



AIX-MARSEILLE UNIVERSITÉ
ED 463 - École Doctorale des Sciences du Mouvement Humain
UMR 7287 - Institut des Sciences du Mouvement
Département de Biorobotique

Thèse de Doctorat
PhD Thesis

présentée pour obtenir le grade universitaire de docteur en
presented to obtain the grade of philosophical doctor in

Robotique Bio-inspirée
Bio-inspired Robotics

Julien Dupeyroux

Navigation autonome bio-inspirée
appliquée à un robot hexapode
Bio-inspired autonomous navigation
applied to a hexapod robot

Soutenue publiquement le 05/07/2019 devant le jury composé de :

Luc JAULIN	Professeur	UBO/ENSTA	Rapporteur
Philippe BONNIFAIT	Professeur	UTC/Heudiasyc	Rapporteur
Myriam ZERRAD	Ingénieure Recherche, HDR	Institut Fresnel	Examinatrice
Guido DE CROON	Maître de conférences	TU Delft	Examineur
Vincent FOURCASSIE	Directeur de recherche	CNRS/CBI	Examineur
Jean-Louis VERCHER	Directeur de recherche	CNRS/ISM	Examineur
Véronique SERFATY	Docteure	DGA	Invitée
Julien SERRES	Maître de conférence	AMU/ISM	Co-Directeur de thèse
Stéphane VIOLLET	Directeur de recherche	CNRS/ISM	Directeur de thèse



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

Remerciements

Je propose d'ouvrir cette traditionnelle session de remerciements par les deux principaux acteurs de cette thèse, sans lesquels rien n'aurait été possible. Stéphane et Julien, je vous remercie sincèrement pour votre confiance et votre patience, et pour toutes ces magnifiques opportunités que vous m'avez offertes durant ces années de thèse : la publication chez *Science Robotics*, le workshop sur l'ingénierie de la vision neuromorphique aux Etats-Unis, et tant d'autres. Ce fut un réel plaisir de me former à vos côtés.

Je remercie l'ensemble des membres du jury pour avoir accepté d'évaluer l'intérêt et la pertinence de ces travaux, ainsi que pour leur présence lors de la soutenance : Luc Jaulin de l'Université de Bretagne Occidentale, Philippe Bonnifait de l'Université Technologique de Compiègne, Myriam Zerrad de l'Institut Fresnel, Guido De Croon de l'Université Technologique de Delft, Vincent Fourcassié du Centre de Biologie Intégrative, Jean-Louis Vercher de l'Institut des Sciences du Mouvement Etienne-Jules Marey, et enfin Véronique Serfaty de la Direction Générale de l'Armement.

Le progrès technique et l'innovation et scientifique ne pouvant être le produit d'un seul individu, je remercie particulièrement Marc Boyron et Julien Dipéri pour leur précieuse expertise, respectivement en micro-électronique et en prototypage rapide, primordiale pour le développement du compas céleste.

Pour avoir financé mes travaux de recherche, je remercie Aix Marseille Université ainsi que la Direction Générale de l'Armement, représentée par Véronique Serfaty, responsable I2R (Ingénierie de l'Information et Robotique).

Un grand merci à Alexandra Colombani et Myrtille La Lumia pour avoir su me conseiller sur mes choix et m'aider à prendre du recul. Je remercie également Bastien Goin pour son soutien durant ces deux dernières années de rush ! Merci également à Jocelyn Monnoyer, Erik Vanhoutte, et Fabien Colonnier pour nos discussions passionnantes et vos conseils avisés. Merci également à Laurence Willemet pour son infinie gentillesse, à Aimie Berger pour son impitoyable perspicacité, et à Xi Lin pour m'avoir accompagné toutes ces années, écoutant non sans désespoir mes interminables conversations avec moi-même. De manière plus générale, je remercie l'ensemble des membres de l'équipe Biorobotique pour leur convivialité et leur gentillesse, et tous les stagiaires que j'ai eu le plaisir de côtoyer. Merci à l'ensemble des membres de l'ISM, doctorant(e)s, permanent(e)s, enseignant(e)s, et personnels administratifs, pour leur accueil chaleureux.

Je tiens à exprimer ma gratitude vis-à-vis des personnes qui ont suivi et contribué à mon développement personnel et professionnel, et à qui je dédie l'ensemble de ces travaux de thèse. Merci à mes parents, Patricia et Norbert, pour leur indéfectible soutien. C'est à vous que je dois ma réussite. Votre amour et vos sacrifices ont fait de moi celui que je suis, et

cet accomplissement est également le vôtre. Merci à Elodie, toi qui m'accompagne depuis le début, qui sait tout de moi, et qui est toujours là quand j'en ai besoin. Enfin, pour tout ce que tu m'as apporté depuis notre rencontre, merci à toi Joan.

Résumé

Le développement de la navigation autonome est devenu l'un des enjeux technologiques majeurs du 21^{ème} siècle. Les applications de ces systèmes de navigation sont vastes, tant pour la robotique mobile que pour les moyens de transports du futur. Plusieurs stratégies sont aujourd'hui disponibles. La première, et sûrement la plus utilisée, concerne les GPS (*Global Positioning System*). Bien que très performant, le GPS civil souffre d'une précision variable dépendant des conditions météorologiques et de l'environnement urbain. La vision par ordinateur permet également de localiser un système mobile dans un environnement complexe. Toutefois, cette stratégie est souvent coûteuse en termes de ressources de calcul et sensible aux variations de la luminosité ambiante, limitant ainsi son utilisation à l'extérieur.

Nul doute qu'aucune solution fiable ne saurait faire l'économie du GPS ni même des caméras, très répandues en robotique et de plus en plus intégrées aux véhicules. L'enjeu est donc de fusionner plusieurs systèmes de navigation afin d'assurer la meilleure précision dans l'estimation de la position d'un véhicule quel qu'il soit. En ce sens, les travaux de recherche relatés dans cette thèse visent à mettre en place une nouvelle stratégie de navigation parcimonieuse inspirée des fourmis du désert *Cataglyphis* afin de localiser un robot terrestre mobile hexapode.

S'inspirant de l'œil composé des fourmis, un compas céleste minimaliste doté de seulement deux photodiodes sensibles au rayonnement ultraviolet, elles-mêmes surmontées de filtres linéaires polarisants, permet d'acquérir avec une précision inférieure à 1° l'angle de polarisation de la lumière du ciel, lequel sert de cap en navigation terrestre. Le compas céleste a démontré d'excellentes performances, avec une erreur médiane d'estimation de l'angle de polarisation inférieure à 0.6° quelle que soit la condition météorologique retenue, que le ciel soit obstrué par des arbres ou pas. L'applicabilité de cette boussole solaire a également été vérifiée en milieu sous-marin de faible profondeur ainsi qu'en cas de pluie, montrant un potentiel d'utilisation considérable en environnement extérieur.

Les tâches de navigation ont été réalisées par le robot hexapode AntBot, équipé du compas céleste ainsi que d'un capteur de flux optique, appelé M²APix (*Michaelis-Menten Auto-Adaptive Pixels*), constitué de 12 pixels auto-adaptatifs dont la réponse mime celle des cellules photoréceptrices de vertébrés (tortues, homme) et invertébrés (mouches). AntBot dispose d'un intégrateur de chemin inspiré d'études comportementales chez les fourmis *Cataglyphis*. Ce système fusionne le cap donné par le compas céleste, la distance mesurée par le flux optique, et le nombre de foulées pour déterminer la position du robot par rapport au point de départ de son itinéraire. Il en a résulté une erreur de navigation moyenne stable d'environ 6cm, indépendante de la forme ou de la distance des trajectoires accomplies (variant de 5 à 15m). Ces résultats montrent que cette stratégie de navigation peut être envisagée en parallèle d'un GPS, pour un coût calculatoire faible, afin de bénéficier d'un système de localisation précis, robuste et efficace.

Mots clés : robotique hexapode, navigation, intégration de chemin, compas céleste, flux optique, vision non-conventionnelle, bio-inspiration, biomimétisme, bionique, biorobotique.

Abstract

Autonomous navigation is one of the leading technological challenges of the 21st century. The potential applications of such navigation systems are many and various, in both mobile robotics and means of transport. Several solutions exist, the first of which being the GPS (Global Positioning System). Although performant, the accuracy of the civilian GPS is hampered by the meteorological conditions and the urban infrastructures. Computer vision based methods also provide localization cues for autonomous vehicles in highly complex environments. However, data processing requires important computational resources, and light changes often result in navigation failure.

It would be of great interest to take advantage of all these advanced navigation techniques to set up a new powerful, reliable, robust navigation system. The challenge here is to develop other navigation systems to be combined with other classical techniques based on GPS and cameras so that any vehicle equipped with such solution would benefit from high precision and robustness. To that extent, this PhD thesis aims at setting up new navigation strategies inspired by desert ants *Cataglyphis*, requiring few resources and tested on board a hexapod walking robot.

Taking inspiration from the ants' compound eye, a novel celestial compass – composed of just two ultraviolet-sensitive photodiodes topped with rotating linear polarizers – provides measurements of the angle of polarization of the skylight with angular precision under 1° . This angle is used as the vehicle's heading while navigating. This compass provided excellent performances with a steady median error below 0.6° regardless of the meteorological condition, be the sky covered by trees or not. The relevance of this sky compass in submarine context and in case of precipitations has been successfully investigated, thus demonstrating its interest in outdoor autonomous navigation.

Navigation tasks were performed with our hexapod robot AntBot equipped with both the celestial compass and an optic flow sensor called M²APix (*Michaelis-Menten Auto-Adaptive Pixels*). This sensor includes 12 pixels that can adapt to light changes just as photoreceptors in vertebrate (turtle, human being) and invertebrate (fly). AntBot has a path integrator navigation system inspired by behavioral studies in desert ants *Cataglyphis*. This strategy uses the heading given by the celestial compass, the distance measured with the optic flow sensor, and the stride integrator to determine the vehicle's position with respect to its departure location. Experiments resulted in a navigation error of approximately 6cm regardless of the shape and the length of the trajectory (varying from 5m to 15m). These results show that such navigation system can be used to complement classical techniques like GPS and vision-based ones, with a high level of robustness and efficiency, and with few computational resources needed.

Keywords: hexapod robot, navigation, path integrator, celestial compass, optic flow, non-conventional vision, bio-inspiration, biomimetics, bionics, biorobotics

Diffusion des résultats

Revue scientifique internationale

Dupeyroux, J., Serres, J., et Viollet, S. (2019). *Antbot: a six-legged walking robot able to home like desert ants in outdoor environments*. Dans : Science Robotics, vol. 4 (p. eaau0307).

<https://www.doi.org/10.1126/scirobotics.aau0307>

Dupeyroux, J., Viollet, S., et Serres, J. (2019). *Polarized skylight-based heading measurements: a bio-inspired approach*. Dans : Journal of the Royal Society Interface, vol. 16, no. 150 (p. 20180878).

<https://www.doi.org/10.1098/rsif.2018.0878>

Dupeyroux, J., Viollet, S., et Serres, J. (2019). *An ant-inspired celestial compass applied to autonomous outdoor robot navigation*. Dans : Robotics and Autonomous Systems, vol. 117 (p. 40-56).

<https://www.doi.org/10.1016/j.robot.2019.04.007>

Chapitres

Dupeyroux, J., Viollet, S., et Serres, J. (en préparation, sur invitation). *Le robot AntBot s'oriente comme une fourmi - Applications à la navigation à vue sans GPS ni magnétomètre*. A paraître dans : Techniques de l'Ingénieur.

Brevets

Dupeyroux, J., Monnoyer, J., Serres, J., et Viollet, S. (en révision). *Dispositif de détection du cap d'un véhicule par détection de photons polarisés linéairement*. Dépôt n° 2018P00919, FR/JPX, septembre 2018.

Conférences internationales à comité de lecture

Dupeyroux, J., Serres, J., et Viollet, S. (2019, Août). *AntBot: a fully insect-inspired hexapod homing like desert ants*. Dans : 4th International Conference on Invertebrate Vision (ICIV 2019), Bäckaskog Castle, Suède.

Dupeyroux, J., Serres, J., et Viollet, S. (2018, Juillet). *A hexapod walking robot mimicking navigation strategies of desert ants Cataglyphis*. Dans : Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems (pp. 145-156), Paris, France. Springer, Cham. **Best paper award**.

https://www.doi.org/10.1007/978-3-319-95972-6_16

Dupeyroux, J., Boutin, V., Serres, J. R., Perrinet, L. U., et Viollet, S. (2018, Mai). *M²APix: A bio-inspired auto-adaptive visual sensor for robust ground height estimation*. Dans : Circuits and Systems (ISCAS),

2018 IEEE International Symposium on (pp. 1-4), Florence, Italie.

<https://www.doi.org/10.1109/ISCAS.2018.8351433>

Dupeyroux, J., Diperi, J., Boyron, M., Viollet, S., et Serres, J. (2017, Septembre). *A novel insect-inspired optical compass sensor for a hexapod walking robot*. Dans : Intelligent Robots and Systems (IROS), 2017 IEEE/RSJ International Conference on (pp. 3439-3445), Vancouver, Canada.

<https://www.doi.org/10.1109/IROS.2017.8206183>

Dupeyroux, J., Diperi, J., Boyron, M., Viollet, S., et Serres, J. (2017, Septembre). *A bio-inspired celestial compass applied to an ant-inspired robot for autonomous navigation*. Dans : Mobile Robots (ECMR), 2017 European Conference on (pp. 1-6), Paris, France. **Best paper award**.

<https://www.doi.org/10.1109/ECMR.2017.8098680>

Dupeyroux, J., Passault, G., Ruffier, F., Viollet, S., et Serres, J. (2017, Juillet). *Hexabot: a small 3D-printed six-legged walking robot designed for desert ant-like navigation tasks*. Dans : IFAC World Congress 2017 (pp. 1628-1631), Toulouse, France.

<https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01643176/>

Conférences nationales

Dupeyroux, J., Viollet, S., et Serres, J. (2017, Novembre). *Providing an autonomous hexapod walking robot with the ability to reorientate : application of a novel ant-inspired celestial compass*. Dans : Journées Jeunes Chercheurs en Robotique 2017, Bayonne, France.

https://jjcr2017.sciencesconf.org/data/pages/JJCR17_DUPEYROUX_Julien.pdf

Posters

Dupeyroux, J., Diperi, J., Boyron, M., Viollet, S., et Serres, J. (2017, Septembre). *A bio-inspired celestial compass for a hexapod walking robot in outdoor environment*. Dans : IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Vancouver, Canada.

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01643182v1>

Dupeyroux, J., Diperi, J., Boyron, M., Viollet, S., et Serres, J. (2017, Juin). *A bio-inspired celestial compass for a hexapod walking robot in outdoor environment*. Dans : 13ème Journée de l'Ecole Doctorale 463, Montpellier, France.

<https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01915658/>

Diffusion en ligne

Les sources sont disponibles sur mon compte GitHub :

<https://github.com/JuSquare/AntBot/>

Vulgarisation scientifique

Dupeyroux, J. *AntBot, un petit robot à six pattes capable de naviguer sans GPS, à la manière des fourmis du désert*. A paraître dans : The Conversation (2019).

Dupeyroux, J. *AntBot is able to go home like desert ants*. Dans : The Science Breaker (2019, Mai).

<http://theconversation.com/ce-petit-robot-qui-navigue-sans-gps-comme-une-fourmi-116700>

Dupeyroux, J., Serres, J., et Viollet, S. *AntBot : un robot fourmi autonome qui navigue sans GPS*. Dans : La Lettre de Grand Luminy Technopôle, no. 100 (2019, Mai).

Présentation du robot AntBot au salon Viva Technology du 16 au 18 mai 2019 à Paris, Parc des Expositions et Palais des Sports, stand Robot Park.

Un robot à pattes sans GPS. Podcast réalisé par Barbara Vignaux, Universcience - Palais des Découvertes, Cité des Sciences et de l'Industrie (2019).

<http://www.universcience.tv/video-un-robot-a-pattes-sans-gps-26810.html>

AntBot : le robot fourmi. Reportage réalisé par le CNRS (2019).

<https://www.youtube.com/watch?v=ddgbWEhBdIQ>

Quand l'intelligence artificielle s'inspire du vivant. Conférence Opera Mundi (Chateauneuf-le-Rouge, Novembre 2018).

L'envolée Scientifique. Documentaire réalisé par Kenza Chattar du Département SATIS (Sciences Arts et Techniques de l'Image et du Son) de la faculté des Sciences de l'Université d'Aix-Marseille (2017).

<https://vimeo.com/channels/docscientifiques/235305762>

Couverture médiatique

Science - *This ant-inspired robot can navigate better than civilian GPS.*

Nature Electronics - *AntBot makes its own way home.*

Wired - *A 6-legged robot stares at the sky to navigate like a desert ant.*

Digital Trends - *Ant-inspired walking robot navigates without GPS by using polarized light.*

New Scientist - *Robot mimics desert ants to find its way home without GPS.*

de Volkskrant - *Robot weet de weg zonder gps dankzij woestijnmier.*

Le Monde - *AntBot, un robot autonome inspiré par des fourmis du désert.*

Challenges, Reuters - *Un robot à pattes qui a le sens de l'orientation.*

Les Echos - *Un capteur peu coûteux pour naviguer sans GPS.*

France Inter - *C'est une innovation marquante: ce robot-fourmi s'oriente sans GPS.*

CNRS - *Le premier robot à pattes qui se déplace sans GPS.*

Cité des Sciences et de l'Industrie - *Robot à pattes sans GPS.*

La Provence - *Marseille : le robot inspiré de la fourmi du désert.*

La Marseillaise - *Un robot qui se déplace sans GPS conçu à Marseille.*

Futura Science - *Voici Antbot, un robot inspiré des fourmis et qui se déplace sans GPS.*

Science et Avenir - *Ce robot se déplace en se repérant comme les fourmis du désert.*

Science et Vie - *Ce robot réussit à s'orienter grâce à la lumière du soleil.*

Trust My Science - *AntBot: le tout premier robot évoluant sans GPS pour se repérer.*

France24 - Emission Tech 24 du 22 Février 2019.

M6 - Journal télévisé 12.45 du 19 Février 2019.

France2 - Emission Télématin du 30 Avril 2019.

AAAS | Science nature electronics REUTERS

Le Monde cité VIVA MAY 16-18 2019 PARIS TECHNOLOGY sciences et industrie

inter france FUTURA ChallengeS La Marseillaise La Provence

SCIENCE & VIE TRUST MY SCIENCE WIRED SCIENCES ET AVENIR

FRANCE 24

6

euro news.

NOVA

Les Echos.fr

NewScientist

DIGITAL TRENDS



Table des matières

Remerciements	3
Résumé	5
Abstract	7
Diffusion des résultats	9
Liste des figures	17
Liste des tableaux	21
Liste des abréviations	23
Préambule	25
1 Développement de deux robots hexapodes bio-inspirés	29
1.1 Six pattes, ni plus, ni moins	29
1.2 La robotique hexapode : 50 ans de développement	29
1.2.1 La robotique à pattes, une mobilité tout-terrain	30
1.2.2 Les bénéfices des nouvelles technologies	40
1.3 Hexabot, le premier prototype d'insectoïde	42
1.3.1 De Metabot à Hexabot	42
1.3.2 Une tête pour observer	43
1.3.3 Architecture électronique	43
1.3.4 Le patron locomoteur d'Hexabot	43
1.3.5 Stabilité et vitesse de déplacement	45
1.4 Vers une plateforme améliorée	48
1.4.1 Le robot hexapode AntBot	48
1.4.2 Performances dynamiques	49
1.5 Conclusion	50
2 Le compas céleste	55
2.1 Une démarche inspirée des insectes	55
2.1.1 L'œil composé	55
2.1.2 La polarisation de la lumière du ciel	58
2.1.3 La vision polarisée chez les insectes	61

2.2	Etat de l'art des compas célestes	64
2.3	Développement d'un compas céleste parcimonieux	66
2.3.1	Motivations	66
2.3.2	Le compas céleste en bande UV	66
2.3.3	Méthode de détermination du cap : la méthode d'AntBot	67
2.3.4	Caractérisation en lumière contrôlée	70
2.3.5	Reconstruction des éphémérides	72
2.4	Performances en conditions réelles	73
2.4.1	Les algorithmes d'extraction de l'angle de polarisation	73
2.4.2	Performances en fonction de la couverture nuageuse	78
2.4.3	Expériences simples de suivi de cap avec Hexabot	82
2.4.4	Comparaison avec un magnétomètre en zone urbaine	85
2.4.5	Comment mesurer le cap de manière absolue?	86
2.5	Extension des applications de la boussole céleste	87
2.5.1	Réduction de la résolution angulaire	87
2.5.2	Détection de la polarisation sous les arbres	89
2.5.3	Exploitation sous-marine du compas céleste	90
2.6	Conclusions sur la boussole céleste bio-inspirée	94
3	Navigation autonome : l'intégration de chemin	97
3.1	Introduction	97
3.2	La navigation chez les fourmis du désert	99
3.2.1	Les fourmis Cataglyphis	99
3.2.2	L'intégrateur de chemin, un fil d'Ariane	100
3.2.3	Les autres modes de navigation	102
3.3	Odométrie : le flux optique	104
3.3.1	Le flux optique chez les insectes	104
3.3.2	Etat de l'art des capteurs de flux optique	105
3.3.3	M ² APix, le capteur de flux optique bio-inspiré	106
3.3.4	Mesure du flux optique et estimation de distance parcourue	107
3.3.5	Calibration en lumière contrôlée	108
3.4	L'intégrateur de chemin d'AntBot	110
3.4.1	L'algorithme de navigation	110
3.4.2	Les modèles d'intégration de chemin	111
3.5	Démonstration de faisabilité	114
3.5.1	Objectifs	114
3.5.2	Protocole expérimental	114
3.5.3	Résultats et conclusions	114
3.6	Navigation autonome en conditions extérieures	116
3.6.1	Les contextes expérimentaux	116
3.6.2	Un positionnement centimétrique	116
3.7	Le cas du véhicule intelligent	120
3.8	Conclusions sur l'intégrateur de chemin	123
	Conclusion générale	127

Epilogue	133
Bibliographie	134
ANNEXES	156
A Modèles géométrique et dynamique	156
A.1 Modèle géométrique direct et inverse	156
A.2 Modèle dynamique du robot	162
B Vue CAO du robot Hexabot	165
C L'intégration de chemin à l'échelle neuronale	166
D Implémentation électronique du compas céleste	167
E Analyse de la marche du robot Hexabot	170
F Démonstration de la formule de calcul de l'angle de polarisation	176
G Panneaux texturés utilisés pour la génération du flux optique	177
H Résultats obtenus avec le mode PI-ST	178
I Résultats obtenus avec le mode PI-OF-ST	179
J Résultats obtenus avec le mode PI-ST-Fuse	180
K Résultats obtenus avec le mode PI-POL-ST	181
L Résultats obtenus avec le mode PI-Full	182
M Vision panoramique	183
M.1 Le capteur	183
M.2 Détection d'obstacles	184
M.3 Navigation	186

Liste des figures

1.1	Les tous premiers hexapodes	31
1.2	Des robots tout-terrains hors normes	32
1.3	Le véhicule hexapode Mantis	33
1.4	Les robots de type RHex	34
1.5	Les robots LAURON II et V de FZI	36
1.6	Les hexapodes Genghis et Hannibal	37
1.7	Les hexapodes du CWRU	38
1.8	Le robot d'exploration lunaire CREX	39
1.9	Le robot fourmi BionicANT (Festo)	40
1.10	Des robots hexapodes open-source	41
1.11	Le robot MorpHex	41
1.12	Le robot Hexabot à sa conception	42
1.13	La tête du robot Hexabot	43
1.14	Schéma synoptique de l'architecture électronique du robot Hexabot	44
1.15	Patron locomoteur du robot Hexabot	45
1.16	Trajectoires 2D du robot Hexabot	47
1.17	Photographie du robot AntBot	48
1.18	Actionnement de la tête du robot	49
1.19	Performances dynamiques de la locomotion chez AntBot	50
1.20	Hauteur du robot AntBot	51
1.21	Actionneurs optimisés (HEBI Robotics, CMU)	52
2.1	L'œil composé chez ma fourmi	56
2.2	L'œil composé chez les arthropodes	57
2.3	Vue <i>fisheye</i> de la voûte céleste	58
2.4	Vision du ciel à travers des filtres polarisés	59
2.5	Le motif de polarisation de la lumière du ciel	60
2.6	Principe physique de la polarisation linéaire	60
2.7	Diagramme de répartition du degré de polarisation linéaire	61
2.8	La sensibilité spectrale de la DRA des insectes	62
2.9	Le traitement neuronal de la lumière polarisée chez les insectes	63
2.10	Diverses implémentations de compas célestes	65
2.11	Le compas céleste	67
2.12	Signaux de sortie des unités de polarisation	68
2.13	Détermination du cap	69
2.14	Caractérisation du champ de vision du compas céleste	71
2.15	Bruit de mesure du compas céleste	71

2.16 Effet de l'élévation solaire sur la mesure du cap	72
2.17 Ephéméride solaire projetée	73
2.18 Variation de l'élévation solaire	74
2.19 Choix de $\Delta\psi$	76
2.20 Contexte expérimental pour l'évaluation des performances du compas céleste	79
2.21 Détermination du cap en conditions réelles	80
2.22 Performances statistiques du compas (1)	81
2.23 Performances statistiques du compas (2)	82
2.24 Exemple de réorientation du robot après une perturbation en lacet	83
2.25 Performances en correction de cap	84
2.26 Expérience de maintien du cap avec Hexabot	85
2.27 Comparaison entre le compas céleste et un magnétomètre	86
2.28 Résolution de l'ambiguïté solaire sur l'angle de cap	87
2.29 Détermination du cap à basse résolution	88
2.30 Erreurs de cap à basse résolution	88
2.31 Détection de la polarisation sous les arbres	90
2.32 Vision polarisée sous l'eau	91
2.33 Courbes issues du capteur de polarisation en cas de pluie - 1	92
2.34 Diagrammes en boîte - Détection de l'angle en cas de pluie	92
2.35 Courbes issues du capteur de polarisation en cas de pluie - 2	93
2.36 Expérimentation dans une cuve de 1 m ³ d'eau douce	94
3.1 Trois espèces de fourmis du genre <i>Cataglyphis</i>	99
3.2 L'intégration de chemin chez les fourmis du désert	101
3.3 Le guidage visuel panoramique	103
3.4 Le flux optique chez les insectes	104
3.5 Exemples de rétines artificielles	106
3.6 Le capteur de flux optique M ² APix	107
3.7 Calcul du flux optique	108
3.8 Caractérisation du capteur de flux optique M ² APix	109
3.9 Principe de l'intégrateur de chemin	110
3.10 Vitesse d'avance en ligne droite d'AntBot	113
3.11 Navigation autonome : démonstration de faisabilité	115
3.12 Résultats de navigation - Groupe A	117
3.13 Résultats de navigation - Groupe B	118
3.14 Résultats de navigation - Groupe C	119
3.15 Tableau récapitulatif des performances de navigation	120
3.16 Performances navigationnelles en fonction du critère de succès	121
3.17 Trajectoire de comparaison GPS/Compas céleste dans Marseille	121
3.18 Compas céleste vs. GPS en environnement urbain - 1	122
3.19 Compas céleste vs. GPS en environnement urbain - 2	123
3.20 Dépôt de brevet - Compas céleste embarqué sur un véhicule	124
A.1 Modélisation cinématique d'un robot hexapode.	157
B.1 Vue CAO du robot Hexabot	165
C.1 L'intégrateur de chemin à l'échelle neuronale	166
D.1 Implantation des composants du contrôleur du compas céleste	168

D.2	Connections externes du contrôleur du moteur pas-à-pas	168
D.3	Routage de la carte électronique	169
E.1	Analyse de la marche - $V = 13.6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ et $H = 80$	170
E.2	Analyse de la marche - $V = 13.2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ et $H = 120$	171
E.3	Analyse de la marche - $V = 16.9 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ et $H = 145$	172
E.4	Analyse de la marche - $V = 23.1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ et $H = 80$	173
E.5	Analyse de la marche - $V = 23.1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ et $H = 120$	174
E.6	Analyse de la marche - $V = 21.8 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ et $H = 145$	175
G.1	Panneaux texturés utilisés pour la génération du flux optique	177
H.1	Résultats obtenus avec le mode PI-ST	178
I.1	Résultats obtenus avec le mode PI-OF-ST	179
J.1	Résultats obtenus avec le mode PI-ST-Fuse	180
K.1	Résultats obtenus avec le mode PI-POL-ST	181
L.1	Résultats obtenus avec le mode PI-Full	182
M.1	La vision panoramique embarquée sur Hexabot et AntBot	183
M.2	Représentations polaire et cartésienne de l'image panoramique	183
M.3	Contexte expérimental - Détection d'obstacle par flux optique panoramique	184
M.4	Détection d'obstacle par flux optique panoramique	185
M.5	Navigation visuelle - 1	186
M.6	Navigation visuelle - 2	187

Liste des tableaux

1.1	Paramètres de locomotion du robot	44
1.2	Analogie dynamique avec la fourmi	46
1.3	Comparaison des servomoteurs XL-320 et AX-18A (Dynamixel)	48
2.1	Classification non-exhaustive des compas célestes	64
2.2	Performances statistiques du compas céleste en environnement réel	80
2.3	Performances du compas céleste à résolution angulaire basse	89
2.4	Estimation de l'angle de polarisation (AdP) sous les canopées.	90
3.1	Constante β pour l'odométrie	113
3.2	Préférence UV chez certains insectes	130
A.3	Paramètres de D-H d'une patte à 3 degrés de liberté	158
D.1	Table de vérité de la résolution des pas	167

Liste des abréviations

Nomenclature

AdP	Angle de Polarisation
AVM	Arène de Vol de la Méditerranée
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CCD	Dispositif à transfert de charge (<i>Charge Coupled Device</i>)
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
DEM	Détecteur Élémentaire de Mouvement
DPL	Degré de Polarisation Linéaire
DRA	Aire dorsale marginale (<i>Dorsal Rim Area</i>)
DVS	Caméra événementielle (<i>Dynamic Vision Sensor</i>)
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IMU	Centrale inertielle (<i>Inertial Measurement Unit</i>)
LiDAR	téledétection par laser (<i>Light Detection and Ranging</i>)
LSB	Bit de poids faible (<i>Least Significant Bit</i>)
PLA	Acide Polylactique (<i>Poly-Lactic Acid</i>)
PID	Proportionnel Intégral Dérivé
SLAM	Cartographie et localisation simultanées (<i>Simultaneous Localization and Mapping</i>)
UV	Ultraviolet
WTA	<i>Winner-take-all</i>

Modes de navigation

PI-ST	Mode de navigation par comptage de pas pour l'estimation de l'orientation et de la distance.
PI-ST-OF	Mode de navigation par flux optique (distance) et comptage de pas (orientation).
PI-ST-Fuse	Mode de navigation par fusion du flux optique et du comptage de pas (distance), et comptage de pas pour l'estimation du cap.
PI-POL-ST	Mode de navigation par comptage de pas (distance) et mesure de la lumière polarisée pour la détermination du cap.
PI-Full	Mode de navigation par fusion du comptage de pas et du flux optique (distance), et mesure de la lumière polarisée (orientation).

