal*. 2017;17(17) :5646–5653.
- [74] Han G, Hu X, Lian J, He X, Zhang L, Wang Y, et al. Design and calibration of a novel bio-inspired pixelated polarized light compass. *Sensors*. 2017;17(11) :2623.

- [75] Fan C, Hu X, He X, Zhang L, Lian J. Integrated Polarized Skylight Sensor and MIMU With a Metric Map for Urban Ground Navigation. *IEEE Sensors Journal*. 2018 Feb ;18(4) :1714–1722.
- [76] Momeni M, Titus AH. An analog VLSI chip emulating polarization vision of octopus retina. *IEEE transactions on neural networks*. 2006 ;17(1) :222–232.
- [77] Wang X, Gao J, Fan Z. Empirical corroboration of an earlier theoretical resolution to the UV paradox of insect polarized skylight orientation. *Naturwissenschaften*. 2014 ;101(2) :95–103.
- [78] Dupeyroux J, Viollet S, Serres JR. Polarized skylight-based heading measurements : a bio-inspired approach. *Journal of the Royal Society Interface*. 2019 ;16(150) :20180878.
- [79] Boulay R, Aron S, Cerdá X, Doums C, Graham P, Hefetz A, et al. Social life in arid environments : the case study of *Cataglyphis* ants. *Annual review of entomology*. 2017 ;62 :305–321.
- [80] Wehner R. Taxonomie, Funktionsmorphologie und Zoogeographie der saharischen Wüstenameise *Cataglyphis fortis* (Forel 1902) stat. nov. *Senckenbergiana biol*. 1983 ;64 :89–132.
- [81] Wehner R, Srinivasan MV. Path integration in insects. In : *The Neurobiology of Spatial Behaviour*. Oxford University Press ; 2003. p. 9–30.
- [82] Wehner R. Celestial and Terrestrial Navigation : Human Strategies — Insect Strategies. In : Huber F, Markl H, editors. *Neuroethology and Behavioral Physiology*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg ; 1983. p. 366–381.
- [83] Mittelstaedt H. role of multimodal convergence in homing by path integration. *Fortschritte der Zoologie*. 1983 ;p. 197–212.
- [84] Srinivasan MV. Where paths meet and cross : navigation by path integration in the desert ant and the honeybee. *Journal of Comparative Physiology A*. 2015 Jun ;201(6) :533–546.
- [85] Knaden M, Graham P. The Sensory Ecology of Ant Navigation : From Natural Environments to Neural Mechanisms. *Annual Review of Entomology*. 2016 ;61(1) :63–76. PMID : 26527301.
- [86] Wehner R, Müller M. How do ants acquire their celestial ephemeris function ? *Naturwissenschaften*. 1993 Jul ;80(7) :331–333.

- [87] Dyer FC, Dickinson JA. Development of sun compensation by honeybees : how partially experienced bees estimate the sun's course. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1994 ;91(10) :4471–4474.
- [88] Fleischmann PN, Grob R, Müller VL, Wehner R, Rössler W. The geomagnetic field is a compass cue in *cataglyphis* ant navigation. *Current Biology*. 2018 ;28(9) :1440–1444.
- [89] Zeil J, Hofmann MI, Chahl JS. Catchment areas of panoramic snapshots in outdoor scenes. *J Opt Soc Am A*. 2003 Mar ;20(3) :450–469.
- [90] Wystrach A, Beugnon G, Cheng K. Landmarks or panoramas : what do navigating ants attend to for guidance? *Frontiers in Zoology*. 2011 Aug ;8(1) :21.
- [91] Graham P, Cheng K. Ants use the panoramic skyline as a visual cue during navigation. *Current Biology*. 2009 ;19(20) :R935 – R937.
- [92] Ronacher B, Wehner R. Desert ants *Cataglyphis fortis* use self-induced optic flow to measure distances travelled. *Journal of Comparative Physiology A*. 1995 Jul ;177(1) :21–27.
- [93] Wohlgenuth S, Ronacher B, Wehner R. Ant odometry in the third dimension. *Nature*. 2001 ;411(6839) :795.
- [94] Wittlinger M, Wehner R, Wolf H. The Ant Odometer : Stepping on Stilts and Stumps. *Science*. 2006 ;312(5782) :1965–1967.
- [95] Wittlinger M, Wehner R, Wolf H. The desert ant odometer : a stride integrator that accounts for stride length and walking speed. *Journal of Experimental Biology*. 2007 ;210(2) :198–207.
- [96] Pfeffer SE, Wittlinger M. Optic flow odometry operates independently of stride integration in carried ants. *Science*. 2016 ;353(6304) :1155–1157.
- [97] Nakayama K, Loomis J. Optical velocity patterns, velocity-sensitive neurons, and space perception : a hypothesis. *Perception*. 1974 ;3(1) :63–80.
- [98] von Helmholtz H, Southall JPC. *Treatise on physiological optics*. vol. 3. Courier Corporation ; 2005.
- [99] Gibson JJ. *The senses considered as perceptual systems*. 1966 ;.