Préambule

Etat des stratégies de navigation utilisées 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 dégâts considérables (ex. : après un tremblement de terre), 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 (ex. : projet norvégien de développement du tout premier porte-conteneurs autonome et entièrement électrique, le Yara Birkeland); et enfin les applications militaires telles que les missions de reconnaissance.

Le GPS civil (*Civilian Global Positioning System*) 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’occlusion, etc.) [185]. 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 occlusions 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 [91, 158, 249]. 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.) [149, 229]. 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 [162]. On peut également

mentionner les méthodes par détection laser (LIDAR), lesquelles fournissent des données de haute résolution très intéressantes [63]. 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 [261]. 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 fusions de données existent déjà, à l'instar des projets de voitures autonomes impulsés par Google et Tesla, mais force est de constater que le Graal de la navigation autonome reste à déterminer.

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 E. J. Marey, nous avons choisi de nous intéresser aux stratégies de navigation développées par les fourmis du désert, 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 [248]. 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) [99];
- 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 [128], mais aussi ceux de Horn et Schunck [109], et ceux de Lucas et Kanade [150]. 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 [137]. 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 [28, 140]. 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 d'être utilisé comme mécanisme complémentaire visant à consolider la robustesse de l'estimation de position.

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. 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 doctoral, appuyée notamment par le contexte du développement d'une stratégie de navigation inspirée des fourmis, dotées de six pattes. Ajoutons que la robotique hexapode bénéficie d'une histoire en recherche et développement vieille de 50 ans, et qu'en dépit de notre connaissance accrue des procédés de locomotion, aucun projet de navigation autonome ne semble avoir vu le jour avec ces robots.

Intrinsèquement conditionné par les paradigmes de la bio-inspiration et du biomimétisme, ce robot insectoïde s'avère offrir un spectre de possibilités bien plus vaste. Initialement destiné à tester des capteurs et des algorithmes inspirés d'études comportementales et physiologiques faites chez les fourmis du désert, avec une structure articulée dont l'organisation et le mode de locomotion, mimant celui des fourmis, offre des perturbations visuelles semblables à celles que subissent ces insectes. Les retombées en termes de réflexion sur la plausibilité de ces modèles biologiques sont une raison significative de parier sur la robotique à pattes pour tester notre intégrateur de chemin.

Organisation du manuscrit

Etant données ses thématiques liées à la robotique, la navigation et la bio-inspiration, cette thèse est avant tout pluridisciplinaire. Il a donc été choisi d'organiser ce manuscrit comme suit :

Chapitre 1 – Après un état de l’art exhaustif des robots hexapodes développés au cours des 50 dernières années, ce chapitre dresse les critères nécessaires à la conception d’un robot hexapode performant et robuste. Les robots Hexabot et AntBot sont alors présentés et comparés à l’art antérieur.

Chapitre 2 – S’inspirant de la vision de la polarisation des fourmis du désert, le compas céleste est introduit. Ses performances en conditions expérimentales de laboratoire mais également en environnement réel à l’extérieur sont mesurées et analysées. Son utilisation en milieu altéré (sous des arbres et sous l’eau) est mise en avant.

Chapitre 3 – Ce chapitre, clé de voûte de ce projet doctoral, aborde les mécanismes de navigations implémentés et testés avec le robot AntBot. Il permet de faire la lumière sur les diverses modalités sensorielles requises pour atteindre des performances de localisation optimales en extérieur. Le chapitre conclut sur une possible application du compas céleste à la voiture autonome.

Chapitre 1

Développement de deux robots hexapodes bio-inspirés

1.1 Six pattes, ni plus, ni moins

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 même de concevoir un robot bipède, se justifie également d'un point de vue efficacité. En effet, les robots quadrupèdes consomment moins d'énergie mais sont par essence très instable. 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.

1.2 La robotique hexapode : 50 ans de développement

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 des structures mécatroniques elles-mêmes, qu'au niveau algorithmique pour le développement de la locomotion adaptative. Les avantages qu'offrent de tels robots sont nombreux, et le fait est que 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 for-

midable 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. Cette section introduit une description et une classification quasi-exhaustive des robots hexapodes développés de 1969 à nos jours.

1.2.1 La robotique à pattes, une mobilité tout-terrain

1.2.1.1 Les premiers robots

Le robot hexapode de Mocchi, Petternella et Salinari de l’Istituto di Automatica, Université de Rome (développement initié en 1969), est certainement le tout premier exemple de ces machines (Fig. 1.1) [160, 176]. Chaque patte était dotée de 3 degrés de liberté : deux pour les articulations du genou et une pour celle de la hanche (charnière). Ainsi, le robot était capable d’adopter une locomotion semblable à celle des insectes, mais ne pouvait cependant que marcher en ligne droite. Plus tard, Gurfinkel et al. (Académie des Sciences de Russie, Moscou) ont développé Masha [51, 90], un robot hexapode inspiré des blattes et doté d’algorithmes visant à offrir au robot la capacité d’adapter sa motricité en fonction de la nature du terrain (comme descendre des escaliers, voir Fig. 1.1), et d’éviter des obstacles. Masha peut au besoin être autonome ou contrôlé par un téléopérateur. Totalisant près de 30 ans de développement, Masha était également un robot compliant, une propriété jusqu’à lors peu observable en robotique. De leur côté, les américains ont également travaillé à la conception d’une plateforme robotique hexapode. En marge du projet Masha de l’ex-URSS, les américains McGhee et al. du département d’Ingénierie Electrique de l’Université de l’Ohio (OSU) présentèrent pour la première fois en 1976 leur robot hexapode (Fig. 1.1) [155, 169] : il s’agissait d’un robot non-autonome [168], possédant 3 degrés de liberté par patte (2 pour la hanche, 1 pour le genou), destiné à étudier la compliance active comme moyen de simplifier les algorithmes de locomotion [126], pour développer et tester des architectures de contrôle. En 1980, Kessiss et al. de l’Université Paris VIII ont développé un robot hexapode hautement compliant avec seulement deux degrés de liberté par patte (Fig. 1.1) [122]. Une fois encore l’objectif était de d’élaborer des algorithmes de locomotion intelligents et inspirés du vivant en considérant une approche du contrôle moteur de type réflexe [121].

On comprend d’ores et déjà que la robotique hexapode s’est très rapidement orientée vers des structures mécatroniques à 18 degrés de liberté, dont la finalité scientifique fut la locomotion. Quant à leurs dimensions caractéristiques, ces robots étaient généralement massifs et lents : Masha pesait 22 kg pour 70 cm d’envergure, et le robot de l’OSU pesait 103 kg pour 140 cm d’envergure. Naturellement la vitesse maximale de ces machines s’en trouvait limitée puisque ces robots atteignaient respectivement $7\text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ et $20\text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. Ainsi, tout déploiement sur le terrain était inenvisageable au-delà du cadre expérimental en conditions de laboratoire.

Au début des années 1980, Stephen Bartholet (1942-1999) était ingénieur senior en mécanique à Odetics ITS Inc. Avec Joel Slutzky, alors PDG de l’entreprise, ils conçurent Odex

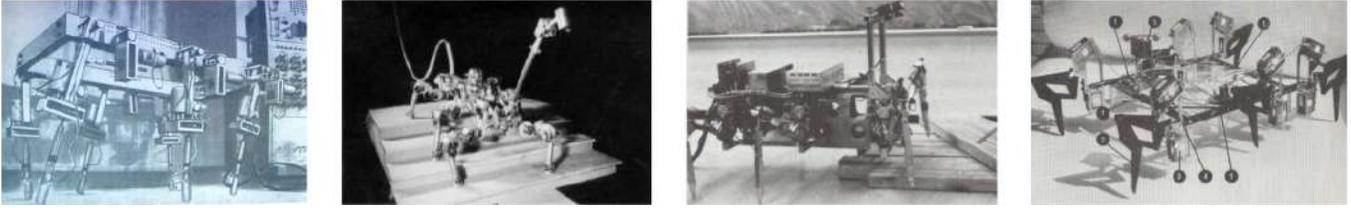


FIGURE 1.1 – Les tous premiers robots hexapodes développés de la fin des années 1960 au début des années 1980. De gauche à droite : robot de Mocchi et al. (Crédits : Instituto di Automatica, Université de Rome, 1969); Masha (Crédits : Académie de Sciences de Russie, 1981); robot OSU de McGhee (Crédits : Jean Vertut, 1976); robot de Kessiss et al. (Crédits : LRIA, Université Paris VIII, 1980).

1, un robot hexapode aux proportions hors normes (Fig. 1.2A) [8, 198]. L'objectif était alors de mettre au point un robot marcheur capable d'assister l'homme dans un environnement complexe tel qu'un incendie, le nettoyage de déchets toxiques ou en cas d'accident nucléaire. Odex 1 fut présenté pour la première fois en 1983 : c'était un robot hexapode à 18 degrés de liberté, pesant 150 kg et doté d'actionneurs hydrauliques. Pouvant avancer à une allure de $50\text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, il s'utilisait en mode téléopéré. Le robot fut notamment acheté par l'armée américaine, mais également par le département américain de l'agriculture et la NASA. Fort de son succès, Odetics ITS Inc. continua le développement de son robot dont la troisième version, ROBIN (ROBotic INsect), était capable d'escalader des surfaces orientées jusqu'à 30° , mais également de monter des marches dont la hauteur pouvait atteindre 45 cm [152]. Le robot était équipé de 18 degrés de liberté destinés à la locomotion, ainsi que de 7 degrés de liberté supplémentaires inclus dans un bras manipulateur équipé d'une pince. Destiné à être déployé dans les centrales nucléaires, ROBIN était semi-autonome et nécessitait l'intervention de téléopérateurs.

Très rapidement, les robots hexapodes ont donc pu être utilisés pour assister l'homme ou pour explorer des environnements accidentés. Mais à partir de 1985, le département de technologie marine du JAMSTEC (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology) est allé plus loin en développant un robot sous-marin hexapode holonome inspiré des insectes et comprenant 18 degrés de liberté : AquaRobot (Fig. 1.2B) [1]. Cet imposant robot de 280 kg pouvait descendre jusqu'à 50 m de profondeur tout en s'adaptant à la nature du sol marin grâce aux capteurs tactiles dont il était équipé. Plus tard dans les années 1990, Koyachi et al. du laboratoire d'ingénierie mécanique (AIST, MITI, Japon) ont développé les robots hexapodes Melmantis I et II inspirés de la mante religieuse [131, 132]. Les deux robots pouvaient, à l'instar des mantes, se servir de leurs pattes comme de bras. Melmantis I possédait 21 degrés de liberté pour la locomotion : trois pattes avec 4 degrés, et les trois autres avec 3 degrés. Du fait de son instabilité, son successeur sera doté de 4 degrés de liberté sur chaque patte. Issu d'une collaboration entre le Jet Propulsion Laboratory (JPL) de la NASA et la Carnegie Mellon University de Pittsburg (USA), le robot Ambler (Autonomous MoBile Exploration Robot) était destiné à être déployé sur des sols accidentés à grande échelle tels que celui de Mars [6, 69]. Les dimensions caractéristiques de ce robot sont incroyables : pesant plus de 2500 kg pour une envergure maximale de 7 m , Ambler ne pouvait dépasser la vitesse de $35\text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$. Ces proportions gigantesques avaient été retenues pour permettre au robot de faire face à la grande irrégularité du sol martien. Au travers du JPL, la NASA a développé de nombreux autres robots hexapodes comme par exemple la classe de robots LEMUR (Limbed Excursion Mechanical Utility Robots) [118]. Les robots hexapodes LEMUR I et LEMUR

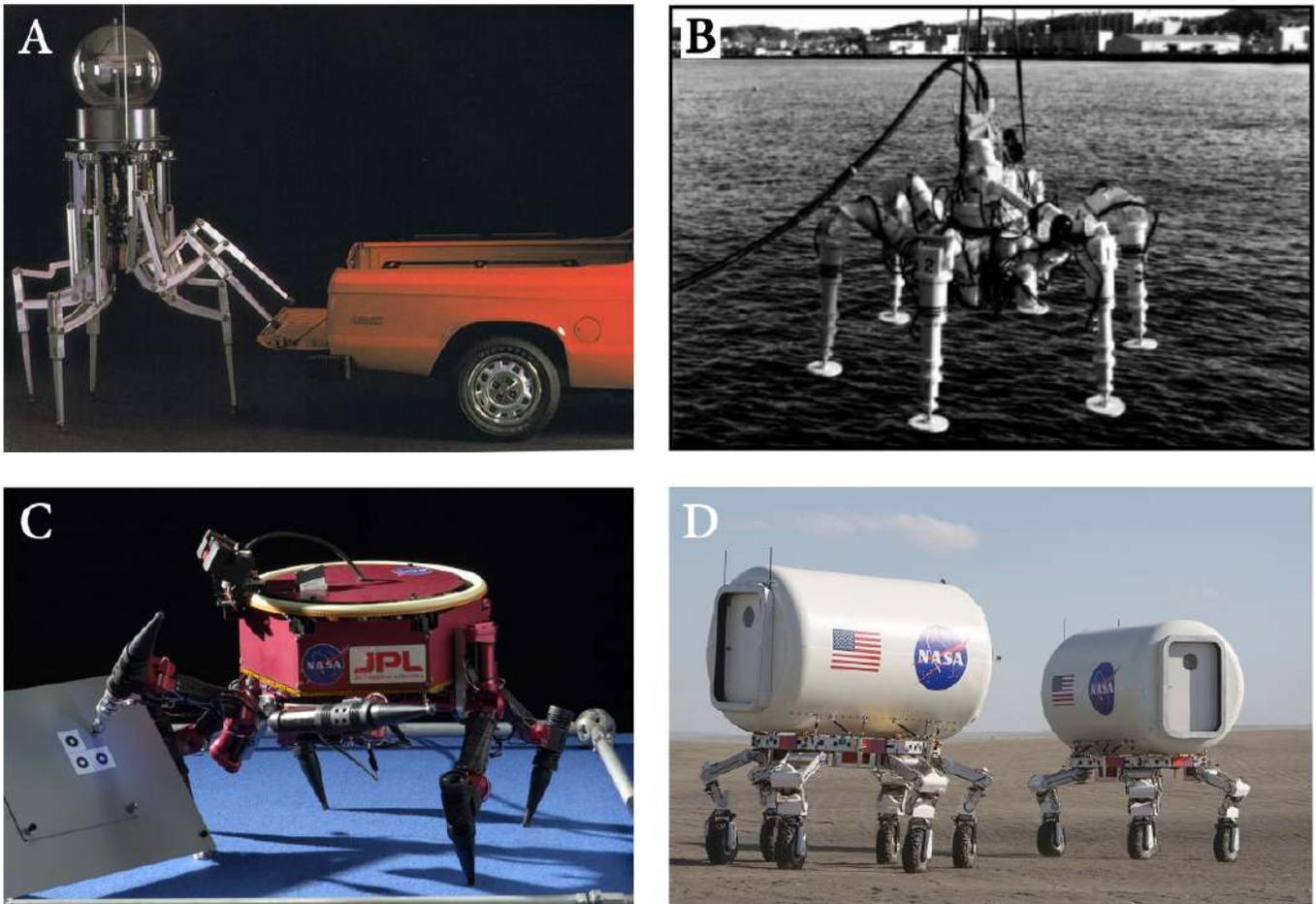


FIGURE 1.2 – Des robots tout-terrains hors normes. **A** Odex 1 (Crédits : Odetics ITS Inc.). **B** AquaRobot (Crédits : JAMSTEC). **C** LEMUR IIa (Crédits : NASA JPL). **D** Athlete (Crédits : NASA JPL).

IIa ont été conçus pour atteindre un haut niveau de flexibilité opérationnelle (masse et volume), mais également pour réaliser des mouvements très complexes. LEMUR IIa est doté de 4 degrés de liberté par patte et est capable d'adapter ses mouvements dynamiquement lorsqu'il marche ou grimpe des terrains très encombrés (Fig. 1.2C). Plus récemment, Athlete (All-Terrain Hex-Limbed Extra-Terrestrial Explorer) est un robot hexapode doté de roues aux extrémités de ses pattes (Fig. 1.2D) [215, 251]. Il est prévu pour le transport d'infrastructures lors de prochaines explorations lunaires.

En 2012 fut présentée la première version de Mantis, un grand robot hexapode construit par Matt Denton et son entreprise Micromagic Systems conçu pour être piloté par un opérateur installé à l'intérieur du cockpit du robot (Fig. 1.3). Haute de 2.80 m, cette structure pèse 1900 kg et utilise des vérins hydrauliques pour se déplacer et exécuter des mouvements complexes. Il peut atteindre une vitesse maximale de $1.6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Avec trois degrés de liberté par patte, Mantis possède une configuration mécatronique typique des robots hexapodes. Denton et al. ont développé un contrôleur de mouvement, HexEngine, opérant sous Linux et nécessitant cependant une intervention humaine pour piloter le robot à l'aide d'un joystick présent dans le cockpit. Du fait de ses dimensions, le robot Mantis est considéré comme l'une des plus grosses machines mobiles, et sans doute l'un des projets d'ingénierie mécatronique les plus extravagants !



FIGURE 1.3 – Le véhicule hexapode Mantis (Crédits : Matt Denton, Micromagic Systems).

Ainsi à la fin des années 1990, les robots hexapodes étaient capables d'être déployés sur terre et en mer, d'adapter leur locomotion au type de sol rencontré, d'évoluer de manière pratiquement autonome, et pouvait être équipés de pattes réversibles, c'est-à-dire pouvant servir de bras manipulateur. Mais la taille et le poids de ces robots reste une limite considérable et l'accent sera donné par la suite à la miniaturisation des actuateurs et, par conséquent, des robots eux-mêmes.

1.2.1.2 Vers une miniaturisation

Miniaturisation par le mouvement

Une première manière d'envisager la miniaturisation des robots hexapodes peut tout simplement résider dans la réduction du nombre de degrés de libertés. Martin-Alvarez et al. de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) ont développé en 1996 un robot hexapode à seulement 6 degrés de liberté appelé PROLERO (PROtotype of LEgged ROVer) [154]. Chaque degré de liberté consistait en un moteur permettant de mettre la patte en rotation, changeant ainsi considérablement la manière de penser la marche. Ce principe a largement été repris depuis, le plus célèbre exemple étant la plateforme robotique bio-inspirée RHex, dont le développement a été majoritairement supporté par la DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) et l'armée américaine. De nombreux prototypes furent développés, à l'image du robot du laboratoire Kod*lab, de l'Université de Pennsylvanie (USA) (Fig. 1.4A) [200]. Ce petit robot de 7 kg peut atteindre une vitesse maximale de $270 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. La simplicité de son mécanisme de déplacement fait de lui un robot tout-terrain rapide et robuste, pouvant s'adapter à une large gamme de terrains. De nombreuses déclinaisons du robot furent mises au point, parmi lesquelles EduBot [21], une version plus petite destinée à l'enseignement et à la recherche (Fig. 1.4B), mais aussi SandBot, utilisé pour étudier la locomotion dans le sable [146]. Une

version avancée de RHex a également été reprise par Boston Dynamics (Fig. 1.4D), une entreprise spécialisée dans la robotique mobile de terrain destinée à assister l'armée américaine¹. Parallèlement au projet américain RHex, les chercheurs de l'institut de robotique de l'Université Technique de Delft (Pays-Bas) ont conçu Zebro (Fig. 1.4C), un petit robot autonome tout à fait semblable à RHex et ayant pour objectif d'étudier les algorithmes d'apprentissage par renforcement dans le cadre du contrôle moteur, dans le cadre de la parcimonie écologique (faible énergie, mouvements optimisés, contrôle simplifié) [119, 147]. Zebro doit également servir à tester des algorithmes de navigation, nouvelle étape dans le développement de la robotique hexapode.

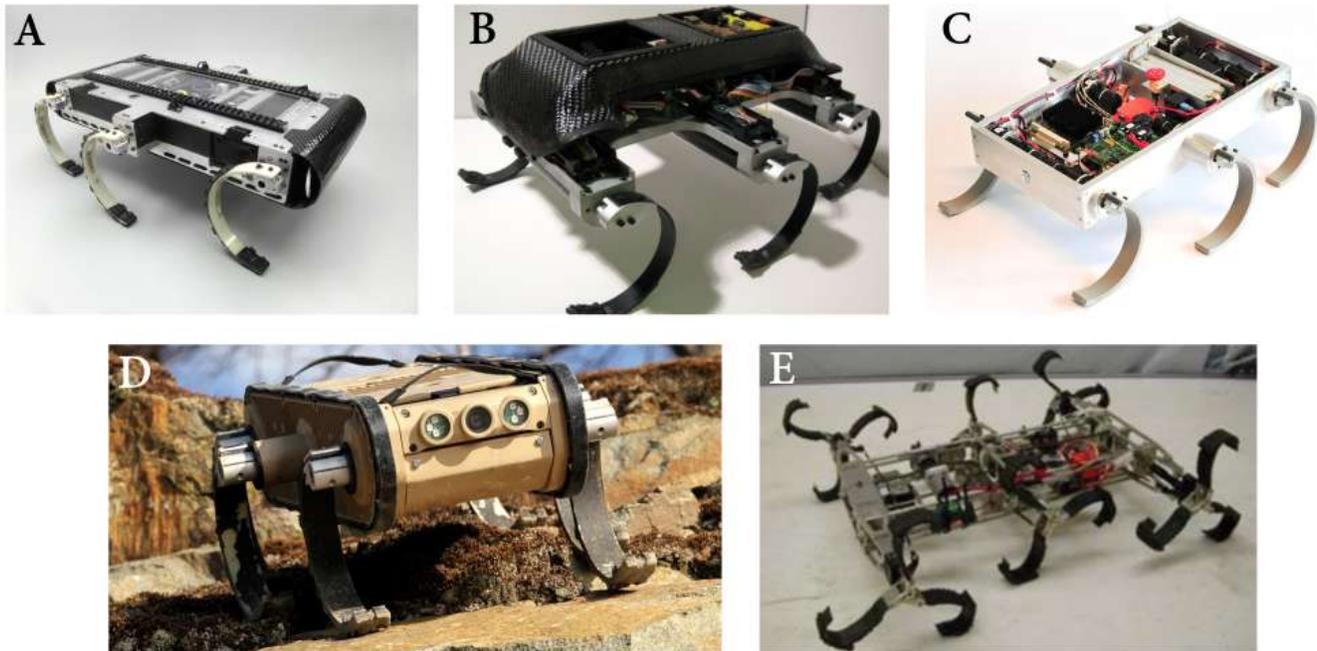


FIGURE 1.4 – Les robots de type RHex. **A** X-RHex, la dernière version du projet (Crédits : Kod*lab). **B** EduBot (Crédits : Kevin Gallowat, Kod*lab). **C** Zebro (Crédits : TU Delft). **D** Version militaire (Crédits : Boston Dynamics). **E** Whlegs VP (Crédits : CWRU).

Le groupe de recherche Biorobotics de l'Université Case Western Reserve (CWRU) ont développé la série de robots Whlegs (contraction de *wheel* et *legs*) inspirés des blattes [2, 181, 209]. Ces robots ont un mécanisme de locomotion combinant les avantages de la roue et de la marche. Il y a deux évolutions majeures depuis les prototypes RHex. Tout d'abord, ces robots sont dotés de six pattes à trois branches, ou de six roues à trois pattes, selon que l'on les considère comme des rovers ou des comme des robots marcheurs. Ensuite, un seul et unique moteur est utilisé pour entraîner les pattes et ainsi propulser le robot. Whlegs n'a donc qu'un seul degré de liberté actif, un record d'autant plus conséquent au regard des performances obtenues. En effet, le premier prototype Whlegs I peut escalader des obstacles jusqu'à 15 cm de hauteur et peut atteindre une vitesse de marche élevée : jusqu'à $5.5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. La génération suivante Whlegs II inclut un degré de liberté supplémentaire afin de plier le châssis lorsqu'il monte sur un obstacle. Cette modification était nécessaire pour éviter le risque que les pattes du milieu ne tourne dans le vide, et par conséquent que le robot ne soit

1. <https://www.bostondynamics.com/rhex>

bloqué. La flexion du corps permet également d'escalader des obstacles plus hauts. Whegs VP est quant à lui capable de franchir des obstacles hauts de 30 cm et d'évoluer aisément sur des terrains glissants (Fig. 1.4E).

Sur le même concept que RHex, TAYLRoACH (Tail Actuated Yaw Locomotion Robotic Autonomous Crawling Hexapod) est un petit robot inspiré des blattes, doté de 2 degrés de liberté et mesurant seulement 10 cm de long pour une masse totale de 48 g [129]. Il est capable de se déplacer avec une vitesse de $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et de tourner à près de $400^\circ \cdot \text{s}^{-1}$. Pour permettre une telle prouesse, les pattes incurvées ne sont pas mises en rotations mais vibrent à très hautes fréquences. La compliance passive des pattes permet au robot de se déplacer sur des sols accidentés (herbe, cailloux). En plus des stratégies mettant à profit la cinématique des pattes, une queue comportant une masse à son extrémité, et positionnée à l'arrière de robot, est utilisée pour faire tourner ce-dernier très rapidement. La fusion de ces stratégies permet au robot de bénéficier d'une précision suffisante pour naviguer dans son environnement.

Bien que très performants à la fois en adaptation au terrain, permise par la compliance passive des pattes, et en vitesse de marche, les robots de types RHex et Whegs restent limités en mouvement : pour tourner, ils doivent faire varier la vitesse et le sens de rotation des pattes gauches et droites. D'autre part, le châssis subit d'importantes perturbations dues à la locomotion, lesquelles rendent difficile l'emploi de caméras à des fins de navigation autonome. Néanmoins, ces robots n'en restent pas moins une prouesse technique considérable, et montrent qu'il est tout à fait possible de concevoir des robots compliants, adaptatifs et rapides avec un nombre limité de degrés de liberté.

Miniaturisation par la taille

Avec l'amélioration et la miniaturisation des composants et des actionneurs, il a rapidement été possible d'envisager des robots hexapodes plus petits, élargissant ainsi les opportunités de déploiement de ces robots dans des environnements toujours plus complexes.

En 1992, le Centre de Recherche pour les Technologies de l'Information (FZI, Karlsruhe, Allemagne) a initié le projet LAURON (*Legged AUtonomous Robot Neural Controlled*) dont le premier robot, LAURON I, fut achevé en 1993 [191]. Doté de 18 degrés de liberté, ce robot ne mesurait que 60 cm de long pour une masse de seulement 12 kg, lui permettant d'atteindre une vitesse maximale de $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Les chercheurs se sont inspirés du phasme pour concevoir des contrôleurs de locomotion à architecture neuronale en vue de faire émerger une marche adaptative et rapide [112, 115]. LAURON I utilisait des réseaux de neurones d'Elman entraînés au cours d'apprentissages supervisés par rétropropagation [11]. Cette approche permettait une locomotion rapide tout en augmentant la tolérance aux fautes ; les besoins en ressources pour le contrôle de chaque patte était également réduit. Introduit en 1995, LAURON II se distingue de son prédécesseur à deux niveaux : la présence d'une tête articulée par 3 degrés de liberté d'une part, et une multitude de capteurs (inclinomètre, gyroscope, système de stéréovision, système de détection d'obstacle par laser) d'autre part (Fig. 1.5A) [39, 191]. LAURON II était capable d'accomplir des déplacements et des mouvements plus complexes et plus stables sur des sols accidentés, mais les performances en vitesse ont cependant été fortement réduites, avec une vitesse maximale de $50 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. L'arrivée du troisième robot en 1999 a marqué une rupture dans le projet. En effet, LAURON III n'utilisait plus de contrôleur neuronal et son développement ne se focalisait plus sur la locomotion mais sur la localisation et la modélisation de l'environnement [80, 191].



FIGURE 1.5 – Les robots hexapodes **A** LAURON II (extrait de [191]) et **B** LAURON V (extrait de [189]).
Crédits : FZI.

La quatrième génération de robots LAURON a été développée pour des tâches de navigations complexes dans des zones très accidentées incluant des phases d'escalade d'obstacles [120, 191]. Un GPS et de nombreux capteurs ont été intégrés en plus de ceux déjà présents sur LAURON II et III, notamment des capteurs de force afin d'améliorer l'adaptabilité de la locomotion en terrain variable. Une caméra temps de vol a été utilisée dans la mesure en temps réel de l'environnement 3D local du robot afin d'optimiser la prise de décision quant à la localisation des points d'appui des pattes [192, 193]. La motricité du robot était hautement adaptative et réactive ; LAURON IV pouvait alors marcher sur des terrains déstructurés avec une vitesse maximale de $22 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. Cette prouesse a valu à LAURON IV de gagner le prix du projet universitaire Faulhaber en 2011. Toutefois, les performances en escalade d'obstacles restaient relativement mauvaises et c'est précisément cette thématique qui fut développée ensuite avec le dernier né du projet, LAURON V (Fig. 1.5B) [189]. Ce robot est équipé de 24 degrés de liberté (4 par patte, mimant de ce fait la cinématique des pattes du phasme indien *Carausius morosus*) pour une longueur de 90 cm et une masse de 42 kg essentiellement due à l'ajout d'un bras manipulateur. La redondance cinématique offerte par l'ajout d'un degré de liberté sur chaque patte a permis d'augmenter considérablement les possibilités de mouvements complexes et donc de rendre possible l'escalade d'objets et la marche sur des plans inclinés. La locomotion a également été optimisée d'après des études sur le positionnement des pattes chez l'insecte [190]. Ces avancées ont permis d'envisager le contexte d'exploration spatiale, particulièrement au moyen du bras manipulateur équipé d'une pince [104].

Un programme universitaire de recherche supervisé par le JPL, en collaboration avec le laboratoire d'intelligence artificielle du MIT, a permis le développement de plusieurs robots hexapodes. Genghis, dont la conception débuta au milieu des années 1980 afin d'étudier l'émergence de la locomotion adaptative en milieu accidenté, possède 12 degrés de liberté et ne mesure que 35 cm de long pour une masse record de 1 kg (Fig. 1.6A) [17]. Les robots Attila [3] et Hannibal (Fig. 1.6B) [67, 68], directement inspirés de Genghis, incluaient un degré de liberté supplémentaire par patte afin d'accroître les capacités motrices des robots. De plus, Attila et Hannibal se démarquèrent des autres robots hexapodes de l'époque de par leur grande autonomie provenant des 60 capteurs embarqués.

Les chercheurs du CWRU² ont également développé quatre robots hexapodes (R-I, R-II,

2. Case Western Reserve University

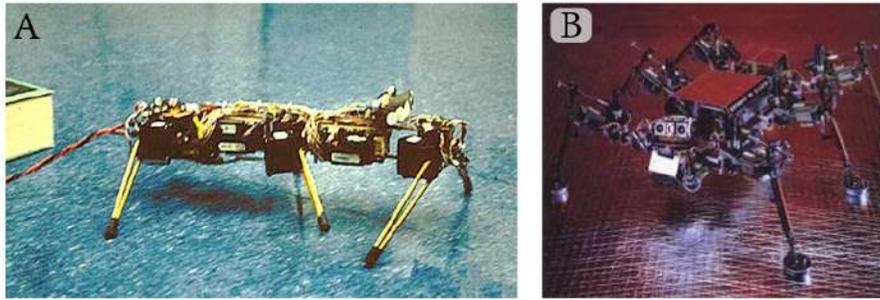


FIGURE 1.6 – Les robots Genhis (A) et Hannibal (B) pour l’exploration extraterrestre (Crédits : NASA/JPL - *Graduate Student Researcher Program Fellowship*).

R-III et R-V, R : *ROBOT*)³ en mimant progressivement le cafard [125, 180, 182]. Le premier robot R-I était doté de 2 degrés de liberté par patte seulement, tous identiques et utilisant des moteurs Maxon (2 W), pour une longueur totale de 50 cm (Fig. 1.7A) [60]. Deux contrôleurs de locomotion adaptatifs et robustes ont été développés et testés avec R-I. Le premier contrôleur utilisait une architecture neuronale [25]; le second permettait de générer une coordination des pattes inspiré du phasme [43]. La démarche résultante évoluait du mode ondulant (une patte après l’autre) au mode tripode en fonction de la vitesse, laquelle pouvait atteindre au maximum $14 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. La version suivante R-II, plus petite de 5 cm que son prédécesseur, a connu deux améliorations majeures : un degré de liberté supplémentaire par patte a été introduit, et la puissance du robot a été augmentée (moteurs Maxon 6 W ; Fig. 1.7B). Contrairement à R-I, le robot R-II est doté d’une compliance passive de l’articulation du tibia en plus des degrés de liberté actifs. Son contrôleur de locomotion est celui inspiré du phasme et précédemment implémenté sur R-I. L’attitude du robot est également contrôlée séparément de la locomotion afin d’assurer la même vitesse maximale que R-I. Le robot R-II était donc capable de se mouvoir dans une large gamme d’environnements complexes tout en assurant une bonne robustesse et adaptabilité du contrôleur biologique implémenté. Ces travaux ont à ce titre servi de base pour la suite des développements.

Les performances de R-I et R-II étaient en partie limitées par les moteurs Maxon. Le robot R-III a donc été conçu en calquant sa cinématique sur celle du cafard *Blaberus discoidalis* car ces insectes sont capables d’atteindre des vitesses de déplacement plus grandes que chez le phasme (Fig. 1.7C) [167, 187]. Il était doté de 5 degrés de liberté pour chacune des pattes avants, 4 degrés pour les pattes du milieu, et 3 pour les pattes arrières. L’ensemble était actionné par 24 vérins pneumatiques. Bien que le nombre de degrés de liberté soit élevé et asymétriquement réparti, chaque patte est composée de trois parties distinctes toutes cohérentes avec la structure générale d’une patte d’un cafard : coxa, fémur et tibia (du corps vers l’extrémité de la patte). R-III était alors capable de réagir aux perturbations comme les cafards [183]. Les concepteurs avaient fait remarquer que les pattes avant pouvaient réaliser des mouvements complexes avec une grande agilité, au prix d’une faiblesse accrue des articulations. En effet, toutes les articulations étaient dimensionnées de la même manière et n’étaient donc pas toujours adaptées à la longueur des segments de pattes mises en mouvement, produisant un déséquilibre fragilisant les actionneurs. Le robot R-V (ou Ajax) a bénéficié d’un important travail d’optimisation des articulations afin de réduire le déséquilibre

3. Le robot R-IV fait exception à la série, étant constitué de 8 pattes : six pattes inspirées du cafard, et deux pattes arrières supplémentaires inspirées du grillon.

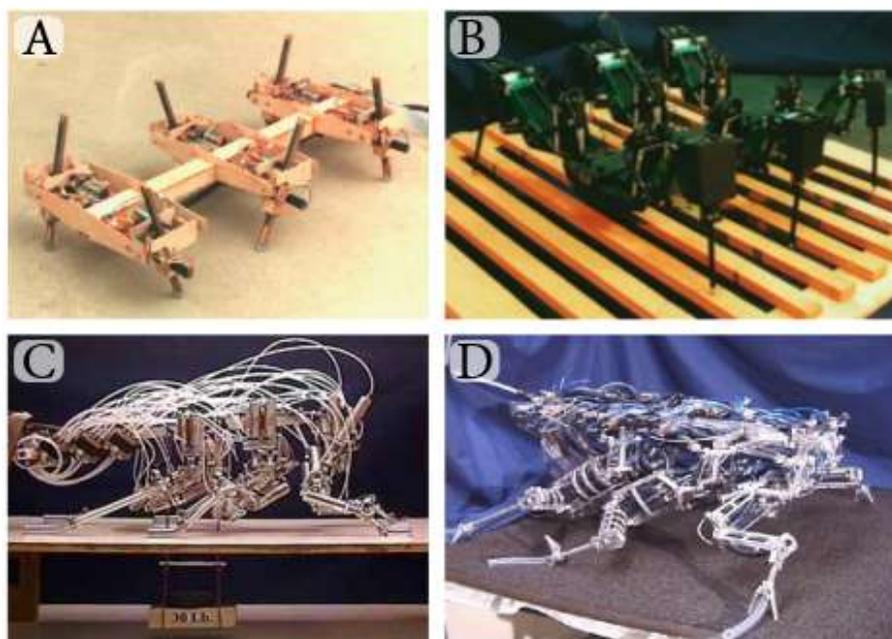


FIGURE 1.7 – Les robots hexapodes du CWRU inspirés du phasme et du cafard (Crédits : CWRU). **A** R-I. **B** R-II. **C** R-III. **D** R-V.

des forces observés avec R-III. Il est équipé de 24 degrés de liberté opérés par des muscles fluides développés par l'entreprise Festo (muscles pneumatiques de McKibbens) [27], lui permettant de contrôler aussi bien sa posture que sa raideur (Fig. 1.7D) [124]. Ces actionneurs ont permis de fournir au robot une stabilité passive, de sorte qu'en cas de perturbation le robot retourne naturellement vers un état d'équilibre [125]. Au terme de son développement, R-V mesurait environs 60 cm pour un total de 15 kg (possibilité de supporter une charge de 5 kg). En somme, les robots R-I à R-V développés au CWRU ont montré l'intérêt du biomimétisme dans la locomotion hexapode, notamment pour la manœuvrabilité de ces systèmes sur des terrains complexes. Mais les performances en vitesse restent limitées, avec une vitesse maximum ne dépassant pas $14 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.

D'autres exemples de robots plus ou moins bio-inspirés ont également vu le jour. Entre 1992 et 1996, Barnes et Walder, du *Mobile Robot Research Group* (département d'ingénierie électronique de l'Université de Stanford - R.U.), ont développé MAX (*Mobile Autonomous heXapod*) afin d'étudier la génération de modes de locomotion statistiquement stables en terrain accidenté, en utilisant notamment des CPG (*Central Pattern Generator*) pour le contrôle moteur [7]. MAX ne mesurait que 30 cm de long et pouvait se déplacer avec une vitesse maximale de 10 cm/s. Dans le cadre du projet RIMRES (*Reconfigurable Integrated Multi-Robot Exploration System*), les chercheurs du Centre d'Innovation Robotique de Bremen en Allemagne ont conçu CREX, un robot hexapode à 24 degrés de liberté de 27 kg et long de 1 m essentiellement destiné à de l'exploration de sols lunaires (Fig. 1.8) [188]. Le robot est conjointement développé depuis 2014 avec une autre plateforme mobile, SHERPA, un robot à roues équipé d'un bras pour déployer CREX. Chaque robot a la capacité duale d'agir indépendamment l'un de l'autre d'une part, et comme une seule entité mobile d'autre part.

Au laboratoire de robotique de l'Institut Fraunhofer, quatre robots hexapodes ont vu le jour entre 1990 et 2010 afin de travailler sur le contrôle intelligent de la locomotion : Ka-



FIGURE 1.8 – Le robot d’exploration lunaire CREX (Crédits : DFKI).

tharina [206, 207], SLAIR (*Six Legged Autonomous Intelligent Robot*) 1 [171] et 2 [58], et Anton [130]. Ces robots mesurent de l’ordre de 70 cm pour une masse variable, le minimum étant de 3.2 kg pour SLAIR 1. Ces robots, bien que relativement lents (env. $20 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$), sont capables de se mouvoir sur des sols aussi bien accidentés que friables (sable, gravier, galets). A l’exception de Katharina, ces robots disposent d’articulations supplémentaires afin de plier leur corps lors de l’escalade d’obstacles (jusqu’à 50 cm).

Depuis une dizaine d’années, le robot Hector (*HExapod Cognitive auTonomously Operating Robot*) au Centre d’Excellence pour les Technologies de l’Interaction Cognitive (CITEC) de l’Université de Bielefeld [4, 208]. Hector possède un exosquelette fait de polymère renforcé aux fibres de carbone permettant d’alléger la structure et d’optimiser les performances des actuateurs. De plus, le robot peut réaliser des tâches de locomotion très proches de celles observées chez les insectes grâce à un contrôleur neuronal appelé Walknet [204]. Comme Anton, Hector est équipé de deux articulations lui permettant de se plier.

De manière générale, les robots ainsi décrits sont capables d’une grande adaptation de leur locomotion au type de terrain sur lequel ils évoluent, souvent au prix d’une vitesse de déplacement ridicule. Ce sont des robots relativement petits, de l’ordre de 50 cm à 90 cm, mais encore très lourds puisque peu de robots ont une masse inférieure à 10 kg. Ces dimensions caractéristiques ont trois impacts négatifs quant à l’exploitation de ces robots : une consommation d’énergie accrue (i.e. une autonomie réduite), des vitesses de déplacement dérisoires, et des contraintes environnementales pour le déploiement de ces systèmes. Un bel exemple d’intégration et de miniaturisation a pu être observé avec les travaux de l’entreprise Festo dont les chercheurs ont conçu BionicANT, un petit robot fourmi hexapode ne mesurant que 15 cm de long pour une masse de 105 g (Fig. 1.9). Chaque patte est dotée de trois degrés de liberté, l’articulation du tarse étant généralement omise car elle sert avant tout de suspension à l’insecte lorsqu’il se déplace. Les actuateurs utilisés ici sont des transducteurs de courbure trimorphes. Ces insectoïdes ont notamment été testés dans le cadre de tâches de coopération et de navigation à la manière des fourmis⁴.

4. Pour plus de détails :
<https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/367917/FestoBionicAntsen.pdf>



FIGURE 1.9 – Le robot BionicANT (Crédits : Festo).

1.2.2 Les bénéfices des nouvelles technologies

Standardisation des plateformes

Depuis une dizaine d'années, de nombreuses plateformes ont été développées et mises à disposition du grand public. Ces robots hexapodes sont généralement vendus en kit à monter soi-même, favorisant la possibilité de modifier l'architecture afin d'inclure des capteurs et d'augmenter les capacités motrices du robot. Le petit robot à bas coût Hexy (seulement 250\$), développé par *ArcBotics*, comporte 18 degrés de liberté opérés par des servomoteurs Fitec (0.12 s par 60° ; jusqu'à 6 V) et se destine avant tout à un public d'apprenants en électronique et robotique (projet open-source; Fig. 1.10A). La société *Lynxmotion*, leader sur le marché des hexapodes, fournit un large choix de structures parmi lesquelles le Phoenix qui possède 18 servomoteurs Hitec HS-645 et peut se déplacer jusqu'à $25\text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ (vendu 900€; Fig. 1.10B). Le robot T-Hex de *Lynxmotion* se distingue par ses 24 degrés de liberté lui permettant de réaliser des mouvements complexes (vendu 1050€; Fig. 1.10C). Le robot PhantomX AX Metal Mark III est sûrement l'un des exemples les plus aboutis en termes de performances dynamiques (Fig. 1.10E). Développé par *Interbotix Lab.*, il peut marcher jusqu'à $80\text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ grâce à ses servomoteurs Dynamixel AX-12 ou AX-18. C'est un projet open-source, mais il est possible d'acheter le kit pour 1300\$. Il nécessite d'être alimenté avec une simple batterie 3S (11 V , 4500mAh). Enfin, PhantomX peut supporter une charge de 1.8 kg tout en maintenant ses performances en vitesse. Le robot Six de *EZ-Robot* est un petit robot à 12 degrés de liberté, imprimé en 3D et offrant la possibilité de tester des stratégies de suivi de cible, de reconnaissance vocale mais aussi d'intelligence artificielle dans des contextes d'apprentissage ou de recherche et développement (Fig. 1.10D).

Des projets personnels ont également été mis en œuvre, à l'image du robot MorpHex développé par Kåre Halvorsen qui s'est largement inspiré des projets robotiques de Jim Frye

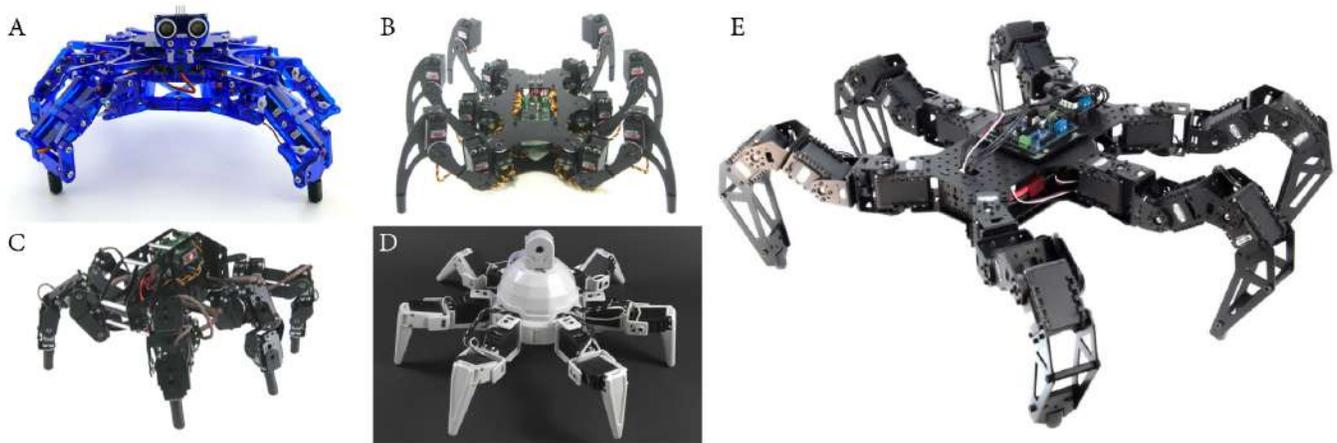


FIGURE 1.10 – Des robots hexapodes open-source à monter soi-même. **A** Hexy (Crédits : ArcBotics). **B** Phoenix (Crédits : Lynxmotion). **C** T-Hex (Crédits : Lynxmotion). **D** Six (Crédits : EZ-Robot). **E** PhantomX (Crédits : Interbotix Lab., Trossen Robotics).

(fondateur de *Lynxmotion*) et de Matt Dentons (chef du projet Mantis et fondateur de *Micro Magic Systems*)⁵. Ce robot innovant est doté de 2×6 pattes (deux hexapodes connectés) encastrées dans des sections de sphère, de sorte que le robot puisse rouler mais aussi marcher (Fig. 1.11). Quatre degrés de liberté par pattes ont été utilisés afin de permettre une telle variété de mouvements. Toutefois, la première articulation de chaque patte (haut et bas), c'est-à-dire le coxa, est mise en commun.

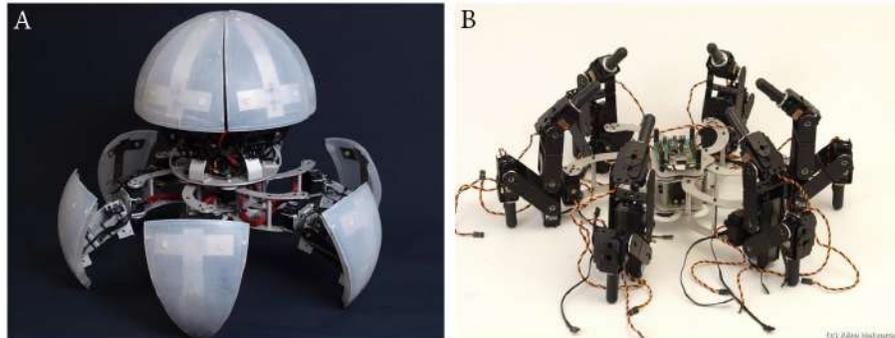


FIGURE 1.11 – Le robot MorpHex (Crédits : Kåre Halvorsen).

Impression 3D et prototypage rapide : la voie de l'open-source

Ces robots constituent un réel potentiel technique pour les laboratoires de recherche. Ce sont en effet des robots généralement peu coûteux vendus en kit et donc facilement modifiable en fonction du contexte expérimental dans lequel ils sont employés. Cette puissance d'utilisation est d'autant plus importante que l'on voit émerger depuis quelques années des plateformes en ligne d'échanges très performantes telles que *GitHub*, *Thingiverse* ou encore *Instructables*. De nombreux projets open-source y sont répertoriés et sont appuyés par une

5. Pour plus de détails : <http://zentasrobots.com/robot-projects/morphex-part-1/>

importante communauté internationale d'ingénieurs et de chercheurs en robotique. La démocratisation des imprimantes 3D favorise également ce contexte d'innovation technique, la majeure partie des robots étant libres d'accès et reproductibles. Enfin, l'expansion de l'utilisation du logiciel ROS (*Robot Operating System*) permet d'uniformiser le développement des architectures de contrôle moteur des robots hexapodes.

1.3 Hexabot, le premier prototype d'insectoïde

1.3.1 De Metabot à Hexabot

Le tout premier robot développé dans le cadre de ce projet doctoral est Hexabot (Fig. 1.12). Il s'agit d'une généralisation du Metabot, un robot quadrupède open-source développé par Grégoire Passault au cours de sa thèse au LaBRI (Laboratoire Bordelais de Recherche en Informatique)⁶ [172, 173]. Organisé selon une structure hexagonale, Hexabot possède six pattes dotées de 3 degrés de liberté chacune. Chaque articulation est opérée par un servomoteur Dynamixel XL-320. Ces servomoteurs bénéficient d'un très bon rapport qualité/prix pour le prototypage rapide, avec des lois de contrôle précises et un contrôleur en position à base de PID (coût unitaire moyen : 22€). L'ensemble du robot est imprimé en 3D à l'aide de filament PLA (acide polylactique). La gestion de la locomotion du robot se fait à l'aide d'une carte OpenCM 9.04C (processeur ARM Cortex-M3), compatible Arduino, et spécifiquement dédiée au contrôle des servomoteurs dotés de liaisons séries TTL⁷. L'environnement de développement utilisé est Robotis OpenCM, très semblable à celui d'Arduino. Il permet une implémentation en langage C et C++.

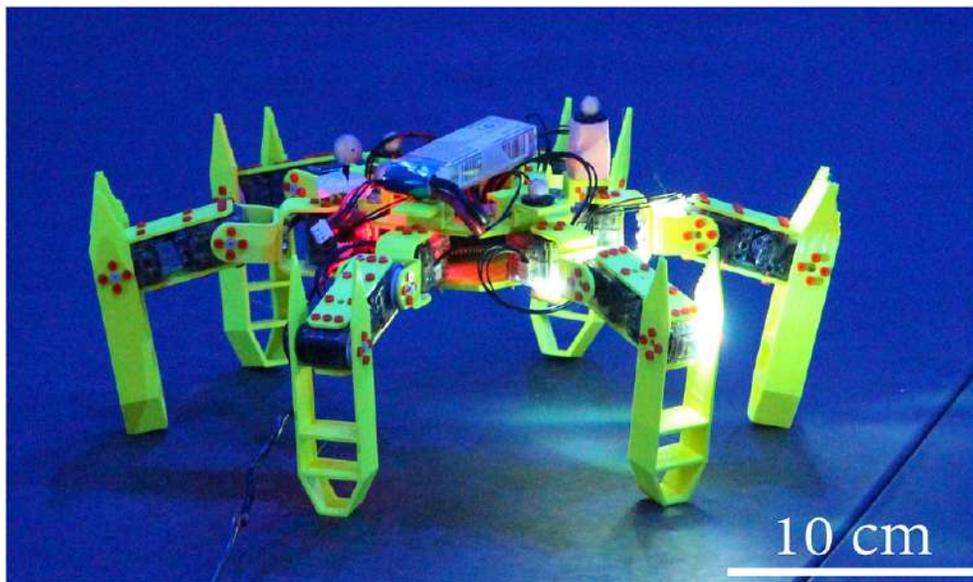


FIGURE 1.12 – Structure principale du robot Hexabot.

Chaque patte du robot mesure environ 20 *cm* de long. De ce fait l'envergure maximale du robot, c'est-à-dire lorsque les pattes sont intégralement étendues, atteint 52.5 *cm*. La hauteur

6. Pour plus d'informations : <http://www.metabot.fr/>

7. *Transistor-Transistor Logic*.

maximale du centre de masse du plateau central se trouve à 14.5 cm . Le robot pèse 675 g sans sa batterie et peut supporter une charge d'environ 400 g . Sous ces conditions, la vitesse maximale du robot a été mesurée à $26 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. L'analyse géométrique et dynamique du robot est donnée en Annexe A.

1.3.2 Une tête pour observer

Une tête articulée a été ajoutée à Hexabot afin d'embarquer l'électronique et les capteurs nécessaires à l'accomplissement des tâches de navigation. Cette tête se compose d'un plateau articulé par rapport au reste du robot selon l'axe de rotation en roulis (Fig. 1.13; voir Annexe B pour une représentation en CAO du robot). Elle est prévue pour supporter l'ordinateur de bord, une Raspberry Pi 2 modèle B, ainsi que les divers capteurs utilisés : une caméra panoramique, une centrale inertielle, un GPS différentiel, et le compas céleste inspiré de l'œil composé des insectes.



FIGURE 1.13 – Photographie de la tête du robot Hexabot. Cette tête est notamment articulée par un système de bielle (à gauche) mise en mouvement par un servomoteur XL-320 (Dynamixel). On distingue également sur le plateau le compas céleste utilisé pour la détection du cap à partir de la lumière céleste polarisée, et sous le plateau la carte Raspberry Pi 2B utilisée pour contrôler l'ensemble du robot.

1.3.3 Architecture électronique

Afin d'assurer la possibilité de connecter l'ensemble des capteurs d'une part, mais également d'assurer la communication avec le compas céleste (nécessitant un commutateur I2C) et d'adapter la tension d'alimentation provenant de la batterie (12 V vers 5 V), une carte électronique a été développée par Marc Boyron (détails en Annexe D). Le schéma synoptique de l'architecture hardware du robot est donnée en figure 1.14.

1.3.4 Le patron locomoteur d'Hexabot

Le contrôle moteur du robot est géré par un micrologiciel développé sur la base de celui du Metabot. Ce micrologiciel permet de manipuler divers paramètres tels que la hauteur des

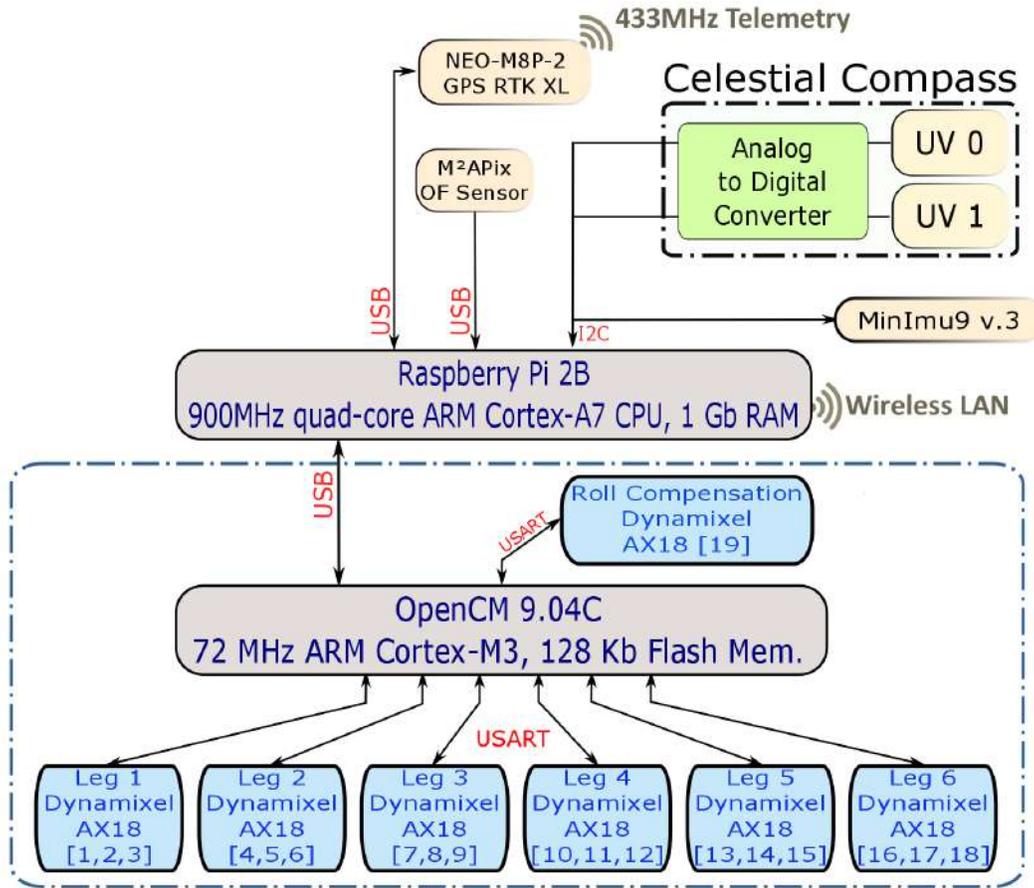


FIGURE 1.14 – Schéma synoptique de l'architecture du robot Hexabot. La ligne en pointillés délimite le robot (contrôleur de locomotion et servomoteurs).

pattes lors de leur transfert, mais aussi la fréquence d'exécution des pas, la hauteur du centre de masse, ainsi que les distances et rotations par foulées (Tab. 1.1).

Paramètre	Description	Min.	Max.	Valeurs types
FREQ	Fréquence d'exécution des pas	0.2 Hz	3.0 Hz	1.0 Hz
ALT	Hauteur de l'extrémité des pattes	10 mm	50 mm	20 mm
H	Hauteur du centre de masse	-55 mm	-145 mm	-125 mm
DX	Distance par foulée (axe longitudinal)	10	75	30 (8.2 cm · pas)
DY	Distance par foulée (axe transversal)	10	75	0
TURN	Résolution angulaire d'une foulée	5.1	10.0	5.5 (10.9° · pas)

TABEAU 1.1 – Paramètres de locomotion du robot. Les valeurs types sont celles retenues pour les expériences de navigation opérées avec le robot AntBot.