- [100] Horn B, Klaus B, Horn P. Robot vision. MIT press; 1986.
- [101] Serres J, Ruffier F. Optic Flow-Based Robotics. Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering. 2016 ;p. 1–14.
- [102] Serres J, Viollet S, Ruffier F. Microdrones bio-inspirés. Doter nos futurs robots aériens de l’agilité des insectes [base documentaire]. Les Techniques de l’Ingénieur. 2017 ;Ref. s7717.
- [103] Serres J. Taking Inspiration from Flying Insects to Navigate inside Buildings. Interdisciplinary Expansions in Engineering and Design With the Power of Biomimicry. 2018 ;p. 31–55.
- [104] Serres JR, Viollet S. Insect-inspired vision for autonomous vehicles. Current opinion in insect science. 2018 ;30 :46–51.
- [105] Mafrica S, Godiot S, Menouni M, Boyron M, Expert F, Juston R, et al. A bio-inspired analog silicon retina with Michaelis-Menten auto-adaptive pixels sensitive to small and large changes in light. Opt Express. 2015 Mar ;23(5) :5614–5635.
- [106] Mafrica S, Serval A, Ruffier F. Minimalistic optic flow sensors applied to indoor and outdoor visual guidance and odometry on a car-like robot. Bioinspiration & biomimetics. 2016 ;11(6) :066007.
- [107] Vanhoutte E, Mafrica S, Ruffier F, Bootsma RJ, Serres J. Time-of-Travel Methods for Measuring Optical Flow on Board a Micro Flying Robot. Sensors. 2017 ;17(3).
- [108] Michaelis L, Menten ML. Die kinetik der invertinwirkung. Universitätsbibliothek Johann Christian Senckenberg ; 2007.
- [109] Naka KI, Rushton WAH. S-potentials from luminosity units in the retina of fish (Cyprinidae). The Journal of Physiology. 1966 ;185(3) :587–599.
- [110] Dupeyroux J, Boutin V, Serres JR, Perrinet LU, Viollet S. M²APix : A Bio-Inspired Auto-Adaptive Visual Sensor for Robust Ground Height Estimation. In : 2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS) ; 2018. p. 1–4.
- [111] Vanhoutte E. Microdrone with visual system inspired from honeybees [Theses]. Aix Marseille Université; 2018. Available from : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/tel-01910718>.

- [112] Cully A, Clune J, Tarapore D, Mouret JB. Robots that can adapt like animals. *Nature*. 2015 ;521(7553) :503.
- [113] Smola U, Meffert P. A single-peaked UV-receptor in the eye of *Calliphora erythrocephala*. *Journal of comparative physiology*. 1975 Jan ;103(3) :353–357.
- [114] Labhart T. Specialized photoreceptors at the dorsal rim of the honey-bee’s compound eye : Polarizational and angular sensitivity. *Journal of comparative physiology*. 1980 Mar ;141(1) :19–30.
- [115] Meyer-Rochow VB. Electrophysiology and histology of the eye of the bumblebee *Bombus hortorum* (L.) (Hymenoptera : Apidae). *Journal of the Royal Society of New Zealand*. 1981 ;11(2) :123–153.
- [116] Duelli P, Wehner R. The spectral sensitivity of polarized light orientation in *Cataglyphis bicolor* (Formicidae, Hymenoptera). *Journal of Comparative Physiology A*. 1973 Mar ;86(1) :37–53.
- [117] Frantsevich L, Zolotov V, Gribakin F, Polianovski A, Govardovski V. Polarotaxis in beetles of genus *Lethrus* (Coleoptera, Scarabaeidae) in different spectral regions. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1976 ;226(3) :733.
- [118] Dacke M, Nilsson DE, Warrant E, Blest A, Land M, O’carroll D. Built-in polarizers form part of a compass organ in spiders. *Nature*. 1999 ;401(6752) :470.
- [119] Greiner B, Ribi WA, Warrant EJ. Retinal and optical adaptations for nocturnal vision in the halictid bee *Megalopta genalis*. *Cell and Tissue Research*. 2004 Jun ;316(3) :377–390.
- [120] Greiner B, Cronin TW, Ribi WA, Weislo WT, Warrant EJ. Anatomical and physiological evidence for polarisation vision in the nocturnal bee *Megalopta genalis*. *Journal of Comparative Physiology A*. 2007 Jun ;193(6) :591–600.
- [121] Kim SS, Rouault H, Druckmann S, Jayaraman V. Ring attractor dynamics in the *Drosophila* central brain. *Science*. 2017 ;356(6340) :849–853.
- [122] Gkaniyas E, Risse B, Mangan M, Webb B. From skylight input to behavioural output : a computational model of the insect polarised light compass. *PLoS computational biology*. 2019 ;15(7) :e1007123.

- [123] Monnoyer J, Dupeyroux J, Serres J, Viollet S. Dispositif de détection d'un cap d'un véhicule par détection de photons polarisés linéairement. 2018 09 ;(2018P00919 FR/JPX).