En outre, ce micrologiciel permet également de choisir le mode de déplacement. Sont notamment disponibles les modes ondulant (une seule patte est en transfert à la fois) et tripode (trois pattes en déplacement à la fois). Ces modes sont directement inspirés de la locomotion des fourmis, dont le principal mode de déplacement est celui de la marche tripode, offrant stabilité et vitesse. Un exemple du patron locomoteur tripode des fourmis du désert est donné en figure 1.15D, à comparer avec celui du robot (Fig. 1.15E). On constate à ce titre que contraire-

ment au robot, l'insecte passe par des phases où l'ensemble de ses pattes sont au sol ; d'autre part, la durée du transfert de chaque patte varie et semble plus courte pour les pattes du milieu (numérotées 2 et 5).

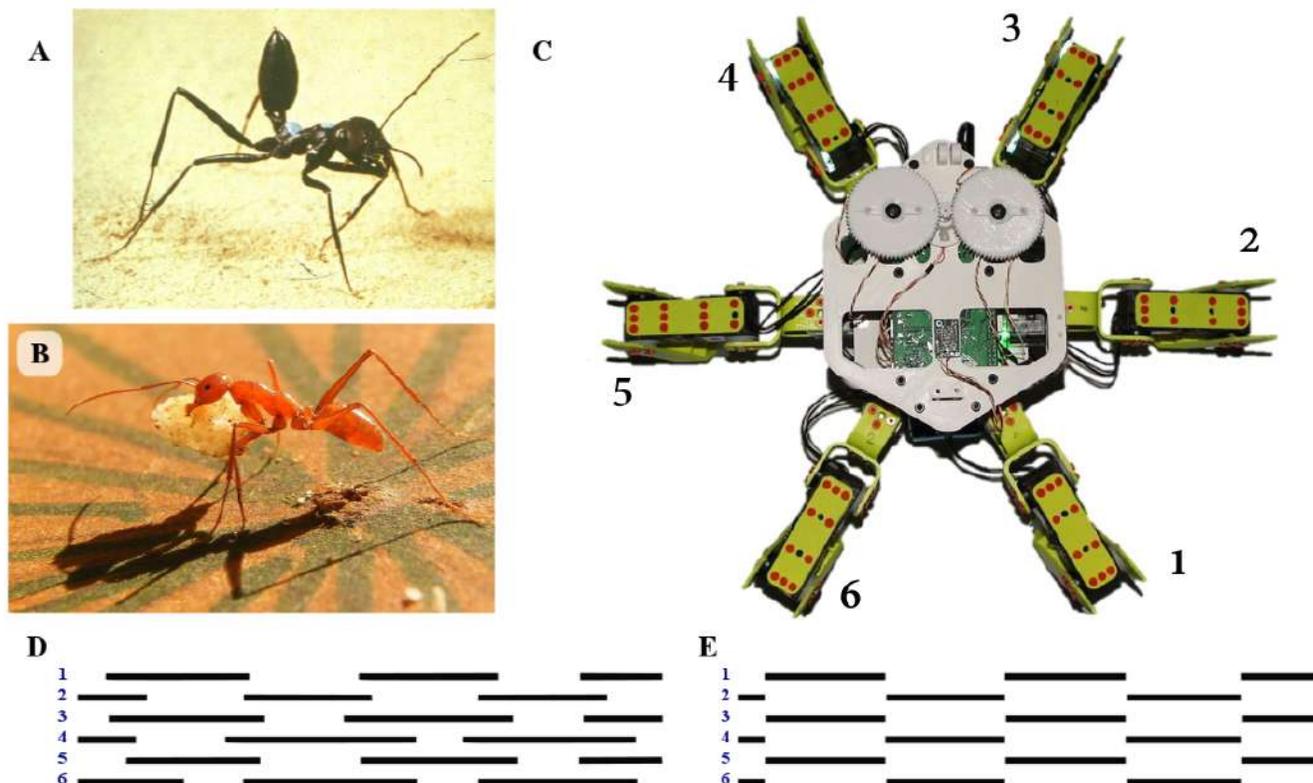


FIGURE 1.15 – Propriétés locomotrices du robot et de la fourmi. **A** Photographie de la fourmi nord-africaine *Cataglyphis bicolor*. Extraite de [240]. **B** Photographie de la fourmi australienne *Melophorus bagoti* (Crédits : Antoine Wystrach et Sebastian Schwarz). **C** Photographie du robot Hexabot inspiré des fourmis. **D-E** Chronographes décrivant le patron locomoteur de la fourmi (**D**) et du robot (**E**). Les nombres 1, 2 et 3 repèrent les pattes avant, milieu et arrière gauche ; les nombres 6, 5 et 4 celles de droite dans le même ordre (insecte et robot). Le mode observé est celui de la locomotion tripode.

1.3.5 Stabilité et vitesse de déplacement

Le comportement dynamique du robot a été analysé plus en détail afin de : (i) assurer la comparaison avec la fourmi, et (ii) connaître les limites d'usage et les solutions à envisager pour les expérimentations prévues sur la navigation.

Analogie dynamique avec la fourmi

L'objectif est ici de permettre une comparaison quantitative entre les perturbations en roulis, tangage et lacet subies par Hexabot lors d'une phase de marche en ligne droite avec celles perçues par la fourmi *Cataglyphis*. Cette comparaison est notamment motivée par le besoin de connaître les limites des similitudes entre l'insecte et la machine lors de la confrontation des performances navigationnelles de l'un et l'autre sur la base d'un même modèle. Les

perturbations ont été mesurées dans trois conditions différentes relatives au pourcentage de vitesse maximale : 50%, 75% et 100% ($V_{MAX} = 35 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ à $FREQ = 2.0$).

Dans cette expérience, nous avons fait marcher le robot sur un sol plat, en ligne droite et durant 7 secondes. La réalité terrain était fournie par le système de capture du mouvement de l'Arène de Vol de la Méditerranée⁸ (AVM), équipée de 17 caméras VICON™. L'enceinte de 6 m de long, 6 m de large et 8 m de hauteur est modulable au besoin. Elle permet de faire des acquisitions de localisation en trois dimensions avec une précision millimétrique tout en assurant une fréquence d'acquisition de 500 Hz.

	Vitesse	Hexabot	Fourmi
Roulis	50%	4.5°	
	75%	6.7°	10°
	100%	9.0°	
Tangage	50%	4.4°	
	75%	5.5°	60°
	100%	9.9°	
Lacet	50%	19.8°	
	75%	19.8°	<i>nc</i>
	100%	19.8°	

TABLEAU 1.2 – Analogie dynamique avec la fourmi : comparaison des perturbations en roulis, tangage et lacet lors d'une phase de marche en ligne droite pendant 7 secondes (robot). Les vitesses sont données en pourcentage de la vitesse maximale d'Hexabot ($35 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$). Les données animales concernent exclusivement *Cataglyphis fortis*.

On constate que les perturbations du robot en roulis et tangage sont similaires, ce qui s'explique facilement par la symétrie hexagonale du robot et la régularité du patron locomoteur. L'écart de débattement angulaire en roulis et en tangage observé chez la fourmi peut sans doute s'expliquer par sa symétrie longitudinale et la présence de l'articulation du cou. On peut donc dire que les perturbations visuelles subies lors de la marche sont cohérentes entre la machine et l'insecte en roulis seulement (Tab. 1.2).

On note également la présence d'une dérive en lacet, stable quelle que soit la vitesse de déplacement du robot. Faute de données sur le sujet, cette donnée ne peut être comparée à une éventuelle dérive de l'insecte, et il apparaît peu probable que les fourmis dérivent comptes tenus de leurs systèmes de navigation, notamment l'intégrateur de chemin s'appuyant sur la détection de la polarisation de la lumière du ciel [248].

Perturbations et dérive de trajectoire

A l'occasion des mesures effectuées précédemment, nous avons également étudié le comportement global du robot. En particulier, nous avons analysé les trajectoires du robot en fonction de la vitesse d'avance (géré via le paramètre DX) et de la hauteur du centre de masse H (Tab. 1.1). Le robot évolue en aveugle et doit marcher pendant 7 secondes en ligne droite. Les courbes 2D sont données en figure 1.16. Deux conditions de vitesses ont été testées ($DX = 50$ et $DX = 75$), et selon trois hauteurs du centre de masse du robot (80 mm, 120 mm et 145 mm). On observe une forte dérive en lacet des trajectoires. La dérive est régulière et

8. Site web de la plateforme : <https://ism.univ-amu.fr/fr/avm>

similaire pour les conditions $H \in \{80, 120\}$ mm quelle que soit la vitesse. Lorsque la hauteur du centre de masse est maximale, la trajectoire devient oscillante : cela peut s'expliquer par le fait que le poids du robot est concentré au niveau du plateau central. Les pattes étant tendues, la structure est plus sensible aux vibrations dues à la locomotion et est donc plus instable. Par comparaison des courbures, on note que la vitesse n'a pas d'effet sur la dérive, laquelle est maximale pour la hauteur $H = 120$ mm. Ajoutons que la dérive en lacet se fait toujours du côté gauche du robot⁹, lequel correspond à la présence d'un servomoteur supplémentaire utilisé pour l'actionnement en roulis de la tête du robot. Ce déséquilibre des masses, non prévu initialement par les chercheurs du LABRI dans la conception du logiciel de gestion de la locomotion, est sûrement à l'origine de la variation de trajectoire observée. Les courbes de position, vitesse et orientation pour chaque condition sont présentées en Annexe E.

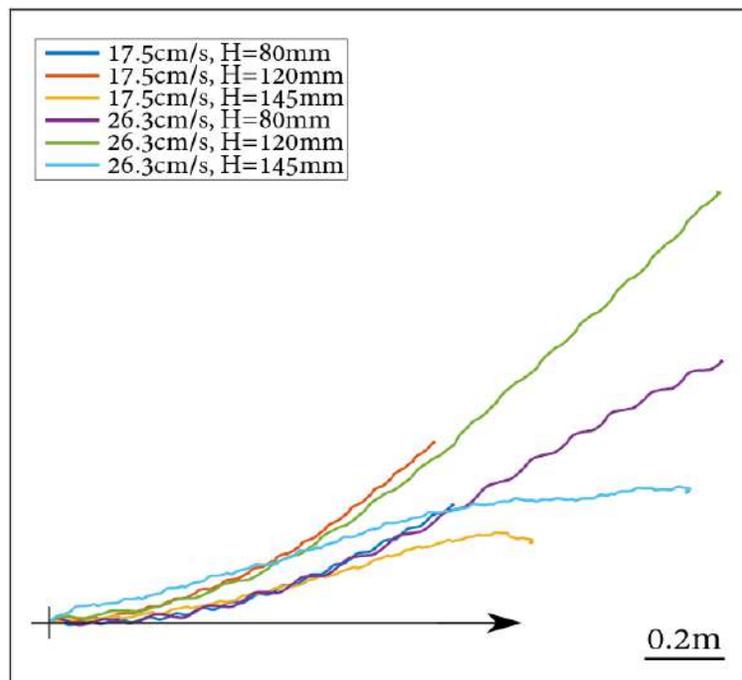


FIGURE 1.16 – Trajectoires bidimensionnelles du robot Hexabot devant effectuer une tâche de marche en ligne droite durant 7 secondes. Réalité terrain : AVM. Le point de départ des trajectoires est donné par la croix noire, et la flèche indique la direction imposée. Les oscillations régulières observables pour chaque trajectoire sont la conséquence du mode tripode. A $DX = 50$, la vitesse moyenne est de $14.6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; à $DX = 75$, la vitesse moyenne est de $22.7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.

9. On remarque par ailleurs que la dérive est plus importante à l'initialisation de la marche, et tend à se stabiliser ensuite s'il n'y a pas ou très peu de dérive due à l'interaction entre le bout des pattes et le sol. Cette prépondérance de la dérive en début de marche peut s'expliquer par l'accélération initiale assurant le passage d'une vitesse nulle à une vitesse maximale.

1.4 Vers une plateforme améliorée

1.4.1 Le robot hexapode AntBot

La limite de chargement d'Hexabot ayant rapidement été atteinte, il fut nécessaire de développer une version plus puissante du robot. Le développement d'AntBot s'est donc largement fondé sur le prototype Hexabot : trois degrés de liberté par patte selon le même schéma que pour le premier robot, et un plateau central semblable permettant de transférer sans contrainte la tête du robot. La modification concerne donc les servomoteurs utilisés. Tandis qu'Hexabot utilisait des XL-320 de Dynamixel, AntBot utilise des AX-18A permettant d'avoir plus de couple et donc d'augmenter la capacité de chargement et la vitesse. Le tableau 1.3 donne la comparaison quantitative de ces deux servomoteurs.

Critère	XL-320	AX-18
Résolution	0.29°	0.29°
Masse	16.7 g	55.9 g
Dimensions	24 mm × 36 mm × 27 mm	32 mm × 50 mm × 40 mm
Couple	0.39 Nm à 7.4 V 1.1 A	1.8 Nm à 12 V 2.2 A
Vitesse à vide	114 tpm à 7.4 V 0.18 A	97 tpm à 12 V
Tension d'alimentation	de 6 V à 8.4 V	de 9 V à 12 V
Protocole de communication	TTL	TTL
Retours d'informations	Position, température, charge, tension, etc.	

TABLEAU 1.3 – Comparaison des servomoteurs XL-320 et AX-18A (Dynamixel). Source : <http://emannual.robotis.com/>.

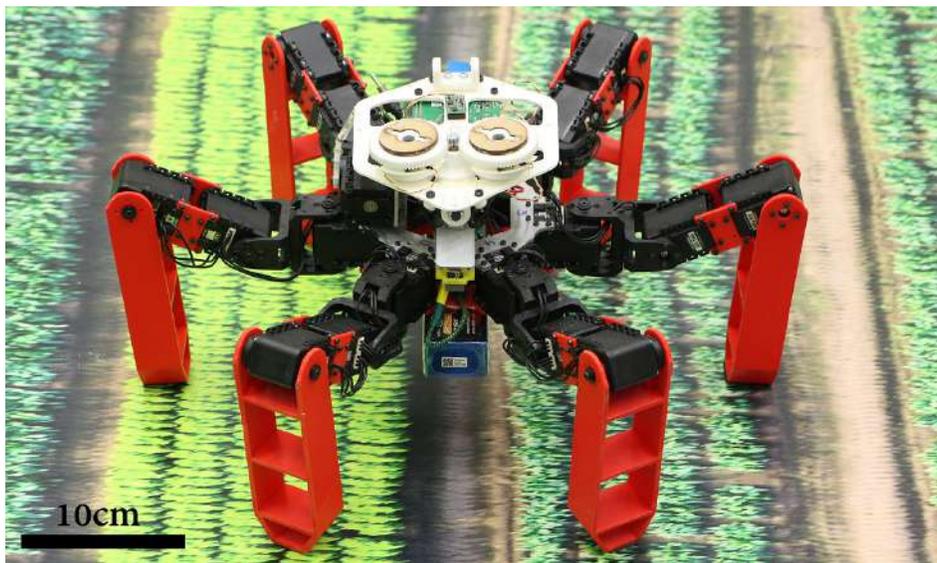


FIGURE 1.17 – Photographie du robot AntBot.

Le robot AntBot est présenté en figure 1.17. Les servomoteurs étant plus gros, les pattes ont intégralement été refaites. Le robot est donc plus large, mais aussi plus lourd qu'Hexabot,

avec 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 .

D'autre part, le plateau central a dû être ajusté afin de permettre d'intégrer le 19^{ème} servomoteur pour actionner la tête en roulis. Le dispositif est donné en figure 1.18. Cette version permet un débattement angulaire en roulis de $\pm 20^\circ$.

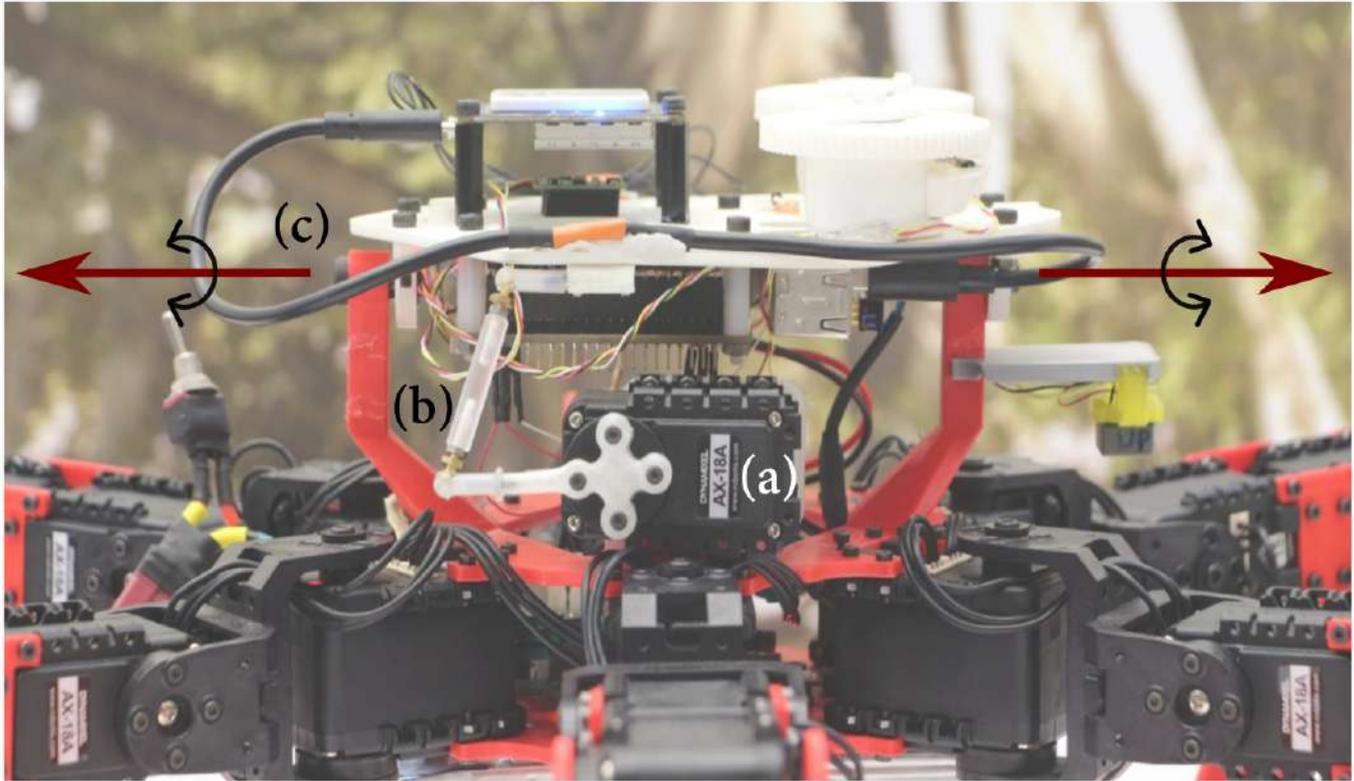


FIGURE 1.18 – Actionnement de la tête du robot selon son axe de roulis (c). (a) Servomoteur AX18 pour l'articulation de la bielle (b).

1.4.2 Performances dynamiques

Résolution et dérive

Comme pour Hexabot, les performances en marche du robot AntBot ont été quantifiées dans l'AVM. En particulier, on a fait marcher le robot en ligne droite afin de déterminer sa résolution en distance par pas ainsi que sa dérive en lacet (Fig. 1.19A,C). Il en résulte une résolution odométrique de $8.2 \text{ cm} \cdot \text{pas}$ ($n = 112$) en utilisant les paramètres suivants : $DX = 30$, $H = 120 \text{ mm}$, $FREQ = 1.0$, $ALT = 20 \text{ mm}$. De même, on observe que la dérive moyenne s'élève à $0.12^\circ \cdot \text{pas}$. Par ailleurs, chacune des deux distributions analysées s'avère ne pas être statistiquement différente d'une distribution normale (tests de Lilliefors ; résolution odométrique : $P = 0.500$; dérive angulaire : $P = 0.425$). Enfin, la résolution angulaire moyenne par foulée de rotation est de $10.9^\circ \cdot \text{pas}$ ($n = 112$, $TURN = 5.5$, Fig. 1.19B), et la distribution suit également une loi normale (test de Lilliefors, $P = 0.394$).

Les paramètres du micrologiciel de locomotion utilisés dans cette caractérisation sont ceux retenus pour les expériences de navigation. La connaissance des résolutions odométrique et

angulaire est utile pour déterminer la localisation en aveugle, soit à partir des informations proprioceptives : intégration des pas en ligne droite et en rotation.

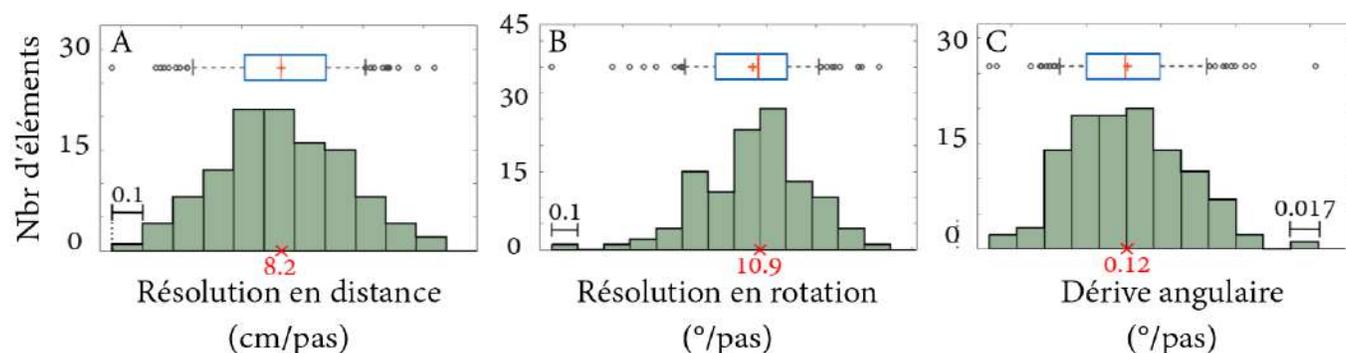


FIGURE 1.19 – Performances dynamiques de la locomotion d’AntBot. **A** Distribution de la résolution en distance par foulée lors d’une tâche de marche en ligne droite. Paramètres : $DX = 30$, $H = 120$ mm, $FREQ = 1.0$, $ALT = 20$ mm. Distance moyenne par foulée : 8.2 cm · pas ($n = 112$). **B** Distribution de la résolution angulaire par foulée de rotation. Paramètres : $TURN = 5.5$, $H = 120$ mm, $FREQ = 1.0$, $ALT = 20$ mm. Rotation moyenne par foulée : 10.9° · pas ($n = 112$). **C** Distribution de la dérive en lacet du robot lorsqu’il marche en ligne droite. Paramètres : $DX = 30$, $H = 120$ mm, $FREQ = 1.0$, $ALT = 20$ mm. Dérive angulaire moyenne par foulée : 0.12° · pas ($n = 112$).

Importance de la hauteur

Au cours des 130 expériences de navigation menées avec AntBot, nous avons remarqué qu’en plus de son influence sur la dérive, la hauteur du robot avait une incidence importante sur ses performances dynamiques. En effet, nous avons pu constater qu’en position basse (Fig. 1.20A), les servomoteurs du milieu de chaque patte s’échauffaient rapidement, atteignant la limite de température de fonctionnement de $70^\circ C$. Au-delà, le contrôleur de l’actionneur stoppait tout fonctionnement pour préserver son intégrité. Par ailleurs, la fréquence de rupture des engrenages en plastique était également très importante. En revanche, en position haute (Fig. 1.20B), l’échauffement restait stable autour de $50^\circ C$ et l’usure des engrenages était moins prononcée. Toutefois, l’utilisation du robot en position basse offre une plus grande stabilité et une dérive en lacet plus faible qu’en position haute. En guise de compromis, nous avons choisi de travailler à $H = 120$ mm afin de réduire les perturbations tout en diminuant le risque d’avarie technique en cours d’expérimentation¹⁰.

1.5 Conclusion

Nous verrons dans les chapitres suivants que les robots Hexabot et AntBot ont permis de mettre en avant les nombreux avantages que donnent la bio-inspiration tant au niveau perceptif que comportemental. Hexabot est a été codéveloppé par Julien Dupeyroux et Grégoire Passault (alors doctorant au LABRI sous la direction d’Olivier Ly). Le micrologiciel a été intégralement développé par Grégoire Passault dans le cadre de sa thèse. La tête du robot a été développée par Julien Dipéri et Julien Dupeyroux à l’ISM. Enfin, le robot AntBot a été

10. $H = 120$ mm est donné pour Hexabot. AntBot étant plus grand, cela correspond à une hauteur de 19.8 cm.

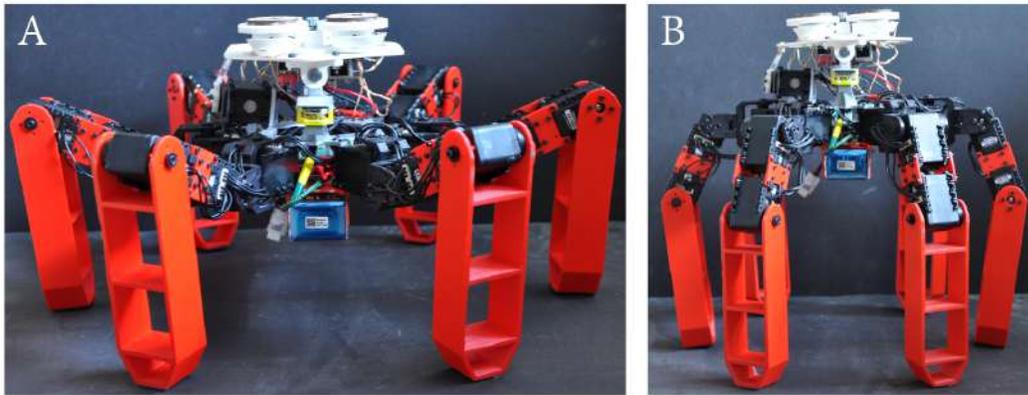


FIGURE 1.20 – AntBot en position basse (A) et en position haute (B).

développé par Julien Dupeyoux. Ces plateformes, disponibles sous licence libre¹¹, offrent de nombreuses opportunités en recherche et développement pour la navigation extérieure. Le coût de fabrication d'un robot, tête exclue, se résume essentiellement à celui des 19 servomoteurs, c'est-à-dire entre 450€ pour les servomoteurs Dynamixel XL-320 d'Hexabot, et 2000€ pour les servomoteurs Dynamixel AX18A d'AntBot. Les cartes électroniques embarquées, de type Arduino, se programment facilement et le micrologiciel de gestion de la locomotion du robot s'adapte sans difficulté à d'éventuels changements de servomoteurs. En outre, les deux robots sont dotés de capacités de mouvement très intéressantes, pouvant ainsi faire varier indépendamment leur vitesse, le mode de locomotion, la hauteur de transfert des pattes, la hauteur du centre de gravité, etc.

Toutefois, les expériences en extérieur ont mis en évidence un certain nombre de limites d'utilisation de ces robots. En effet, Hexabot a par exemple rapidement montré des signes de fatigue à l'égard de sa propre masse, tête exclue. Certains servomoteurs XL-320 tombaient rapidement en panne car les engrenages, tous en plastique, se détérioraient durant les expériences. De la même manière, les servomoteurs d'AntBot, bien que plus puissants, subissaient les mêmes avaries. Ce sont généralement les mêmes actionneurs qui tombent en panne, à savoir les articulations centrales des pattes arrières et avant. Ceci s'explique notamment par le fait que ces articulations doivent supporter l'ensemble du poids du robot durant les transferts, tout en projetant le robot vers l'avant. En outre, le robot AntBot est également fortement gêné par la hausse rapide de la température de ses actionneurs. Au-delà de 70°C , ceux-ci se mettent en arrêt afin de prévenir d'une dégradation des engrenages. Ce dernier point a notamment fortement contraint les expériences de navigation, faisant passer le temps d'exécution d'une trajectoire de 3 minutes à plus de 15 minutes (jusqu'à une heure pour celles en extérieur), cela afin de permettre de refroidir régulièrement les servomoteurs.

Naturellement, plusieurs solutions peuvent être proposées pour tenter de réguler ces avaries. En particulier, les actionneurs devraient plutôt utiliser des engrenages en métal, plus résistants mais également plus lourds. Le micrologiciel pourrait également être adapté de manière à mieux répartir les contraintes sur l'ensemble du robot lors de la marche, évitant ainsi de trop solliciter les actionneurs centraux des pattes avant et arrières. Mais il n'en reste pas moins le problème de la température. Des solutions de régulation thermique ont

11. <https://github.com/JuSquare/AntBot>

été proposées dans la littérature, à l'image des actionneurs X de chez HEBI Robotics¹² et des modules S développés par le laboratoire de Biorobotique de l'Université de Carnegie-Mellon [194] (Fig. 1.21A,C). Ces actionneurs peuvent dissiper leur chaleur et offrent l'avantage d'être compliants. Ils peuvent être pilotés sous Matlab, mais également ROS et C/C++. Des exemples de robots hexapodes existent déjà et montrent le potentiel adaptatif de ces actionneurs sur des terrains accidentés et en pente (Fig. 1.21B,D).

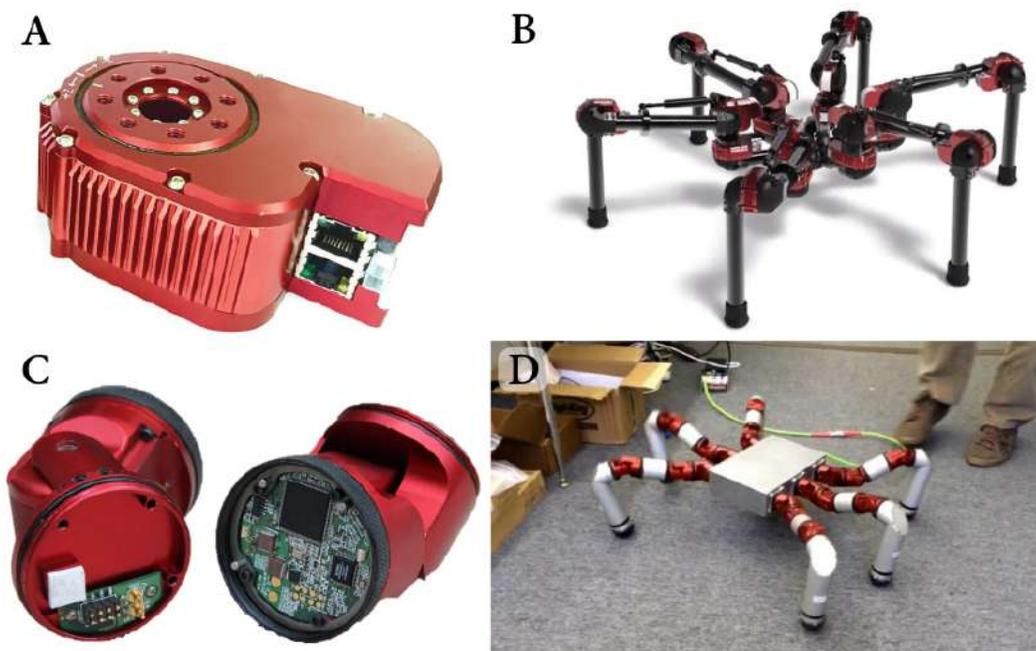


FIGURE 1.21 – Actionneurs optimisés. **A,B** Servomoteur de chez HEBI Robotics et une de ses applications en robotique hexapode (Crédits : HEBI Robotics). **C,D** Module S et son utilisation sur le robot hexapode modulaire *Snake Monster* [194] (Crédits : Carnegie-Mellon University).

En prenant du recul, on pourrait se demander Si finalement la stratégie de motorisation basée sur des servomoteurs est la meilleure réponse à la robotique à pattes? En effet, en observant la Nature, on constate que la locomotion est un processus automatique et relativement peu coûteux en termes d'énergie. Une approche davantage bio-inspirée serait donc de développer un robot hexapode pour lequel la marche est un mode de fonctionnement stable et naturel. L'énergie serait alors majoritairement utilisée pour initier et arrêter la marche, et faire tourner le robot. Des exemples de robots bipèdes montrent l'intérêt de la marche passive, c'est-à-dire sans apport d'énergie (sauf au démarrage) [36]. Cette démarche a notamment permis d'aboutir à la même consommation énergétique entre le robot et l'humain [37]. Cela permettrait alors (i) d'augmenter considérablement l'autonomie du robot, (ii) de lui permettre d'être fondamentalement adaptatif au terrain sur lequel il marche, et (iii) de naviguer sur plusieurs kilomètres sans subir d'avarie semblable à celles observables sur des robots comme Hexabot et AntBot.

Somme toute, les robots Hexabot et AntBot présentent de nombreux atouts, à commencer par la stabilité remarquable de la tête lorsque le robot 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 les robots, toutes imprimées en 3D, permettent une

12. <https://www.hebirobotics.com/>

maintenance rapide et facile en cas d'avarie. Hexabot et AntBot sont également suffisamment petits et légers 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 micrologiciel 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 thèse est de confirmer ou non la plausibilité de certains modèles biologiques. L'insecte et la machine doivent donc partager un maximum de caractéristiques, ici morphologiques et locomotrices.

Chapitre 2

Le compas céleste

Ce chapitre introduit le compas céleste en bande UV inspiré de la partie dorsale des yeux composés des insectes, et plus particulièrement des fourmis du désert *Cataglyphis fortis*. Doté de seulement deux photodiodes surmontées de filtres polarisants linéaires, ce capteur permet de mesurer l'angle de polarisation (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 T. Labhart dans ses travaux sur la vision polarisée chez le grillon [135]. Bien que ce modèle biologique doive être considéré avant tout comme une vue de l'esprit, il n'en reste pas moins très intéressant pour son minimalisme calculatoire et sa plausibilité biologique. Les applications multiples décrites dans ce chapitre attestent d'une solution technologique novatrice, minimaliste, fiable et robuste pour l'estimation du cap d'un véhicule autonome naviguant dans un environnement extérieur.

2.1 Une démarche inspirée des insectes

2.1.1 L'œil composé

Comme tous les arthropodes (i.e. insectes, araignées et crustacés), les fourmis sont dotés d'yeux composés (Fig. 2.1A-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. 2.1D). Une ommatidie se compose :

- d'une cornée formant une facette hexagonale (Fig. 2.1E),
- d'un cône cristallin (i.e. lentille) transparent permettant de guider les rayons lumineux jusqu'au rhabdome,
- 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,
- de cellules photoréceptrices, au nombre de 8 chez *Cataglyphis* et réparties radialement autour du rhabdome (Fig. 2.1F),
- de cellules pigmentées assurant le cloisonnement optique entre chaque ommatidie.

Contrairement aux idées reçues, les insectes ne voient pas le monde comme une mosaïque où la scène serait dupliquée au nombre d'ommatidies que chaque œil composé possède. En réalité, chaque cellule photoréceptrice voit une petite zone de la scène, et l'ensemble de ces cellules permet donc de reconstituer la scène dans sa globalité. Les insectes tels que les abeilles,

les grillons ou encore les fourmis *Cataglyphis* 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° dans sa partie frontale [212], et les fourmis du désert jusqu'à 5° [210, 263].

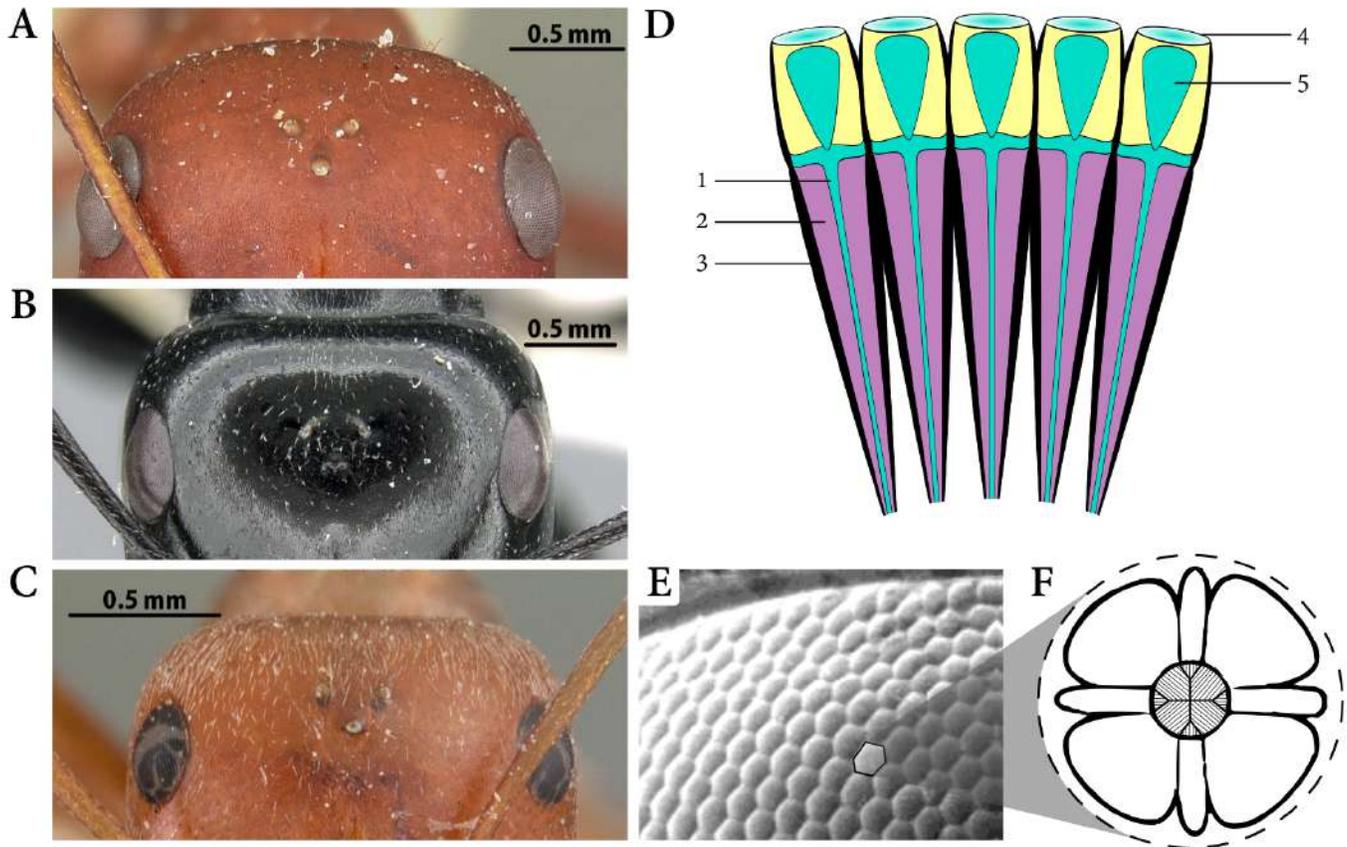


FIGURE 2.1 – Le système visuel chez la fourmi *Cataglyphis*. **A-C** Vue agrandie des yeux composés (gauche et droite) et des trois ocelles (au centre), respectivement chez *Cataglyphis bicolor* (Crédits : April Nobile), *Cataglyphis fortis* (Crédits : Estella Ortega) et *Cataglyphis bombycinus* (Crédits : April Nobile). Modifié de : AntWeb.org sous la licence CC-BY-SA-3.0. **D** Représentation schématique d'ommatidies. 1- Rhabdome. 2- Cellules photoréceptrices. 3- Cellules pigmentées. 4- Cornée. 5- Cône cristallin. **E** Photographie de l'oeil composé de *Cataglyphis bicolor*. Adapté de [137]. **F** Structure d'une ommatidie chez *Cataglyphis* comprenant 8 photorécepteurs et des microvillosités pour filtrer la lumière polarisée linéairement. D'après [137].

On distingue trois catégories d'yeux composés : en apposition, en superposition optique, et en superposition neuronale [26].

Apposition

L'œil des fourmis *Cataglyphis*, mais également d'autres arthropodes tels que le criquet migrateur, l'abeille commune ou encore la crevette mante (Fig. 2.2-Haut) est en apposition. 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 des ommatidies permet alors de visualiser une scène quasi-panoramique.

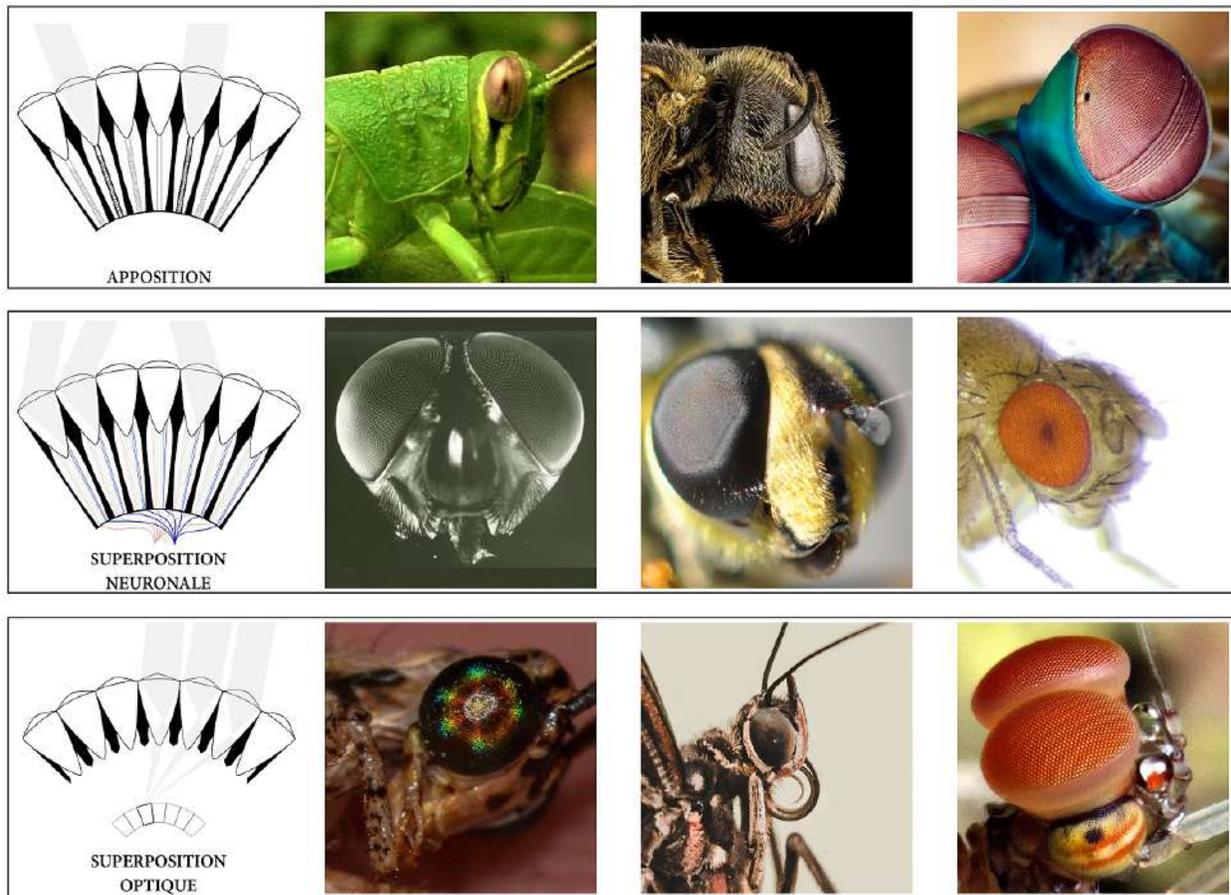


FIGURE 2.2 – L’œil composé chez les arthropodes. **Haut.** Structure optique en apposition. De gauche à droite : le criquet migrateur *Locusta migratoria*, l’abeille commune (*Apis mellifera*), et la crevette mante (*Odontodactylus scyllarus* ; crédits : National Geographic). **Milieu.** Structure à superposition neuronale. De gauche à droite : la mouche *Calliphora* (Crédits : Nicolas Franceschini), le syrphe ceinturé (*Eristalis tenax* ; crédits : Julien Dupeyroux), et la mouche *Drosophila melanogaster*. **Bas.** Structure optique en superposition optique. De gauche à droite : le fourmilion (*Myrmeleontidae* ; licence CC-BY-SA 4.0), le papillon de nuit (*Manduca sexta*), et l’éphémère (*Ephemera danica* ; crédits : Chris Fifield-Smith, sous la licence CC-BY-NC 2.0).

Superposition neuronale

Les insectes volants tels que les mouches, guêpes et abeilles ont quant à eux besoin de pouvoir traquer leurs proies et leurs congénères en vol. Ils doivent donc être capables de détecter leur proie et de la suivre. La superposition neuronale permet de reconstituer un pixel de l’image inversée sur la base de 7 ommatidies (une ommatidie ainsi que les six autres qui l’entourent). Les réponses d’un seul photorécepteur de chacune de ces 7 ommatidies sont alors reliées dans la première couche de neurones du système optique, la lamina, permettant d’augmenter la sensibilité sans altérer la résolution visuelle (Fig. 2.2-Milieu). En pratique, la détectabilité d’un contraste est augmentée d’un facteur $\sqrt{7}$ [141].

Superposition optique

A première vue, il est pratiquement impossible de distinguer un œil composé en apposition d'un œil composé en superposition. Tous deux possèdent une structure convexe faite de petites facettes aux dimensions similaires. En revanche, la structure interne des ommatidies est radicalement différente dans le cas de la superposition optique (Fig. 2.2-Bas). En effet, les rayons incidents de plusieurs ommatidies sont renvoyés, généralement par réfraction ou par réflexion, vers un seul et même photorécepteur [61]. Ceci augmente considérablement la sensibilité avec un gain allant de 10^1 à 10^3 [141]. Les arthropodes qui sont dotés de tels yeux, comme les papillons de nuit et les coléoptères, sont alors capables de naviguer à basse luminosité (crépuscule et nuit).

On comprend donc aisément que le type d'œil composé et le mode d'acquisition de l'information visuelle sont intrinsèquement liés aux besoins des insectes : navigation, alimentation, reproduction, et survie, ainsi qu'à l'environnement dans lequel ils évoluent.

2.1.2 La polarisation de la lumière du ciel

L'information de cap est une composante décisive en navigation. Pourquoi les fourmis du désert [136], mais aussi les grillons [135, 138] ou encore les papillons monarques [186] utilisent-ils la lumière polarisée pour déterminer leur cap lorsqu'ils naviguent ?

2.1.2.1 Le ciel vu au travers d'un filtre polarisé linéairement

Comme beaucoup d'autres espèces, 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 2.3A. 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 observe la présence d'une barre très foncée se dessiner nettement dans le ciel (Fig. 2.3B,C).

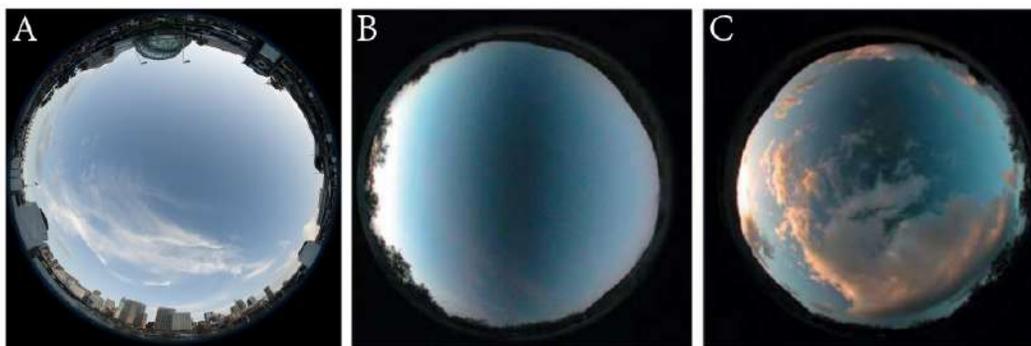


FIGURE 2.3 – Vues en *fish-eye* de la voûte céleste. **A** Photographie prise sans filtre polarisant linéaire. (Crédits : Nigel Howe sous la licence CC BY 2.0). **B,C** Photographies prises avec un filtre polarisant linéaire sous un ciel dégagé (à gauche) et nuageux (à droite). Dans les deux cas, le méridien solaire correspond à l'axe vertical car le soleil se situe à gauche sur l'horizon. En orientant le filtre polarisant dans la même direction que le méridien solaire, on voit se dessiner une barre plus foncée et perpendiculaire au 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, c'est à dire le demi-cercle de la voûte céleste passant par le soleil et le zénith, sont orientés de la même manière, alors la barre foncée sera perpendiculaire au méridien ;
- en revanche, si l'on oriente le filtre perpendiculairement au méridien, alors la barre sera orientée suivant le méridien solaire.

La figure 2.4 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.

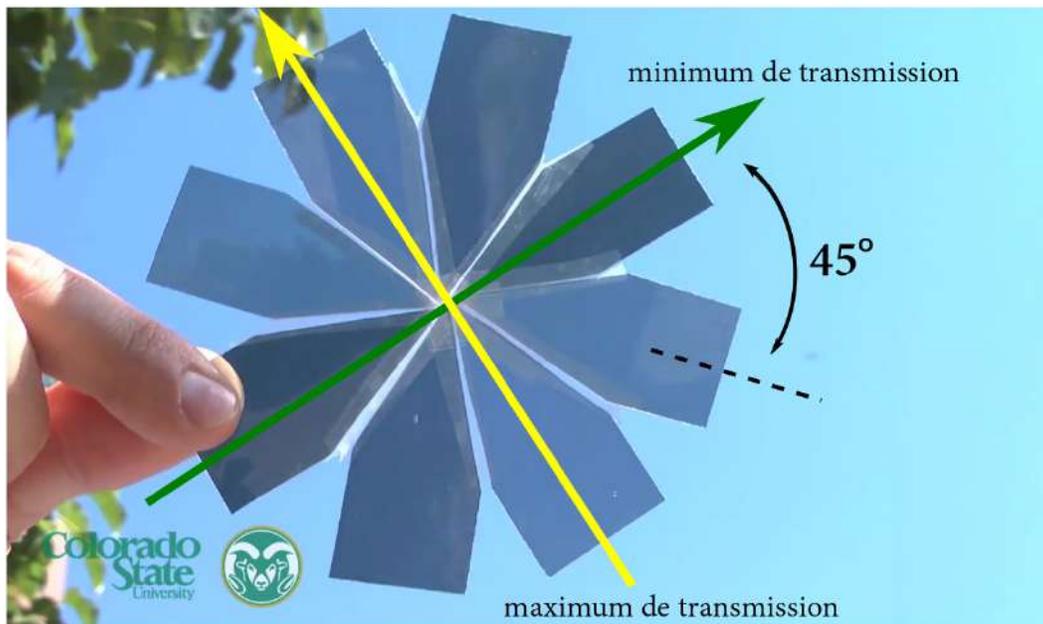


FIGURE 2.4 – Photographie montrant l'absorption plus ou moins importante de la lumière du ciel lorsque celle-ci traverse un filtre polarisant linéaire. En fonction de l'orientation de ce dernier, la lumière est plus ou moins transmise : le maximum de transmission est obtenu selon l'orientation décrite 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).

2.1.2.2 Le motif de polarisation de la lumière du ciel

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 qui constituent notre atmosphère entraînent la polarisation linéaire de la lumière du ciel selon un motif régulier et symétrique par rapport au méridien solaire, et dont la configuration est due à la position du soleil dans la voûte céleste [40–42, 78] (Fig. 2.5).

Afin de mieux comprendre ce motif très spécifique, il est nécessaire de revenir aux principes fondamentaux de la polarisation. La lumière du soleil est naturellement dépolarisée, cela signifie que les ondes qui la composent oscillent dans toutes les directions comme indiqué sur la figure 2.6. L'atmosphère terrestre joue alors le rôle de polariseur linéaire partiel en

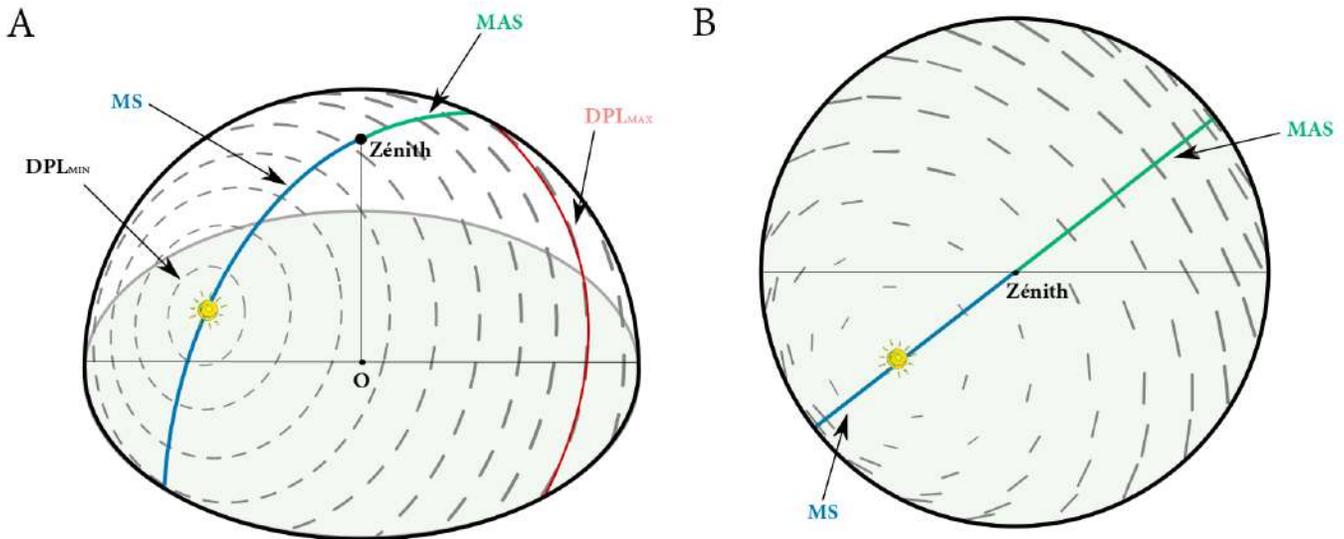


FIGURE 2.5 – La polarisation de la lumière du ciel. **A** Diagramme de polarisation linéaire de la lumière du ciel en fonction de la position du soleil (S) et relativement à un observateur (O). Le disque plan est considéré tangent à la surface de la terre ; l'axe (OZ) est défini comme la normale à ce 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). Adapté de [178, 246]. **B** Projection du motif de polarisation sur le disque plan. On observe que toutes les orientations sont parallèles le long du méridien solaire et antisolaire, et perpendiculaires au méridien.

polarisant une partie de la lumière du soleil selon une orientation principale. On caractérise alors l'état de polarisation de l'onde lumineuse à travers deux grandeurs :

- l'angle de polarisation, noté AdP, déterminant l'orientation de l'axe des oscillations ;
- le degré de polarisation linéaire, noté DPL, correspondant à l'intensité de la lumière polarisée linéairement divisée par l'intensité totale.

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

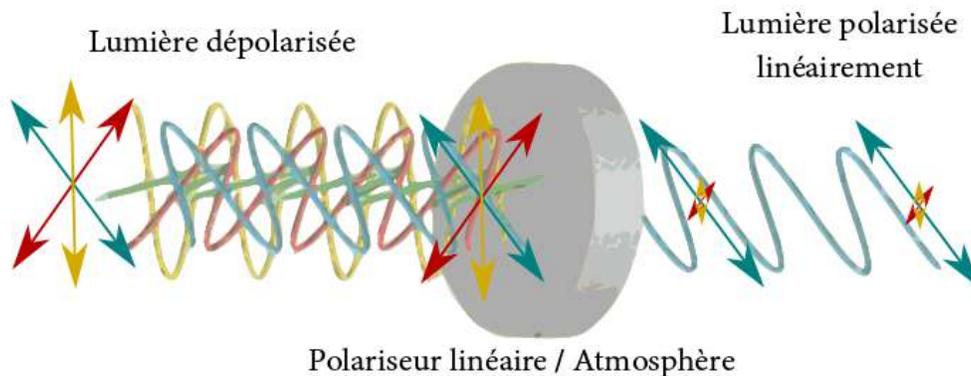


FIGURE 2.6 – Schéma représentant l'effet de l'atmosphère terrestre (i.e. un polariseur linéaire) sur la lumière dépolarisée provenant du soleil. L'angle de polarisation correspond donc à l'orientation de la lumière polarisée.

Le maximum de polarisation de la lumière se produit à 90° du soleil (ou de la lune, laquelle crée également un motif de polarisation). Le degré de polarisation, que l'on notera mathématiquement d , augmente avec la distance par rapport au soleil, puis diminue au-delà de 90° (Fig. 2.7). Il en résulte que le degré de polarisation linéaire est minimal autour du soleil ($d_{min} \approx 0.01$), et maximal à 90° du soleil ($d_{max} \approx 0.75$ dans des conditions atmosphériques normales) [16, 41].

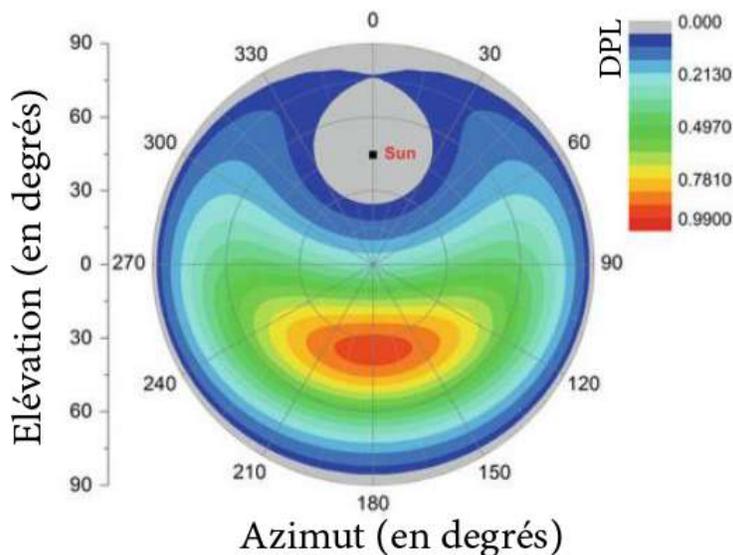


FIGURE 2.7 – Diagramme simulé de la distribution du degré de polarisation linéaire (DPL) d'après la théorie de Rayleigh, en fonction de la position du soleil dans la voûte céleste. Extrait de [170].

Quelle que soit la position du soleil, la distribution des angles de polarisation est symétrique par rapport aux méridiens solaire et antisolaire, lesquels sont constitués par le demi-cercle passant par le zénith et le soleil (Fig. 2.5A). 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.

Pour des applications industrielles, en particulier dans le cadre du véhicule intelligent, il faut pouvoir relier le cap, i.e. l'AdP, à un référentiel classique comme le Nord géographique. En considérant que l'on puisse déterminer l'état de la polarisation de la lumière du ciel, i.e. l'AdP, alors l'orientation du méridien est directement acquise (déphasage de 90° avec l'AdP). Or, le méridien est directement lié à la position du soleil dans le ciel. En connaissant l'évolution de la position du soleil (azimut et élévation) au cours du temps, que l'on appelle fonction éphéméride, alors le cap peut être déterminé relativement au Nord géographique.

2.1.3 La vision polarisée chez les insectes

L'aire marginale dorsale de l'œil composé des insectes, c'est-à-dire les ommatidies qui se trouvent le long de la bordure haute de l'œil, appelée DRA (*Dorsal Rim Area*), est composée d'ommatidies sensibles à la polarisation de la lumière [137, 240]. Chaque ommatidie se compose de deux groupes de microvillosités organisées parallèlement les unes aux autres et fixées le long du rhabdome (Fig. 2.1D). De cette manière, l'absorption des photons est maximale lorsque l'AdP de la lumière coïncide avec l'orientation des microvillosités. On observe

une organisation perpendiculaire des orientations de chacun des deux groupes de microvillosités [134, 136]. Le champ de vision de la DRA de chaque œil composé des fourmis *Cataglyphis bicolor* a été déterminé (Fig. 2.5A) [246]. La sensibilité spectrale des ommatidies situées dans la DRA varie entre les insectes (Fig. 2.8) : les fourmis du désert (*Cataglyphis*), les abeilles (*Apis*), le bousier ou encore les drosophiles sont sensibles aux rayonnements UV [47, 137], tandis que le grillon présente une sensibilité maximale dans le bleu (433 nm) [105]. Les fourmis du désert *Cataglyphis* ont un pic de sensibilité à 350 nm [134] avec une coupure à 420 nm [136]. Cette préférence UV peut s'expliquer par le fait que le degré de polarisation linéaire 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 [250]. Toutefois, cette hypothèse, dernière d'une longue série, reste l'objet de nombreux débats. En particulier, elle n'explique pas la préférence bleue ou verte observée chez d'autres espèces.

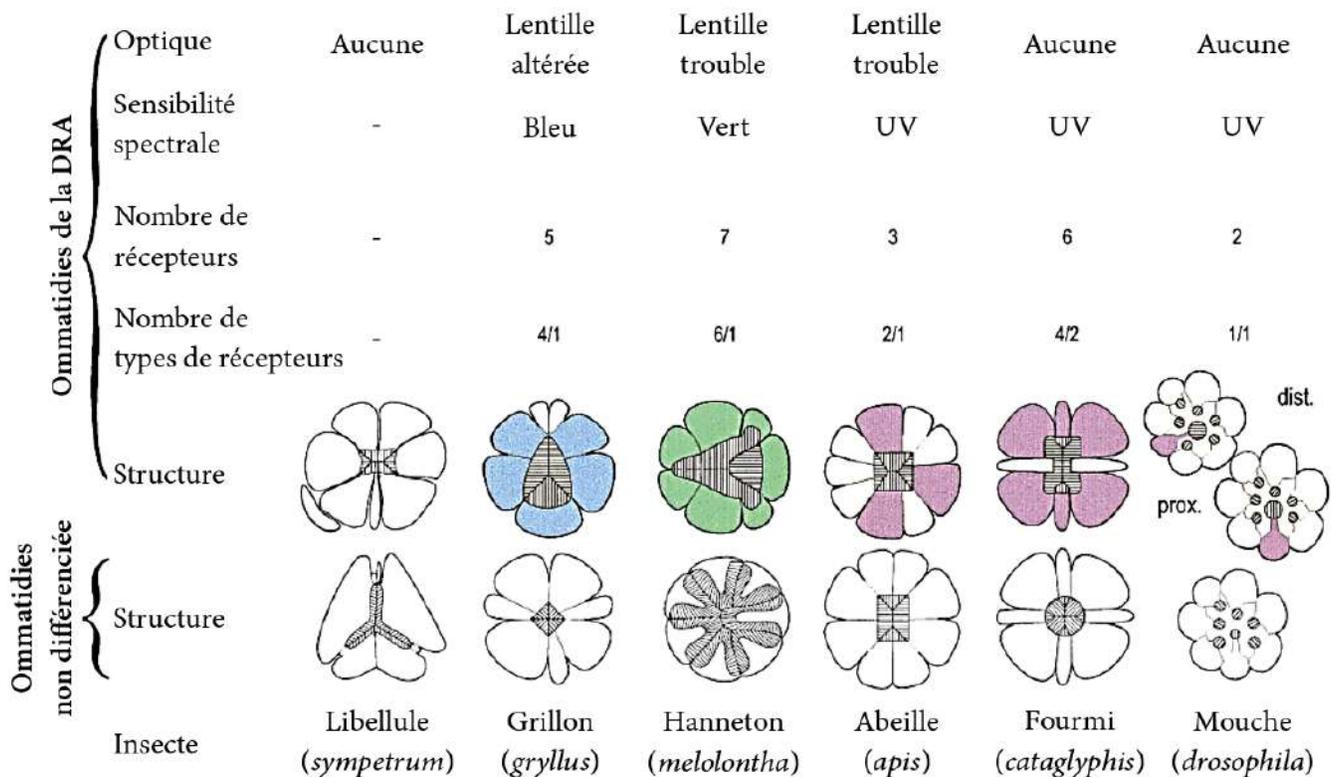


FIGURE 2.8 – La sensibilité spectrale de la DRA des insectes. On distingue les ommatidies de la DRA, c'est-à-dire sensibles à la polarisation de la lumière du ciel, des ommatidies non différenciées, présentes dans le reste de l'œil composé et non sensibles à la polarisation de la lumière. Adapté de [137].

Le traitement neuronal de l'AdP a été étudié chez les sauterelles [94, 96, 106, 174], les grillons [94, 135, 138], les fourmis du désert [136, 205], les abeilles [224], les bousiers [45, 48, 50, 113, 114] ainsi que chez les papillons monarques [94, 95, 100, 166]. Un réseau permettant de traiter la lumière polarisée perçue par la DRA a été identifié, s'étendant des ommatidies de la DRA jusqu'au complexe central [97, 98, 106, 107] (Fig. 2.9 et annexe C). Ce réseau neuronal peut être découpé en trois étages distincts [49, 99, 107, 174]. La lumière polarisée est d'abord captée par les ommatidies de la DRA, dont l'orientation préférentielle des microvillosités permet de couvrir l'ensemble de l'intervalle [0°; 180°]. Comme cela a été observé chez

les grillons [135] et les sauterelles [107, 108], l'information est ensuite envoyée vers le lobe optique, dans la partie haute de la lamina puis de la médulla. 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° [94]. Cependant, aucune description ne semble avoir été faite chez les autres insectes. 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°; 180°] [96, 99]. Des études récentes menées sur le complexe central de la drosophile suggèrent que la direction pourrait être déterminée par une classe de réseaux de neurones récurrents appelée attracteur en anneau (*ring attractor*) [123]. Chaque neurone impliqué dans ce réseau s'active pour des indices visuels panoramiques et des vitesses angulaires spécifiques. Une population de ces neurones peut donc être utilisée pour déterminer le cap de l'insecte. Compte tenu des remarquables similarités neuroanatomiques observées chez de nombreux insectes pourtant très différents, on peut supposer que ces attracteurs en anneaux existent également chez la plupart des insectes, mais avec des entrées sensorielles différentes (compas magnétique et / ou solaire, flux optique, intégration des foulées ou des battements d'ailes, etc.).

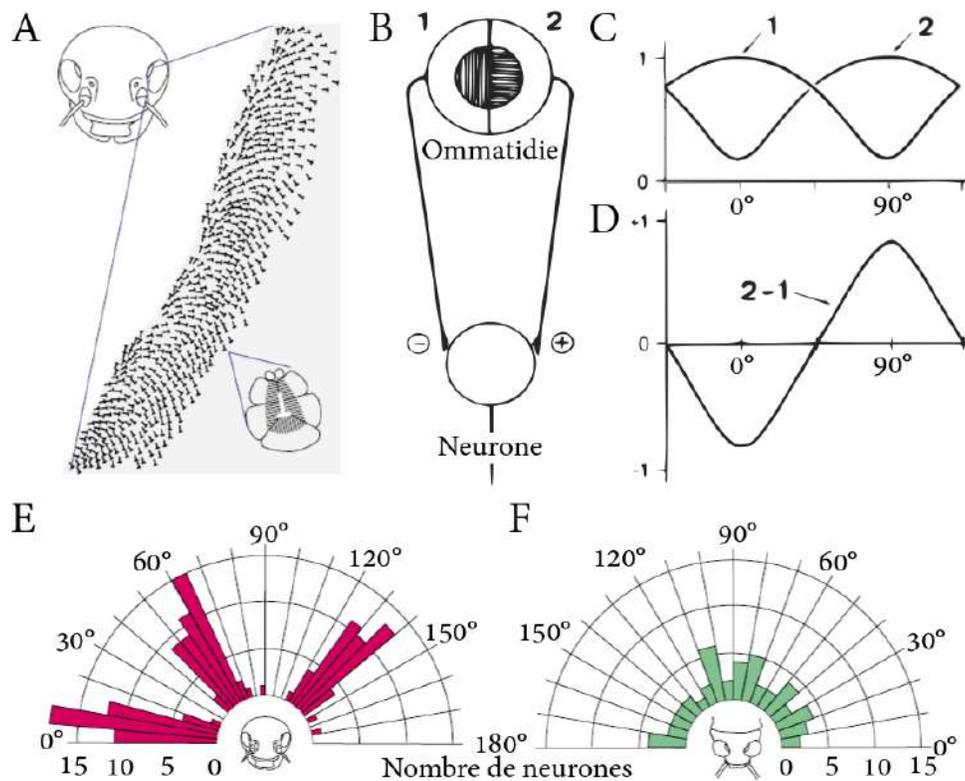


FIGURE 2.9 – Le traitement neuronal de la lumière polarisée chez les insectes. **A** Distribution et orientation des ommatidies dans la DR du grillon. **B** Modèle d'un neurone polarisé. **C** Réponse des ommatidies en fonction de l'orientation de leurs filtres polarisés (perpendiculaires entre eux). **D** Signal de sortie du neurone polarisé, équivalente à une différence logarithmique des deux ommatidies. **A–D** Adaptés de [135]. **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. Adaptés de [138].

2.2 Etat de l’art des compas célestes

Le projet Sahabot, mené par Lambrinos et al. à la fin des années 1990, représente la toute première implémentation robotique d’un compas céleste inspiré des insectes [139, 140]. Sahabot était un robot doté de six roues et conçu pour réaliser des tâches de navigation autonome en s’inspirant des fourmis du désert (navigation) et des grillons (capteurs). Le compas céleste était composé de trois unités de polarisation disposées selon des directions préférentielles régulièrement espacées (0° , 60° et 120°), de façon à reproduire la sélectivité angulaire des neurones du lobe optique chez le grillon [135] (Fig. 2.10A,B). 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 en environnement réel désertique ont conduit à une erreur moyenne de 0.66° [139]. 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 capteurs d’une part, et de bénéficier d’un degré de polarisation linéaire maximal au zénith d’autre part (Fig. 2.5B).

Auteurs	Année	Ref.	Solution technologique	Bio-inspiré	UV	Minimaliste
Lambrinos et al.	1997	[139]		✓	×	✓
Chu et al.	2008	[30]		✓	×	✓
Chahl et al.	2012	[24]	Photodiodes	✓	×	✓
Wang et al.	2015	[233]		×	✓	×
Dupeyroux et al.	2017	[56]		✓	✓	✓
Zhi et al.	2018	[262]		×	×	✓
Sarkar et al.	2010	[202]		×	×	×
Chu et al.	2014	[31]	Capteur intégré	✓	×	✓
Garcia et al.	2017	[79]		Crustacés	×	×
Carey et al.	2011	[23]		✓	✓	×
Sarkar et al.	2013	[201]		✓	×	×
Wang et al.	2014	[232]		✓	×	×
Zhang et al.	2015	[259]		✓	✓	×
Fan et al.	2016	[65]	Caméra CMOS	×	×	×
Zhang et al.	2016	[260]		×	✓	×
Wang et al.	2017	[234]		×	×	×
Han et al.	2017	[92]		×	×	×
Fan et al.	2018	[64]		×	×	×
Momeni et al.	2006	[161]	VLSI	×	×	×

TABLEAU 2.1 – 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*.

Dix ans plus tard, Chu et al. ont développé une version plus petite du compas embarqué sur Sahabot, composé de 3 unités de polarisation de directions préférentielles 0° , 60° et 120° (Fig. 2.10E) [30]. Les résultats des tests en performance montrèrent une excellente précision du capteur en lumière contrôlée, avec une erreur médiane de seulement 0.2° . Ce compas a notamment été utilisé en association avec un magnétomètre pour des projets de localisation

temps réel du véhicule autonome [233]. Forts de leur succès, ils ont procédé à la miniaturisation du compas céleste, en proposant une version intégrée du capteur en 2014 (Fig. 2.10F). En particulier, ce composant a donné une erreur moyenne de seulement 0.1° en lumière contrôlée et après une correction par ajustement polynomial [31]. D'autres implémentations ont été réalisées [24, 65, 116], mais celles de Lambrinos et al. d'une part, et plus récemment de Chu et al. d'autre part, semblent être les seules à avoir tenté une reproduction de la DRA à des fins de navigation terrestre autonome. Ces capteurs novateurs se sont montrés très efficaces dans la détermination du cap des robots sur lesquels ils étaient embarqués [28, 140]. Toutefois, ils se sont principalement focalisés sur l'hypothèse de la préférence angulaire des neurones du lobe optique pour les orientations 10° , 60° et 130° , et la bande spectrale ne concernait que la lumière bleue (400 nm).

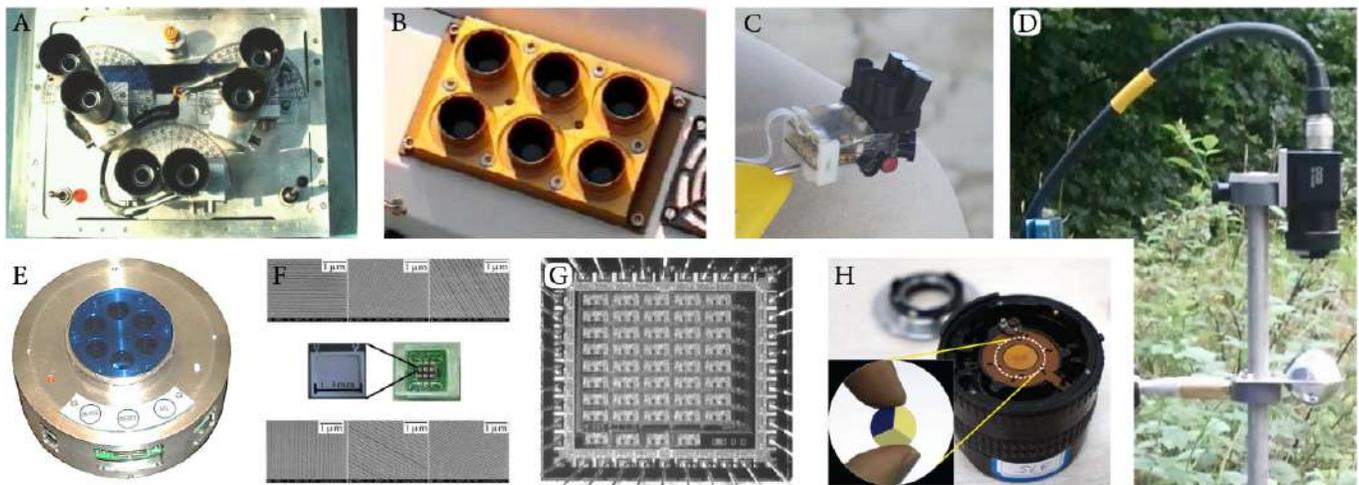


FIGURE 2.10 – Diverses implémentations de compas célestes : **A** Projet Sahabot 1 [139]; **B** Projet Sahabot 2 [140]; **C** Projet de Chahl et Mizutani [24]; **D** Projet de Carey et Stürzl [23]; **E** Première implémentation de Chu et al. [30]; **F** Version miniaturisée de Chu et al. [31]; **G** Capteur intégré (VLSI) de Momeni et al. [161]; **H** Projet à base de caméra CCD de Zhang et al. [259].

En complément de ces compas célestes bio-inspirés, plusieurs équipes de recherche ont développé des solutions utilisant des caméras CCD et CMOS opérant principalement dans le domaine visible (Tab. 2.1). 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 (Fig. 2.10D) [23]. 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, voir Section 2.4.1.1) [5, 222]. Wang et al. ont utilisé 3 caméras CCD à 1.2 mégapixels et surmontées de filtres bleus et de filtres polarisants linéaires orientés à 0° , 45° et 90° [232]. 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, le compas a donné de bonnes performances avec une erreur de cap égale à 0.3° sous des conditions météorologiques favorables. Le même principe a été renouvelé par Zhang et al. en remplaçant les trois caméras par une seule caméra CCD monochrome à 29 mégapixels surmontée d'un filtre polarisant linéaire divisé en 3 parties, chacune d'entre elle ayant une direction de polarisation différente (0° , 60° et 120°) (Fig. 2.10H) [259]. 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°). On note par ailleurs dans certaines implémentations l'utilisation de filtres polarisants linéaires radiaux [260]. Enfin, Fan et al. ont récemment conçu un compas céleste utilisant 4 caméras CCD de 0.8 mégapixels avec des orientations de filtres polarisants à 0° , 45° , 90° et 135° . Toutes ces méthodes ont généralement fait leurs preuves, avec des erreurs moyennes d'estimation du cap ne dépassant pas quelques degrés.

2.3 Développement d'un compas céleste parcimonieux

2.3.1 Motivations

Les implémentations minimalistes et bio-inspirées de compas célestes que nous venons de passer en revue montrent clairement des performances intéressantes pour une application en navigation autonome. Toutefois, ce succès doit être nuancé par les conditions d'expérimentation systématiquement favorables (environnement contrôlé ou conditions météorologiques optimales). 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 représentent une limite forte pour tout éventuel déploiement en robotique mobile terrestre.

L'enjeu est donc de concevoir un compas céleste nécessitant peu de pixels et de ressources calculatoires et de petite taille, et dont la configuration et le fonctionnement serait 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 précédentes implémentations. Or, une grande partie des insectes utilisant la polarisation de la lumière du ciel comme information de cap en navigation présentent une sensibilité aux UV. Des millions d'années d'évolution témoignent sans aucun doute d'un intérêt concret à utiliser cette bande spectrale et non une autre. De surcroît, les activités humaines n'émettent pas de rayonnement UV et l'on peut donc considérer que les perturbations visuelles seront moins fortes dans les UV que dans le bleu ou dans le vert.

2.3.2 Le compas céleste en bande UV

Le compas céleste développé dans le cadre de ces travaux de thèse 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. 2.11). Le rapport de réduction entre l'engrenage moteur et celui du filtre polarisant est de 1 : 7. Le prototype est intégralement imprimé en 3D à l'aide de filament PLA (acide polylactique). Les pièces sont accessibles en ligne ¹. 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>

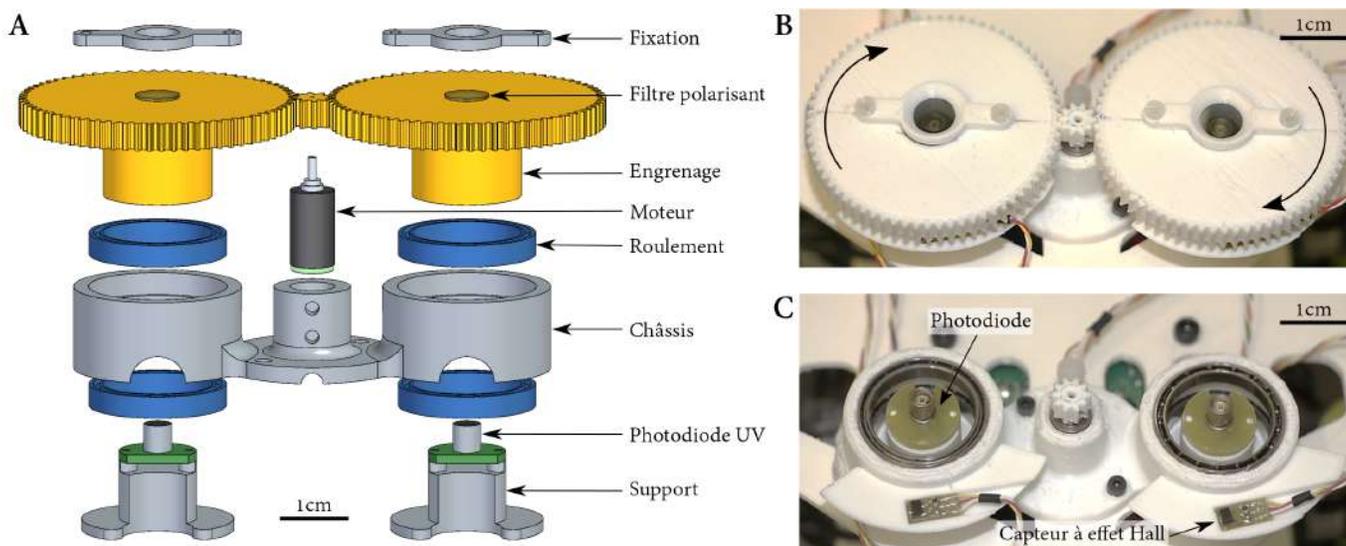


FIGURE 2.11 – **A** Vue en éclaté du compas céleste. **B** Photographie du compas. **C** Photographie du compas sans les engrenages. On distingue notamment les capteurs à effet Hall, permettant de donner une référence dans la rotation des engrenages équipés des filtres.

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 mm²; 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. L'implémentation électronique est développée en annexe D.

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

2.3.3 Méthode de détermination du cap : 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

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

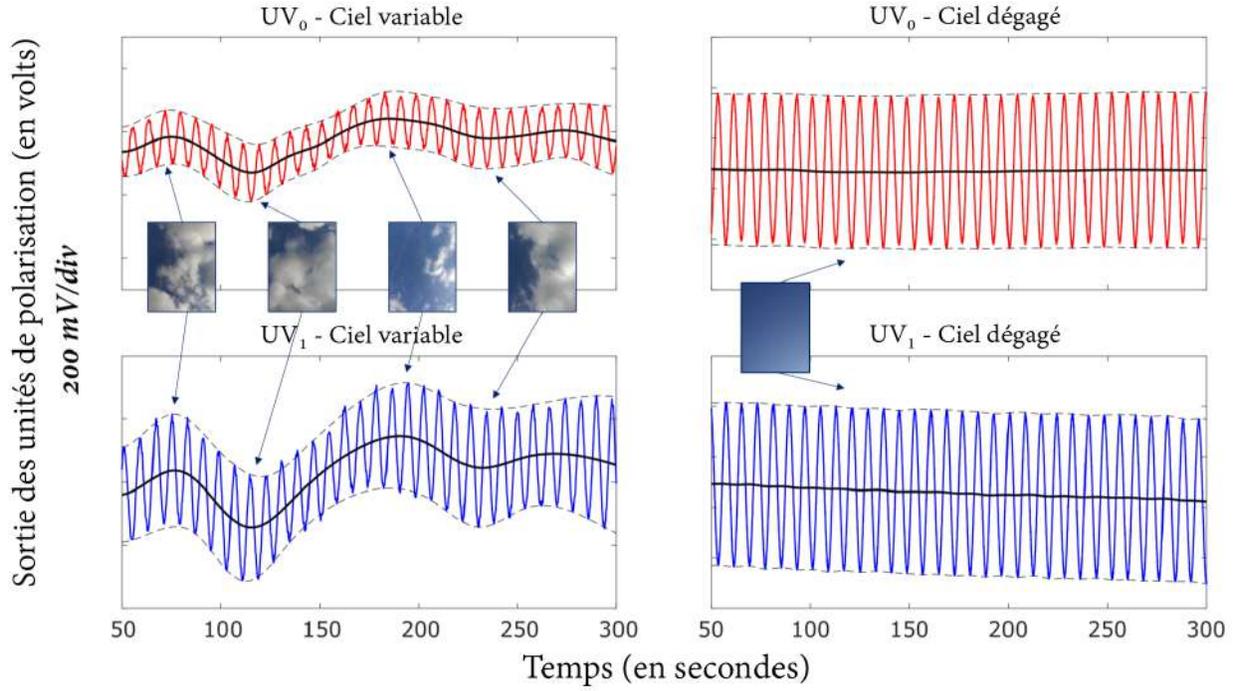


FIGURE 2.12 – Signaux de sortie des unités de polarisation UV_0 (en rouge) et UV_1 (en bleu) en fonction des conditions météorologiques : ciel variable (à gauche) et ciel dégagé (à droite). Les courbes noires donnent l'intensité lumineuse UV moyenne. Ces sinusoïdes ont été obtenues avec la boussole céleste à Marseille en avril 2017.

la fin de l'acquisition, donnant ainsi précisément le nombre de mesures N faites (Fig. 2.11C). Le traitement des signaux ainsi obtenus est directement inspiré de l'illustration du fonctionnement des neurones du lobe optique chez le grillon formulée par Thomas Labhart [135].

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 :

$$\begin{cases} UV_{0,i}(\psi) = A_{0,i} + B_{0,i} \cdot \cos(2 \cdot (\psi + \psi_i)) + \alpha_{0,i} \\ UV_{1,i}(\psi) = A_{1,i} + B_{1,i} \cdot \cos(2 \cdot (\psi + \psi_i + 90^\circ)) + \alpha_{1,i} \end{cases} \quad (2.1)$$

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, ou offset, propre à chaque photodiode d'autre part. De même, $B_{0,i}$ et $B_{1,i}$ sont des gains constants qui dépendent notamment du degré de polarisation linéaire (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 au bruit 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. Etant donné la symétrie du motif de polarisation (Fig. 2.5), 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. 2.13). 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 :

$$\begin{cases} UV_{0,i}^{nc}(\psi) = \frac{1}{2+\epsilon} (1 + \cos(2 \cdot (\psi + \psi_i))) + \epsilon \\ UV_{1,i}^{nc}(\psi) = \frac{1}{2+\epsilon} (1 + \cos(2 \cdot (\psi + \psi_i + 90^\circ))) + \epsilon \end{cases} \quad (2.2)$$

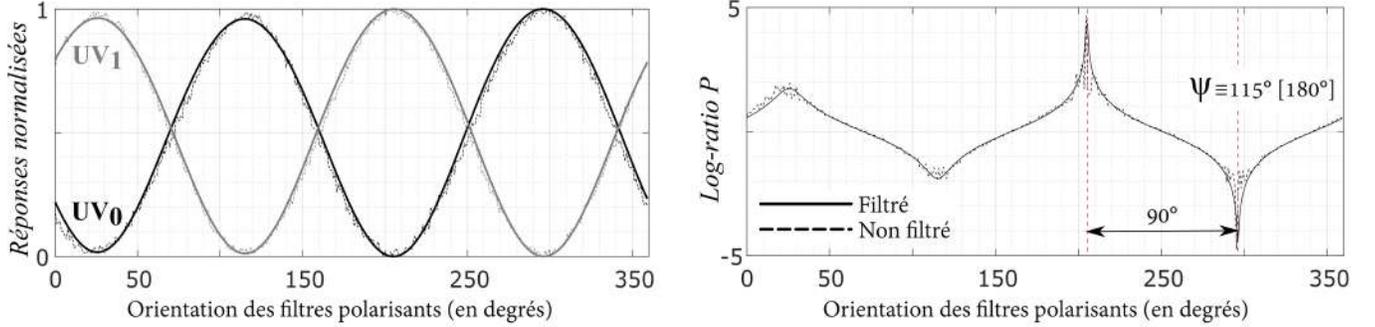


FIGURE 2.13 – Exemple de signaux obtenus en avril 2017 (ciel dégagé, indice UV égal à 7). **Gauche** Signaux normalisés avant (pointillés) et après filtrage (trait plein). **Droite** Fonctions P (log-ratio) correspondantes. L'AdP détecté est égal à $115^\circ [180^\circ]$.

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. 2.3, Fig. 2.13). 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.

$$\forall i \in \llbracket 1..N \rrbracket, P_i = \log_{10} \left(\frac{UV_{0,i}^{nc}(\psi)}{UV_{1,i}^{nc}(\psi)} \right) \quad (2.3)$$

On en déduit :

$$\forall i \in \llbracket 1..N \rrbracket, P_i = \log_{10} \left(\frac{1 + \cos(2 \cdot (\psi + \psi_i)) + \epsilon}{1 - \cos(2 \cdot (\psi + \psi_i)) + \epsilon} \right) \quad (2.4)$$

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 [96]. En effet, le pont protocérébral serait découpé en plusieurs groupements de neurones, chacun étant activé par un AdP spécifique (voir annexe C). 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 (voir démonstration en annexe F) :

$$\psi = \frac{1}{4} \left(\Delta\psi \cdot \left(\arg \min_{i \in \llbracket 1..N/2 \rrbracket} P_i + \arg \min_{i \in \llbracket N/2+1..N \rrbracket} P_i + \arg \max_{i \in \llbracket 1..N/2 \rrbracket} P_i + \arg \max_{i \in \llbracket N/2+1..N \rrbracket} P_i \right) - 180^\circ \right) \quad (2.5)$$

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 $\Delta\psi = 0.96^\circ$.

Variante de calcul du cap céleste

En pratique, la durée d'acquisition du signal reste suffisamment importante pour déceler une variation de la luminosité UV due à la course du soleil (Fig. 2.13). Ainsi, certains extrema sont atténués par la différence logarithmique (Eq. 2.3) et peuvent générer des angles erronés. Pour éviter ce problème, on peut se contenter des extrema globaux :

$$\psi = \frac{1}{2}(\psi_1 + \psi_2 + \text{sgn}(\psi_1 - \psi_2) \cdot 90^\circ) \quad (2.6)$$

avec en particulier :

$$\begin{cases} \psi_1 = \Delta\psi \cdot \arg \min_{i \in [1..N]} P_i \pmod{180^\circ} \\ \psi_2 = \Delta\psi \cdot \arg \max_{i \in [1..N]} P_i \pmod{180^\circ} \end{cases} \quad (2.7)$$

Cette solution a notamment été utilisée lors des premiers tests réalisés avec le robot Hexabot car la durée d'acquisition était de 42 s [55, 56].

2.3.4 Caractérisation en lumière contrôlée

Le champ de vision ainsi que le niveau de bruit du compas céleste ont été caractérisés en lumière contrôlée à l'aide d'une source UV polarisée. Cette source, commune aux deux caractérisations, est un stylo UV LC-5 (*Polytec*), produisant un faisceau lumineux à la longueur d'onde $\lambda = 365 \text{ nm}$ pour une puissance de 200 mW. La surface d'émission est un disque de rayon 2.5 mm.

2.3.4.1 Champ de vision

Le système de caractérisation du champ de vision du compas céleste permet de faire varier l'élévation de la source UV au-dessus de celui-ci (Fig. 2.14A). On observe en figure 2.14B que pour des élévations différentes, l'amplitude crête-crête des signaux sinusoidaux mesurés par les photodiodes UV_0 et UV_1 varie. En particulier, l'amplitude crête-crête est maximale lorsque la source UV est au zénith (90°), tandis qu'elle est nulle lorsque la source UV se trouve à des élévations inférieures à 50° ou supérieures à 130° (données obtenues pour une utilisation du capteur en mode hiver).

Ainsi, l'ouverture angulaire du compas est de $\pm 45^\circ$ centrée autour du zénith, c'est-à-dire de 90° . Toutefois, il ne faut pas voir cette ouverture comme une limite du capteur. En effet, la lumière UV est naturellement rayonnée à travers la totalité de la voûte céleste : même si le soleil se trouve à l'horizon et donc en dessous de 50° d'élévation, le capteur continuera de mesurer un signal sinusoidal provenant du zénith. Le secteur angulaire $[50^\circ; 130^\circ]$ correspond aux élévations pour lesquelles l'intensité des UV est plus forte, s'accompagnant notamment d'un risque de saturation.

2.3.4.2 Niveau de bruit

Le bruit de mesure de chaque unité de polarisation a été déterminé par l'acquisition des signaux de sorties desdites photodiodes lorsque le compas céleste est placé dans une boîte noire. Dans le graphique donné en figure 2.15, on affiche l'histogramme des valeurs moyennes de

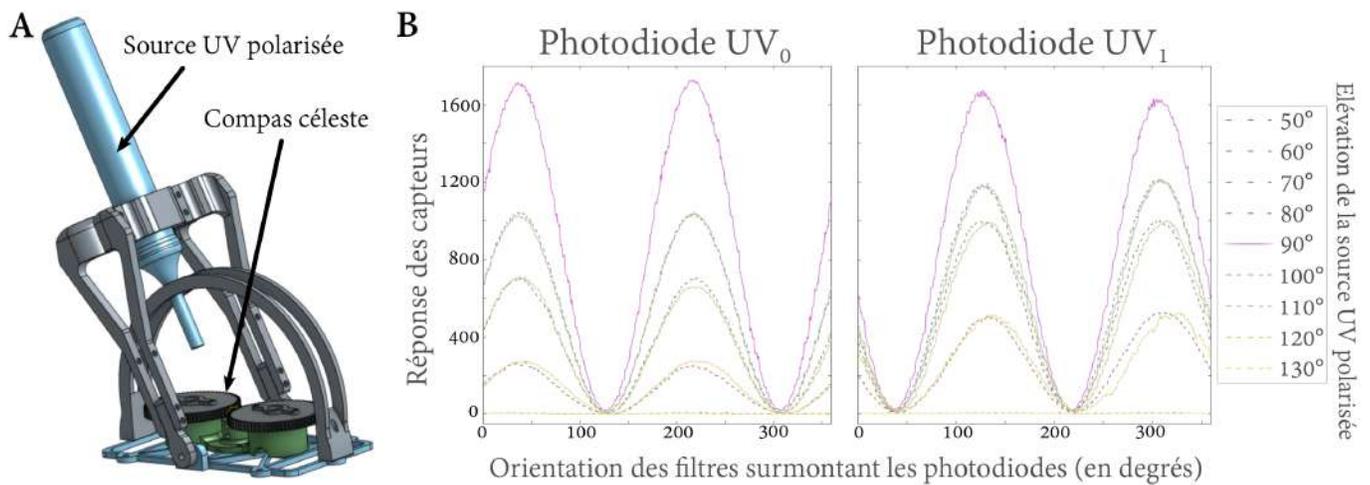


FIGURE 2.14 – Caractérisation du champ de vision du compas céleste. **A** Système de caractérisation. **B** Signaux bruts issus des photodiodes UV_0 et UV_1 en fonction de l’orientation des filtres polarisants et pour diverses élévations de la source UV.

la sortie de chaque photodiode. Cette valeur correspond à la moyenne de 16 mesures successives. Chaque distribution contient 380 échantillons. Le convertisseur analogique-numérique utilisé a une résolution de 12 bits. A l’aide de la fonction *histfit* de Matlab, on montre que les distributions du bruit de mesure des unités de polarisation suivent les lois normales suivantes : $UV_0 \sim \mathcal{N}(\mu_0 = 1.05, \sigma_0 = 0.12)$, et $UV_1 \sim \mathcal{N}(\mu_1 = 1.49, \sigma_1 = 0.19)$. Pour chaque photodiode, l’écart-type enregistré est en dessous d’un LSB (*Least Significant Bit*, de valeur $5 V/2^{12} = 1.22 \text{ mV}$) car $\sigma_1 < 1$ et $\sigma_2 < 1$.

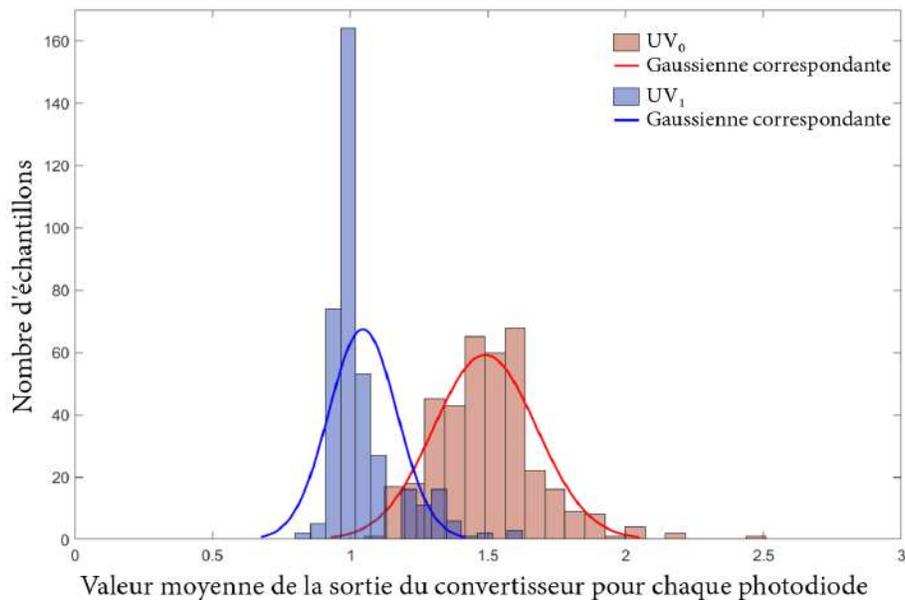


FIGURE 2.15 – Caractérisation du niveau de bruit des photodiodes UV_0 (en rouge) et UV_1 (en bleu). Sont également tracées sur le graphe les courbes de densité de probabilités gaussiennes correspondantes.

2.3.5 Reconstruction des éphémérides

Dans le cadre des expériences de navigation autonome réalisées avec le robot AntBot (voir Chapitre 3), la course du soleil et son incidence sur l'évolution de l'AdP ont été anticipées et compensées : les tables des éphémérides³ spécifiques à la date, au jour et au lieu de l'expérience étaient préalablement fournies au robot afin que celui-ci puisse corriger en temps réel son cap en fonction de la variation de l'élévation solaire. C'est également la stratégie qui avait été appliquée dans le cadre du projet Sahabot [140]. Cette solution est tout à fait envisageable pour de la navigation, mais elle nécessite de connaître diverses informations cruciales comme la zone géographique où le système autonome évolue. Une telle contrainte peut s'avérer délicate dans le cas d'une navigation longue distance, typiquement pour les longs trajets en avion, en train ou par bateau.

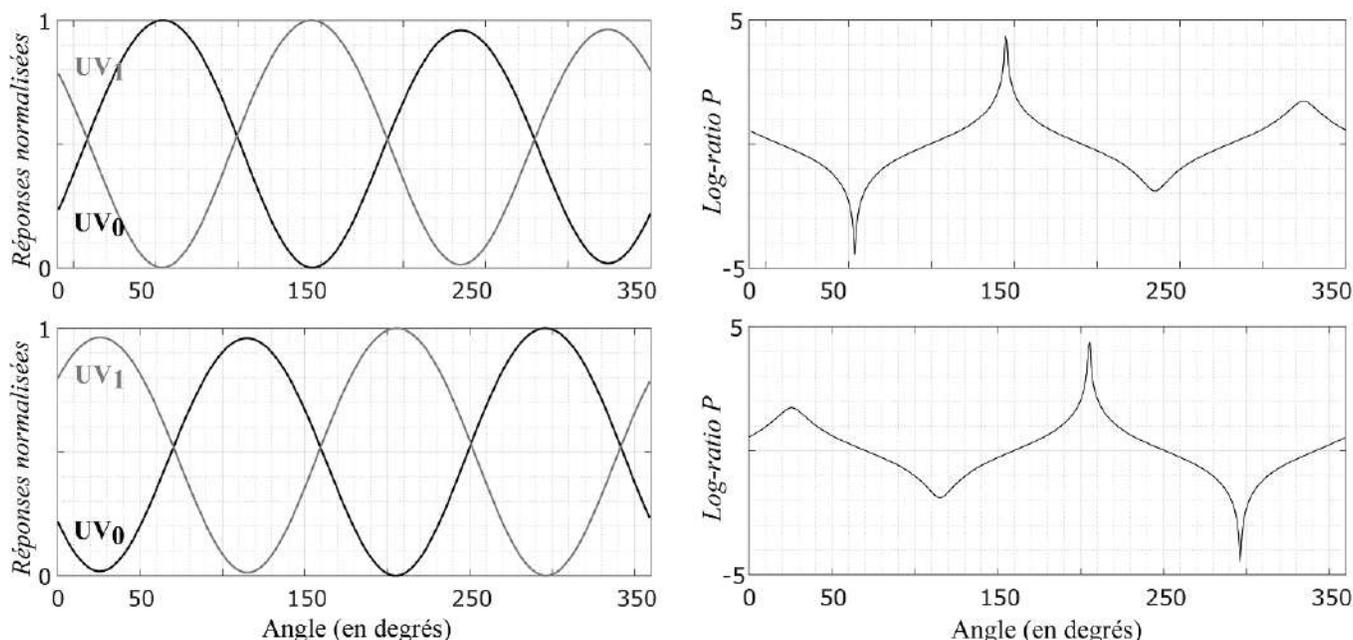


FIGURE 2.16 – Effet de l'élévation solaire sur les signaux UV_0 et UV_1 ainsi que sur les fonctions logarithmiques associées. **Haut** Cas d'une mesure faite durant l'après-midi. **Bas** Acquisition effectuée en cours de matinée.

Comme nous pouvons l'observer sur la figure 2.16, la course du soleil a une incidence sur la mesure du cap : selon que l'acquisition se fasse le matin ou l'après-midi, on observera respectivement une évolution croissante ou décroissante de l'amplitude crête-crête des signaux filtrés et normalisés UV_0^{nc} et UV_1^{nc} , ce qui a pour conséquence de donner des pics du ratio logarithmique plus marqués respectivement à droite ou à gauche de l'intervalle de mesure. Il s'avère que la variation de l'élévation solaire (Fig. 2.17 et Fig. 2.18A) correspond à un profil en \cos^2 répétable et relativement stable au cours de l'année. Par ailleurs, nous avons pu observer qu'à l'échelle de l'expérience, c'est-à-dire environs 30 min, la variation de l'élévation solaire est linéaire, avec un coefficient R^2 toujours supérieur à 0.95. Si l'on peut montrer une corrélation entre la variation d'amplitude crête-crête des signaux mesurés par le compas céleste

3. Accessibles sur le site https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php.

(Fig. 2.18B) et la variation d'élévation solaire, alors il serait possible de retrouver la variation de l'AdP de manière suffisamment précise pour ne pas dériver au cours du temps. Il ne suffirait alors que de la connaissance des pentes moyennes de la variation de l'élévation du soleil pour compenser sa dérive. Cette stratégie serait d'ailleurs biologiquement plausible, considérant que l'insecte disposerait d'une sorte de mémoire génétique déterminant grossièrement les éphémérides, connaissance qu'il affinerait au gré de ses sorties en dehors du nid [57].

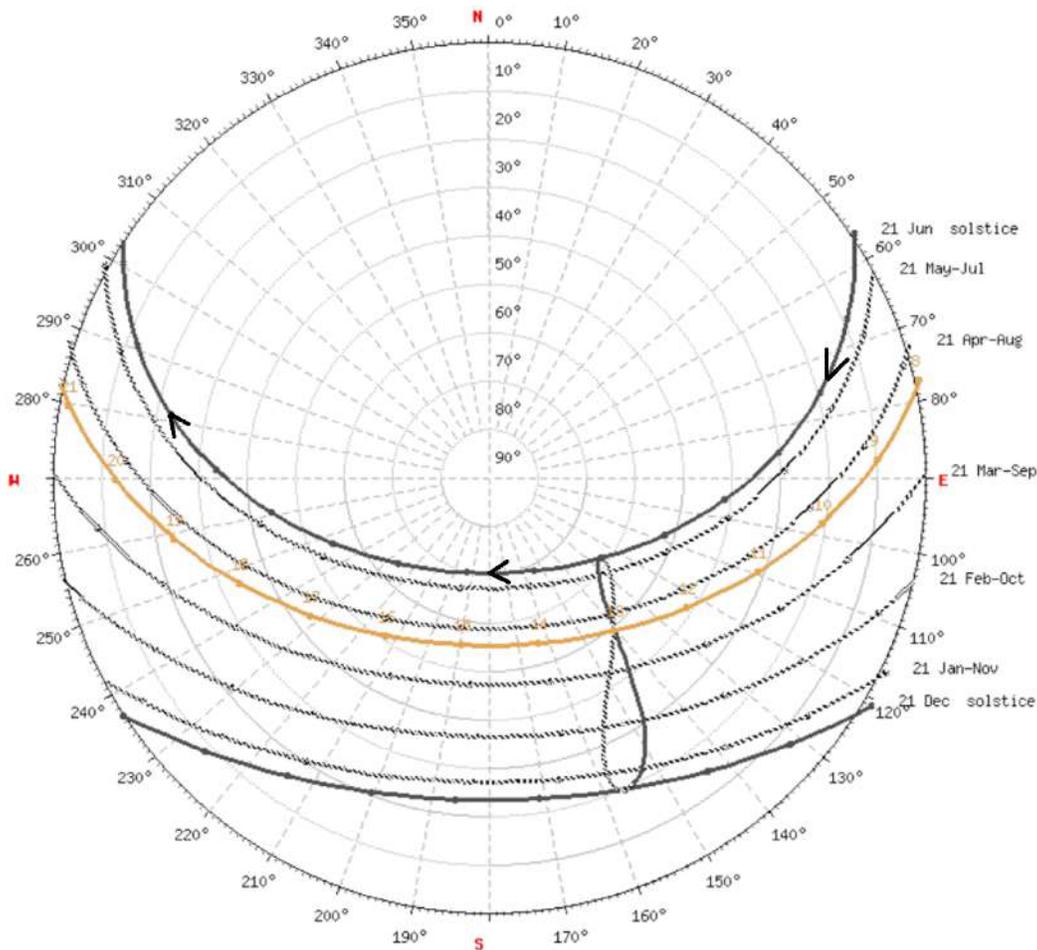


FIGURE 2.17 – Projection 2D de la course du soleil dans le ciel pour diverses périodes de l'année et relativement au lieu des expérimentations (Marseille, France). Source : https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=en.

2.4 Performances en conditions réelles

2.4.1 Les algorithmes d'extraction de l'angle de polarisation

Cette section introduit quatre algorithmes de détermination du cap du robot à l'aide du compas céleste embarqué, auxquels s'ajoute naturellement l'algorithme retenu pour la navigation d'AntBot et présenté dans la section 2.3.3. Parmi ces quatre algorithmes, deux sont directement tirés de l'art antérieur : la méthode de Stokes, et celle du projet Sahabot. Les

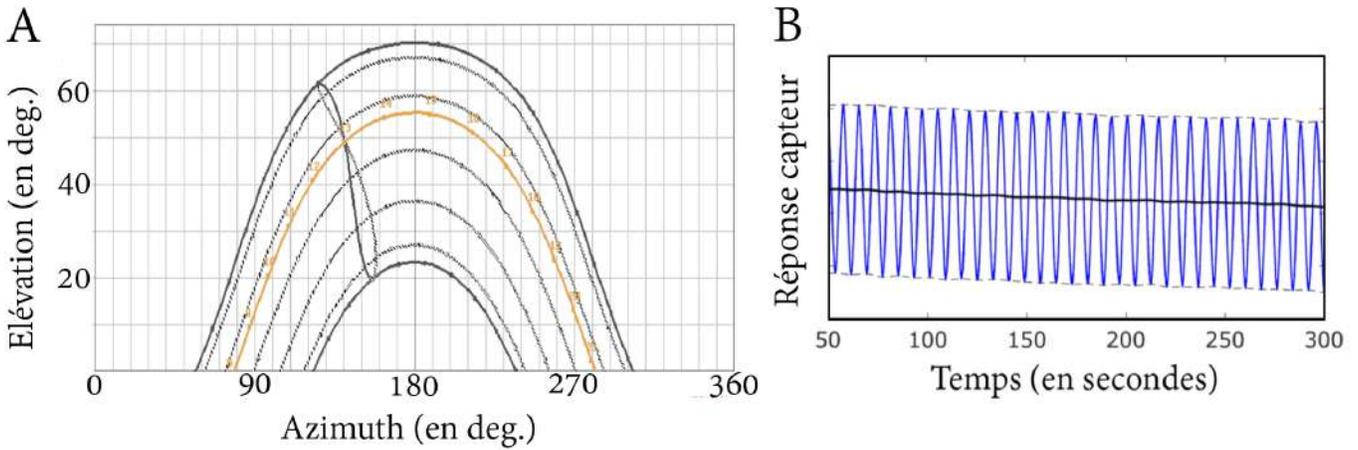


FIGURE 2.18 – **A** Evolution de l'élevation solaire en fonction de l'azimut pour diverses périodes de l'année à Marseille. Source : https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=en. **B** Décroissance d'amplitude observée en milieu d'après-midi avec le compas céleste sur une acquisition de 5 min par temps dégagé.

deux autres algorithmes sont adaptés de celui implémenté dans Sahabot : la méthode matricielle et sa version généralisée.

2.4.1.1 Le formalisme de Stokes

Le formalisme de Stokes permet de représenter un état de polarisation par quatre paramètres, appelés les paramètres de Stokes [222, 223]. On note \vec{E} le vecteur de champ électrique en mode transverse :

$$\vec{E}(\vec{u}, t) = \begin{bmatrix} E_{0x} \cos(\omega \cdot t - \vec{k} \cdot \vec{u} + \delta_x) \\ E_{0y} \sin(\omega \cdot t - \vec{k} \cdot \vec{u} + \delta_y) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

où E_{0x} et E_{0y} sont les amplitudes de l'onde lumineuse respectivement selon les axes de propagation \vec{x} et \vec{y} , ω est la pulsation (en $rad \cdot s^{-1}$, $\omega = 2\pi c/\lambda$ où c est la célérité de l'onde et λ la longueur d'onde), \vec{k} est le vecteur d'onde, \vec{u} est le vecteur de position, et δ_x et δ_y sont les phases respectivement selon les axes \vec{x} et \vec{y} , dont la différence correspond au retard de phase δ :

$$\delta = \delta_x - \delta_y \quad (2.9)$$

C'est précisément la valeur de δ qui décrit le type de polarisation que subit l'onde lumineuse. En particulier, on note que :

- si δ n'est pas constant alors l'onde est dépolarisée,
- si $\delta = 0$ alors l'onde est polarisée linéairement et \vec{E} se propage dans un plan,
- si δ est constant mais non nul alors l'onde est polarisée elliptiquement et \vec{E} tourne autour de \vec{z} en décrivant une ellipse,
- enfin, si $\delta = \pi/2$ alors l'onde est polarisée circulairement et \vec{E} tourne autour de \vec{z} en formant un cercle.

Les paramètres de Stokes, notés S_0 à S_3 , donnent une description précise de l'état de polarisation de l'onde. Ils sont définis d'après l'équation 2.8 comme suit :

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \\ E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \\ 2 \cdot E_{0x} \cdot E_{0y} \cdot \cos(\delta) \\ 2 \cdot E_{0x} \cdot E_{0y} \cdot \sin(\delta) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Le premier paramètre S_0 donne l'intensité lumineuse totale de l'onde, nécessairement strictement positive. Le paramètre S_1 quantifie la polarisation linéaire dans les plans horizontal \vec{x} et vertical \vec{y} , tandis que le paramètre S_2 la quantifie dans les plans bissecteurs à $\pm 45^\circ$. Le dernier paramètre S_3 caractérise la polarisation circulaire de l'onde, et peut donc être positive ou négative en fonction du sens de rotation du champ électrique \vec{E} . Il est alors possible de définir l'intensité lumineuse $I(\theta, \varphi)$ mesurée au travers d'un filtre polarisant linéaire d'orientation θ , suivi d'une lame à retard de phase (ou analyseur) d'orientation φ :

$$I(\theta, \varphi) = \frac{1}{2} \left(S_0 + S_1 \cdot \cos(2\theta) + S_2 \cdot \sin(2\theta) \cdot \cos(\varphi) + S_3 \cdot \sin(2\theta) \cdot \sin(\varphi) \right) \quad (2.11)$$

L'AdP ψ peut alors être estimé d'après les paramètres de Stokes S_1 et S_2 dans l'intervalle $[0^\circ; 90^\circ[$ [222] :

$$\psi = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{S_2}{S_1} \right) \bmod 90^\circ \quad (2.12)$$

avec notamment :

$$\begin{cases} S_1 = I(0^\circ, 0^\circ) - I(90^\circ, 0^\circ) \\ S_2 = I(45^\circ, 0^\circ) - I(135^\circ, 0^\circ) \end{cases} \quad (2.13)$$

où les valeurs de $I(\theta, \varphi)$ sont obtenues avec le compas céleste selon la description donnée en figure 2.19A. Il est également possible de déterminer le degré de polarisation d de l'onde, donné par la relation :

$$d = \sqrt{d_{lin}^2 + d_{circ}^2} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \quad (2.14)$$

où $d_{lin} = \sqrt{S_1^2 + S_2^2}/S_0$ est le degré de polarisation linéaire, et $d_{circ} = |S_3|/S_0$ est le degré de polarisation circulaire. Compte-tenu du recours à la fonction arctangente, l'AdP est connu modulo 90° . Cette restriction mathématique introduit donc une ambiguïté supplémentaire qu'il n'est pas possible de résoudre en l'état.

2.4.1.2 La méthode Sahabot

Inspirée du système visuel du grillon [135], cette deuxième méthode d'extraction de l'AdP ψ a été présentée au travers des projets Sahabot 1 et 2 de Lambrinos et al. (1997-2000) [139, 140], puis reprise notamment par Chu et al. à la fin des années 2000 [28–30]. Chaque unité de polarisation $i \in [1..3]$ se compose de deux cellules photoréceptrices $UV_{0,i}$ et $UV_{1,i}$ dont les filtres sont disposés perpendiculairement. On peut alors écrire la réponse de chaque cellule pour toute orientation $\psi_k \in \{0^\circ, 60^\circ, 120^\circ\}$ des filtres polarisants :

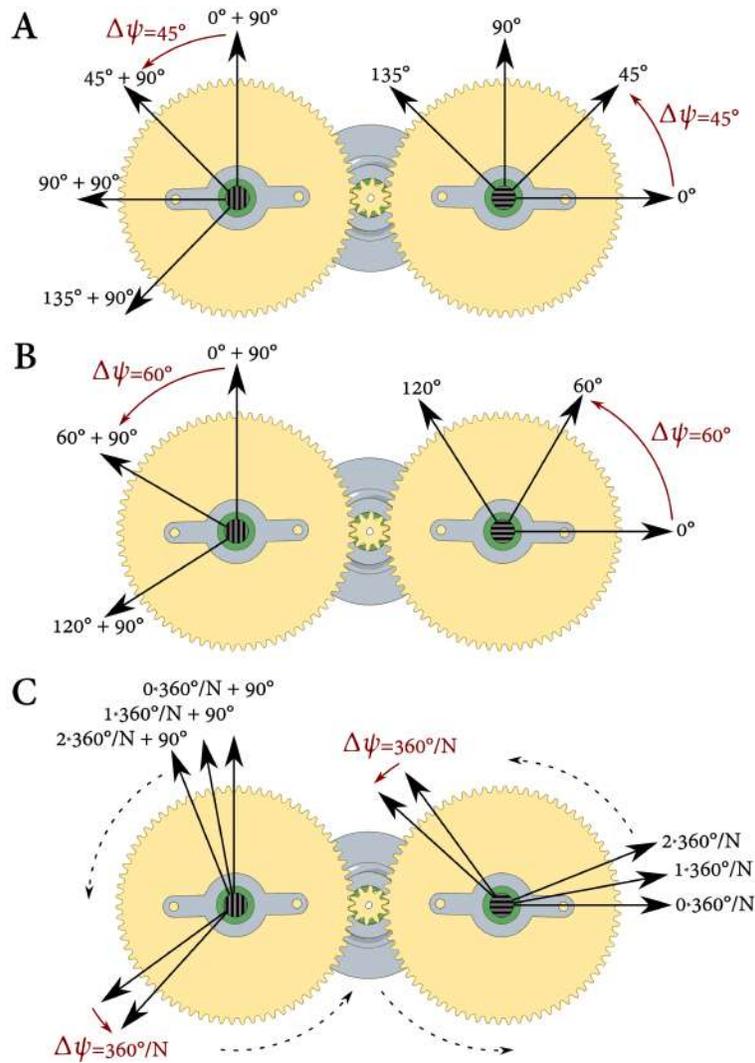


FIGURE 2.19 – Choix de $\Delta\psi$ en fonction de la méthode de calcul de l'AdP : **A** méthode de Stokes (section 2.4.1.1); **B** méthode de Lambrinos (section 2.4.1.2) et méthode matricielle (section 2.4.1.3); **C** méthode matricielle généralisée (section 2.4.1.4) et méthode d'AntBot (section 2.3.3).

$$\begin{cases} UV_{0,i}(\psi) = \Gamma \cdot I \cdot (1 + d \cdot \cos(2(\psi + \psi_k))) \\ UV_{1,i}(\psi) = \Gamma \cdot I \cdot (1 - d \cdot \cos(2(\psi + \psi_k))) \end{cases} \quad (2.15)$$

où I est l'intensité lumineuse ambiante, Γ est un gain constant, et d est le degré de polarisation. On peut alors calculer le rapport logarithmique P_i entre les signaux des deux cellules photoréceptrices $UV_{0,i}$ et $UV_{1,i}$ pour chaque unité de polarisation i :

$$\forall i \in [1..3], \quad P_i = \log_{10} \left(\frac{UV_{0,i}(\psi)}{UV_{1,i}(\psi)} \right) \quad (2.16)$$

ce qui donne :

$$\forall i \in [1..3], \quad P_i = \log_{10} \left(\frac{1 + d \cdot \cos(2(\psi + \psi_i))}{1 - d \cdot \cos(2(\psi + \psi_i))} \right) \quad (2.17)$$

où $\psi_1 = 0^\circ$, $\psi_2 = 60^\circ$ et $\psi_3 = 120^\circ$ (Fig. 2.19B). Afin de simplifier le calcul de l'AdP ψ , on applique les transformations suivantes :

$$\forall i \in [1..3], \quad \bar{P}_i = (1 + 10^{P_i})^{-1} \quad (2.18)$$

puis :

$$\forall i \in [1..3], \quad \tilde{P}_i = 1 - 2\bar{P}_i \quad (2.19)$$

On obtient alors :

$$\forall i \in [1..3], \quad \tilde{P}_i = d \cdot \cos(2(\psi + \psi_i)) \quad (2.20)$$

Ainsi, l'AdP $\psi \in [0^\circ; 90^\circ[$ peut être calculé à partir des unités de polarisation 1 et 2 comme suit :

$$\psi = \begin{cases} \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2\tilde{P}_2 + \tilde{P}_1}{\sqrt{3}\tilde{P}_1}\right) & \text{si } \tilde{P}_1 \neq 0 \\ 45^\circ & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.21)$$

Malheureusement, le facteur d'échelle $\frac{1}{2}$ implique que l'AdP soit une fois de plus connu modulo 90° . Pour autant que l'on sache, il n'y a aucune explication sur la résolution de cette ambiguïté. Il paraît donc évident que les 8 photodiodes placées de part et d'autre du rover Sahabot 2 [140] ont été utilisées pour lever la double ambiguïté sur le cap : celle due au calcul de l'angle, et celle due à la symétrie du motif de polarisation le long du méridien solaire. En effet, l'arrangement symétrique des photodiodes permet de découper le panorama en 8 secteurs angulaires égaux, et donc de savoir précisément dans quel quadrant se trouve le soleil par rapport au robot, assurant ainsi de pouvoir lever l'indétermination sur le cap.

2.4.1.3 La méthode matricielle

La méthode Sahabot ne fait usage que de deux unités de polarisation (1 et 2). On propose alors de reprendre la méthode Sahabot en considérant toutes les combinaisons d'unités de polarisation pour estimer l'AdP ψ . L'équation 2.20 peut alors être réécrite sous forme matricielle comme suit :

$$\tilde{P} = \begin{pmatrix} \tilde{P}_1 \\ \tilde{P}_2 \\ \tilde{P}_3 \end{pmatrix} = d \cdot C \cdot D \quad (2.22)$$

avec :

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} \cos(2\psi) \\ \sin(2\psi) \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

L'existence de l'inverse généralisée de la matrice C étant assurée, le problème peut être inversé afin de déterminer l'AdP ψ modulo 90° :

$$\psi = \begin{cases} \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{\sqrt{3}(\widetilde{P}_2 - \widetilde{P}_3)}{2\widetilde{P}_1 - \widetilde{P}_2 - \widetilde{P}_3} \right) & \text{si } \widetilde{P}_1 \neq 0 \\ 45^\circ & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.24)$$

2.4.1.4 Vers une méthode exhaustive : la méthode matricielle généralisée

Il s'agit ici de ne plus considérer trois orientations fixes (0° , 60° , et 120°), mais de généraliser la méthode de Sahabot pour un compas céleste regroupant N unités de polarisation. La résolution angulaire $\Delta\psi$ (égale à 60° pour la méthode de Sahabot) est telle que $\forall i \in \llbracket 1..N \rrbracket$, $\Delta\psi = \psi_{i+1} - \psi_i = 360^\circ/N$ (Fig. 2.19C). On peut alors écrire que :

$$\forall i \in \llbracket 1..N \rrbracket, \widetilde{P}_i = d \cdot \mu_i \cdot \cos(2\psi) + d \cdot \nu_i \cdot \sin(2\psi) \quad (2.25)$$

où $\mu_i = \cos(2\psi_i)$ et $\nu_i = \sin(2\psi_i)$. On peut donc écrire le problème sous forme matricielle :

$$\widetilde{P} = \begin{pmatrix} \widetilde{P}_1 \\ \widetilde{P}_2 \\ \vdots \\ \widetilde{P}_N \end{pmatrix} = d \cdot C \cdot D \quad (2.26)$$

avec :

$$C = \begin{pmatrix} \mu_1 & \nu_1 \\ \mu_2 & \nu_2 \\ \vdots & \vdots \\ \mu_N & \nu_N \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} \cos(2\psi) \\ \sin(2\psi) \end{pmatrix} \quad (2.27)$$

Sous réserve que le rang de la matrice C soit égal à 2, l'existence de l'inverse généralisée de C est assurée et l'équation 2.26 donne alors :

$$D = (C^T \cdot C)^{-1} \cdot C^T \cdot \widetilde{P} \quad (2.28)$$

Finalement, on calcule l'AdP $\psi \in [0^\circ; 90^\circ[$:

$$\psi = \begin{cases} \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{D[2]}{D[1]} \right) & \text{si } D[1] \neq 0 \\ 45^\circ & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.29)$$

2.4.2 Performances en fonction de la couverture nuageuse

2.4.2.1 Protocole expérimental

On se propose dans cette section de comparer les performances des 5 algorithmes de calcul de l'AdP à l'aide de trois séries de données obtenues en conditions réelles : ciel dégagé, ciel variable et ciel couvert. Les données ont été acquises de février à juin 2017, aléatoirement dans la journée entre 9h00 et 17h00. Les acquisitions ont été effectuées devant les locaux de l'équipe Biorobotique à Marseille ($43^\circ 14' 1.16''$ Nord, $5^\circ 26' 39.2''$ Est). Le contexte expérimental est décrit dans la figure 2.20. Chaque acquisition s'organise comme suit : AntBot est placé

sur une table rotative; le compas céleste effectue une mesure complète du cap pour chaque orientation du robot; ce dernier est tourné par pas de 10° de 0° à 170° . D'après le service TEMIS⁴ (*Tropospheric Emission Monitoring Internet Service*, en association avec l'ESA), l'indice UV était compris entre 1 et 8.



FIGURE 2.20 – Contexte expérimental pour l'évaluation des performances du compas céleste, embarqué sur le robot AntBot. L'ordinateur est uniquement utilisé pour contrôler l'expérience (communication avec AntBot via un réseau privé WiFi). Le robot était monté sur un plateau tournant par pas de 10° .

Les données éphémérides⁵ relatives aux conditions de l'expérience (date, heure et lieu) ont été utilisées pour compenser l'effet de la variation de l'élévation solaire au cours des mesures, et donc corriger les angles de polarisation calculés. De plus, afin de pouvoir comparer les 5 algorithmes, les angles calculés avec les équations 2.12, 2.21, 2.24, et 2.29 ont été corrigés de sorte qu'ils soient compris dans l'intervalle $[0^\circ; 180^\circ[$ au lieu de $[0^\circ; 90^\circ[$.

2.4.2.2 Résultats et conclusion

Les résultats obtenus avec les 5 méthodes de calcul de l'AdP sont donnés en figure 2.21. Du fait de la grande variabilité des conditions d'acquisition (date, heure, et orientation initiale du robot), les données ont arbitrairement été organisées de façon à ce que la valeur moyenne de chaque série commence bien à 0° . Il en résulte que l'erreur de cap sera toujours nulle à 0° . Les résultats statistiques (médiane, moyenne, écart-type) sont présentés dans le tableau 2.2.

Lorsque le ciel est dégagé, toutes les méthodes testées montrent un cap cohérent avec la vérité terrain (Fig. 2.21A-Ei). L'erreur angulaire moyenne s'étend de 0.62° pour la méthode généralisée, à 3.09° pour celle de Sahabot (Tab. 2.2). La méthode d'AntBot (voir Section 2.3.3) donne une erreur moyenne de $0.69^\circ \pm 0.52^\circ$ (*moyenne \pm écart-type*) et une erreur médiane de seulement 0.39° . Exceptée celle de Sahabot, toutes les méthodes de détermination du cap donnent une erreur médiane inférieure à la résolution angulaire du capteur (0.96°). En outre, la variabilité des méthodes de Sahabot et matricielle reste importante et supérieure à la résolution du capteur. Les performances mitigées de la méthode de Lambrinos peuvent s'expliquer par l'utilisation de seulement deux mesures (à 0° et à 60°). Cette hypothèse semble

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

5. https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=fr

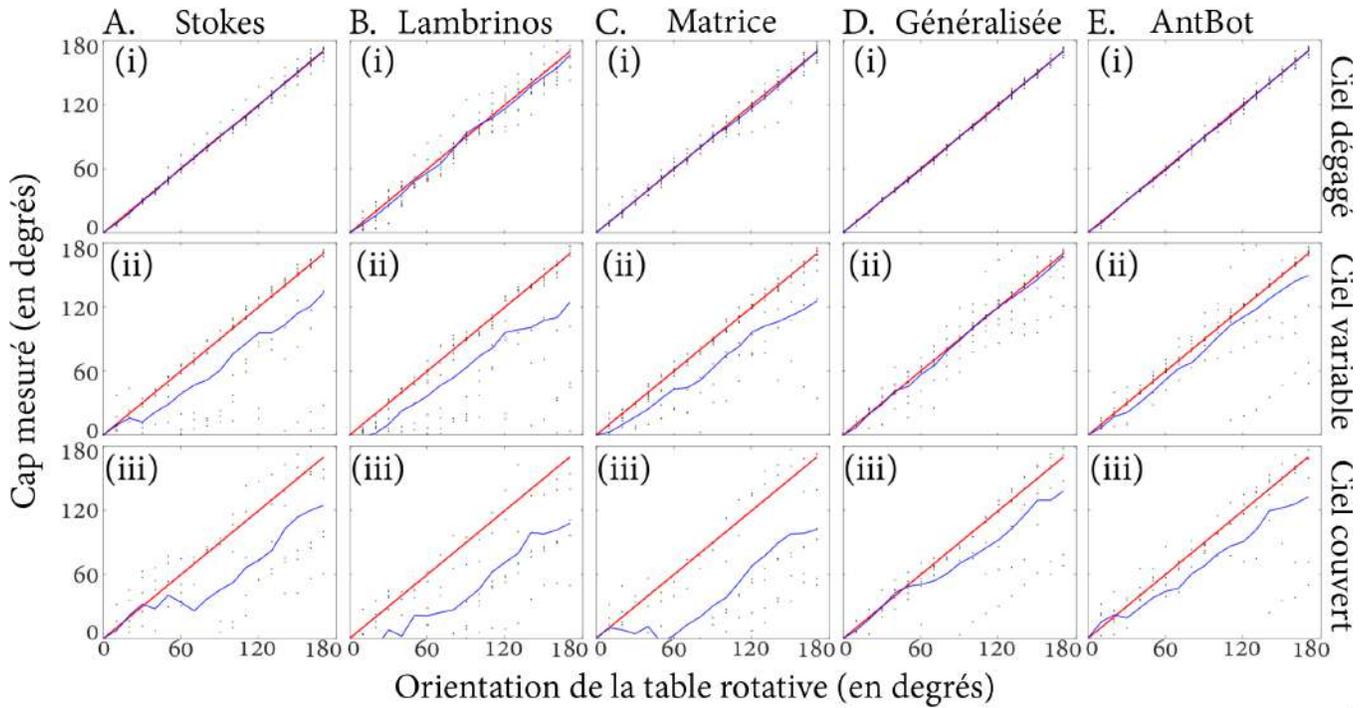


FIGURE 2.21 – Graphiques montrant l’ensemble des résultats obtenus avec chaque méthode de calcul de l’AdP (A–E) en fonction des trois conditions météorologiques (i–iii). Les points représentent l’ensemble des valeurs angulaires calculées; les lignes bleues correspondent à la moyenne du cap en fonction de l’orientation du robot; les lignes rouges montrent les courbes idéales.

	Ciel dégagé ($n=180$)			Ciel variable ($n=180$)			Ciel couvert ($n=108$)		
	Indice UV : 5.6 ± 1.3			Indice UV : 5.8 ± 1.2			Indice UV : 3.0 ± 0.0		
	Erreur de cap			Erreur de cap			Erreur de cap		
	Médiane	Moyenne	σ	Médiane	Moyenne	σ	Médiane	Moyenne	σ
Stokes	0.64°	0.72°	0.46°	0.98°	23.50°	11.96°	9.49°	29.47°	18.93°
Lambrinos	3.51°	3.09°	1.43°	7.18°	37.00°	18.34°	47.48°	41.01°	16.43°
Matrice	0.33°	1.08°	1.07°	3.52°	23.59°	12.01°	60.37°	43.81°	21.06°
Généralisée	0.24°	0.62°	0.40°	0.04°	2.22°	1.63°	2.85°	15.79°	11.60°
AntBot	0.39°	0.69°	0.52°	0.02°	9.55°	4.81°	0.59°	17.98°	9.81°

TABLEAU 2.2 – Performances des méthodes de calcul du cap testées dans trois conditions météorologiques différentes. Les indices UV sont sans dimension et exprimés sous la forme *moyenne ± écart-type*. n est le nombre de données, égal au nombre d’expériences multiplié par le nombre de données collectées durant chaque expérience (18). σ représente l’écart-type.

d’ailleurs se justifier par la méthode matricielle qui utilise trois mesures différentes (0° , 60° et 120°), et dont l’erreur moyenne est divisée par 3.

Sous un ciel variable, les méthodes de Stokes, de Sahabot, et matricielle donnent un angle de cap dégradé (Fig. 2.21A-Cii) : l’erreur moyenne oscille alors entre 23.50° et 37.00° , avec un écart-type toujours supérieur à 10° (Tab. 2.2). En revanche, la méthode généralisée et celle d’AntBot maintiennent de bons résultats avec une erreur médiane négligeable devant la résolution angulaire du capteur. Une plus forte variabilité est cependant notée pour la méthode d’AntBot puisque son écart-type atteint 4.81° . Enfin, lorsque le ciel est totalement couvert, les

performances continuent de se dégrader pour les trois premières méthodes avec une erreur moyenne systématiquement supérieure à 29° et une forte variabilité ($> 16^\circ$). L'erreur médiane de la méthode d'AntBot reste stable (0.59°) tandis que celle de la méthode généralisée se dégrade (2.85°). Toutefois, ces deux méthodes ont une erreur moyenne semblable située autour de 16° . La variabilité de la méthode généralisée est dégradée d'un facteur 7 par rapport aux conditions de ciel variable, alors que la méthode d'AntBot n'est dégradée que d'un facteur 2.

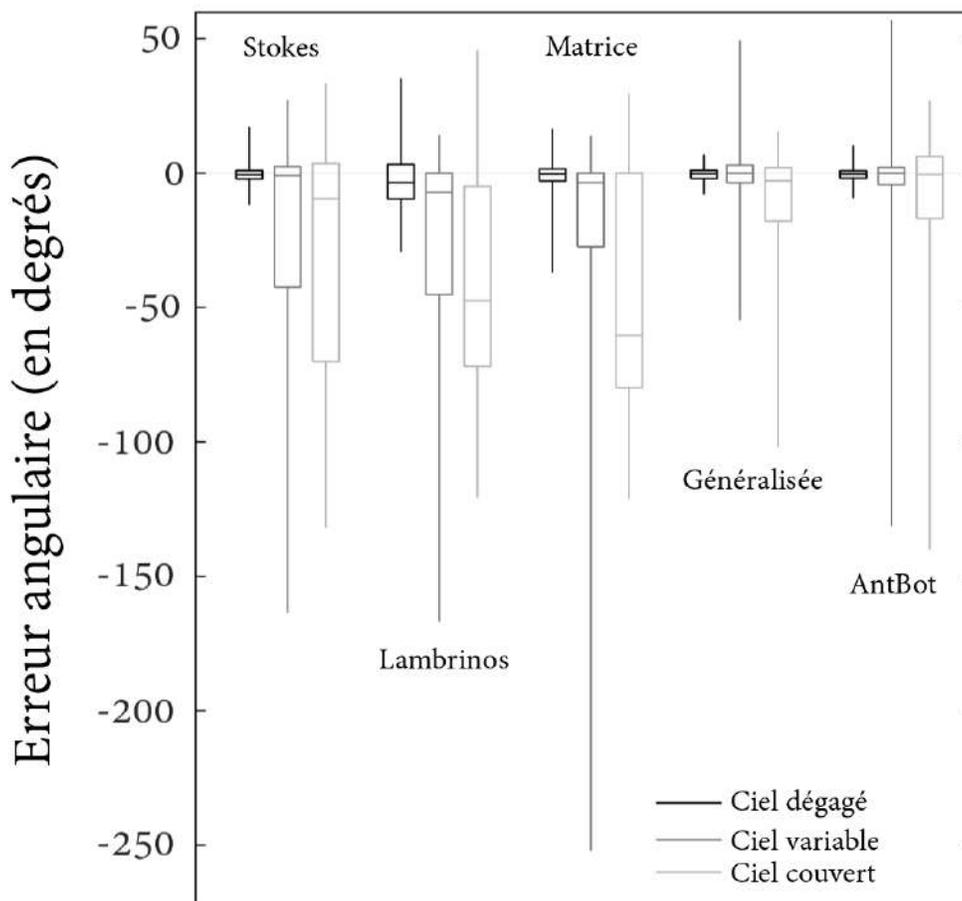


FIGURE 2.22 – Diagramme en boîtes de l'erreur angulaire (en degrés) en fonction des conditions météorologiques et pour chaque méthode de calcul du cap.

Le diagramme en boîtes des erreurs de cap sont déterminés à l'aide de la fonction *boxplot* sur Matlab et présentés en figure 2.22. Ce graphe montre clairement que les méthodes généralisée et d'AntBot offrent des performances bien plus satisfaisantes que les trois autres méthodes, quel que soit le contexte météorologique.

Aucune des séries de résultats obtenues dans cette étude n'obéit à une loi normale (test de normalité de Shapiro-Wilk, $p < 0.05$). En cas de ciel dégagé, la méthode de Sahabot (Lambrinos et al. [139, 140]), mais aussi la méthode matricielle dans une moindre mesure, diffère significativement des autres méthodes de calcul du cap (test des rangs signés de Wilcoxon, $p < 0.0125$, Figs. 2.22 et 2.23A). En revanche, quelle que soit la condition météorologique, les méthodes généralisée et d'AntBot ne diffèrent pas significativement l'une de l'autre (test des rangs de Wilcoxon, $p > 0.05/4 = 0.0125$ en utilisant la correction de Bonferroni, Figs. 2.21D-E, 2.22, et 2.23).

	Stokes	Lambrinos	Matrice	Généralisée	AntBot
A Stokes	1.00				
Lambrinos	$3.57 \cdot 10^{-4}$	1.00			
Matrice	0.689	0.002	1.00		
Généralisée	0.905	0.001	0.830	1.00	
AntBot	0.896	0.001	0.867	0.978	1.00
B Stokes	1.00				
Lambrinos	0.040	1.00			
Matrice	0.150	0.240	1.00		
Généralisée	$1.60 \cdot 10^{-4}$	$3.66 \cdot 10^{-10}$	$4.78 \cdot 10^{-9}$	1.00	
AntBot	0.010	$3.01 \cdot 10^{-7}$	$1.76 \cdot 10^{-6}$	0.410	1.00
C Stokes	1.00				
Lambrinos	0.025	1.00			
Matrice	0.025	0.600	1.00		
Généralisée	0.144	$1.01 \cdot 10^{-6}$	$5.18 \cdot 10^{-5}$	1.00	
AntBot	0.057	$5.58 \cdot 10^{-7}$	$5.24 \cdot 10^{-5}$	0.217	1.00

FIGURE 2.23 – Diagramme des probabilités pour le test statistique des rangs signés de Wilcoxon (fonction Matlab : *ranksum*). Le paramètre α_C du test a été fixé à $0.05/4$ (application de la correction de Bonferroni). Si l’hypothèse nulle est rejetée, c’est-à-dire si les jeux de données sont statistiquement différents, alors la case est noire (probabilité inférieure à α_C). Ciel **A** dégagé ; **B** variable ; **C** couvert.

Statistiquement non différentes en termes de performances, les méthodes généralisée (section 2.4.1.4) et d’AntBot (section 2.3.3) ont montré, au travers des résultats précédemment énumérés, un fort potentiel d’utilisation en navigation extérieure autonome. Cependant, la méthode d’AntBot pour la détermination du cap reste à privilégier pour trois raisons :

- son erreur médiane de cap reste nettement inférieure à la résolution angulaire du compas céleste ;
- elle est la seule à donner un angle compris dans l’intervalle $[0^\circ; 180^\circ[$;
- elle est moins coûteuse en calculs que la méthode généralisée.

2.4.3 Expériences simples de suivi de cap avec Hexabot

Lors de l’utilisation d’Hexabot, il a rapidement été constaté que le cap du robot tendait à dériver considérablement en fonction de sa vitesse et de la nature du sol. Nous avons mesuré cette dérive dans le cas où le robot marchait en mode tripode sur un sol plat mais rugueux. En moyenne, le cap du robot dérivait de 28° après seulement 1 m de trajectoire (5 acquisitions, données obtenues avec un magnétomètre calibré). Une première application réelle du compas céleste serait donc de corriger la dérive du robot d’une part, et de suivre un cap donné d’autre part. Les expériences d’asservissement du cap du robot relatées ci-après ont toutes été conduites devant les locaux de l’équipe Biorobotique entre le 2 et le 20 février 2017 en conditions extérieures, et à toute heure du jour entre 9h00 et 17h00. La résolution angulaire du compas était alors de 1.29° pour une durée d’acquisition de 42 s . La réalité terrain était assurée par l’utilisation d’un magnétomètre (LMS303D, MinIMU 9.0 v3, *Pololu*), ainsi que de prises de vue de la scène à l’aide d’un appareil photo.

2.4.3.1 Réorientation après une perturbation angulaire en lacet

Nous avons dans un premier temps étudié la capacité du robot Hexabot à se réorienter après une perturbation en lacet. Le robot était alors placé sur le sol selon une orientation aléatoire dont il déterminait la valeur grâce au compas. Ensuite, on faisait tourner le robot sur lui-même (lacet) d'un angle compris entre -70° et $+70^\circ$, en s'assurant que l'ambiguïté solaire ne puisse pas fausser les résultats. Enfin, après avoir déterminé son cap perturbé, Hexabot effectuait une rotation pour revenir à son cap initial. Il s'agissait d'un asservissement en boucle ouverte de façon à éviter tout risque d'oscillation du fait des contraintes mécaniques du robot, lesquelles engendraient une résolution angulaire minimale d'environ 8° par foulée en rotation.

Un exemple de réorientation par temps clair est présenté en figure 2.24. En particulier, le cap du robot avant perturbation était de 51.6° (fonction P en rouge, Fig. 2.24E). On observe alors qu'après réorientation, le cap du robot est parfaitement identique au cap initial (Fig. 2.24A,E).

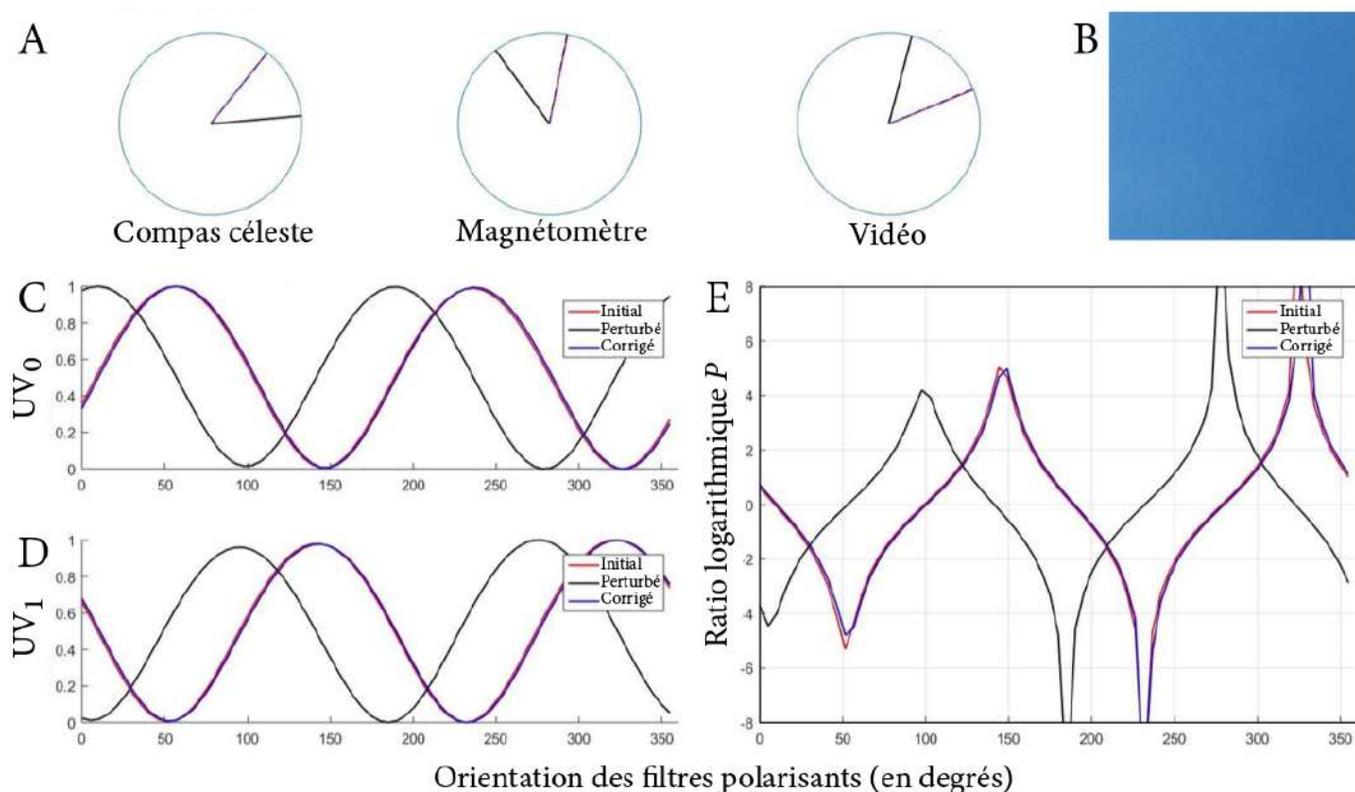


FIGURE 2.24 – Exemple de réorientation du robot après une perturbation en lacet. **A** Cap du robot durant les trois stades de l'expérience – initialisation (rouge), perturbation (noir), et correction (bleu) – mesuré par, de gauche à droite, le compas céleste, un magnétomètre, et une vidéo. **B** Photographie du ciel vu par le capteur. **C** Signaux corrigés et normalisés pour l'unité de polarisation UV_0 . **D** Signaux corrigés et normalisés pour l'unité de polarisation UV_1 . **E** Logarithme du ratio des deux unités de polarisation (fonction P , voir l'équation 2.4).

Lorsque le ciel était dégagé, l'erreur médiane de réorientation du robot était de 0.4° ($n = 15$), avec une erreur maximale de -8.4° observée dans le cas d'une perturbation égale à 60° (Fig. 2.25). Cette erreur médiane se détériore en conditions météorologiques dégradées, at-

teignant -2.9° ($n = 11$) lorsque le ciel est variable, avec un pic d'erreur égal à -13.8° . Enfin, sous un ciel entièrement couvert, l'erreur médiane atteint -1.9° ($n = 7$) avec des erreurs maximales semblables à celles obtenues sous un ciel variable. Pour chaque condition météorologique, on note que les distributions des erreurs suivent une loi normale (test de normalité de Shapiro-Wilk, $p > 0.05$).

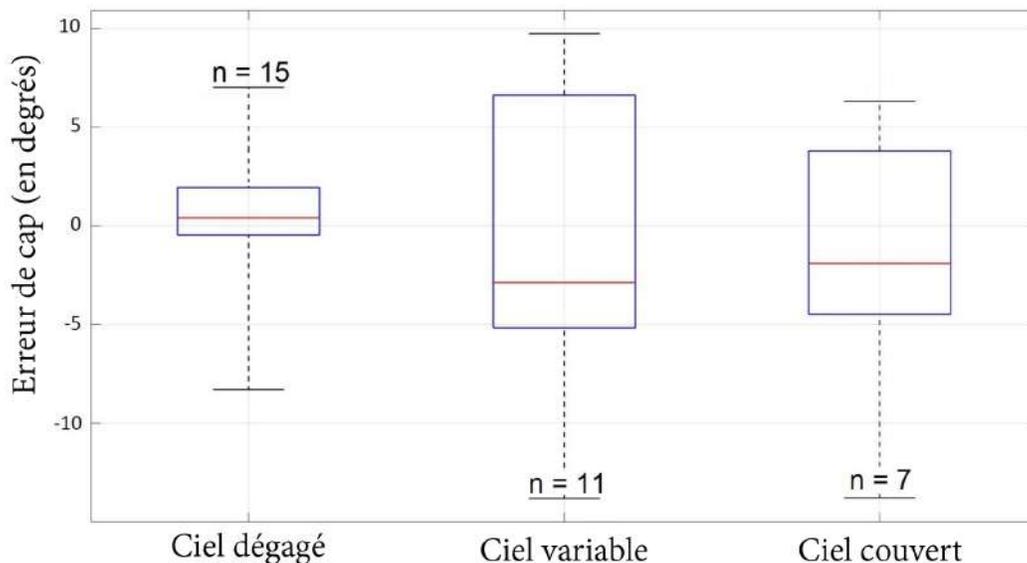


FIGURE 2.25 – Erreur de réorientation après perturbation du cap du robot. L'indice UV était compris entre 1 et 2 selon Météo France.

L'aggravation de l'erreur de réorientation en cas de ciel variable s'explique du fait de la durée de l'acquisition (42 s) et de celle de l'expérience (environ 3 minutes) : la luminosité ambiante, mais aussi le degré de polarisation et la hauteur de couche nuageuse rencontrée sont des paramètres pouvant altérer l'AdP, et de ce fait le cap du robot. La variabilité des erreurs de réorientation du robot sous les trois conditions météorologiques peut s'expliquer, entre autres, par l'irrégularité des foulées de rotation du robot résultante des interactions entre les extrémités des pattes et le sol. Ainsi, et au regard des performances du compas céleste (voir Tab. 2.2), ces premiers résultats sont encourageant quant à une utilisation du compas à des fins de navigation sur un robot à pattes tel qu'Hexabot.

En considérant les résultats obtenus avec le robot Sahabot 1 [139], le compas céleste permet d'obtenir des résultats sensiblement meilleurs en cas de ciel dégagé, et prometteurs lorsque les conditions environnementales sont dégradées (perturbations nuageuses, indice UV et degré de polarisation réduits).

2.4.3.2 Maintien de cap sur une trajectoire rectiligne

L'objectif ici était de permettre au robot Hexabot de suivre un cap lors d'une expérience de marche sur un sol rugueux (Fig. 2.26A). Cette trajectoire était divisée en 12 étapes identiques. Une étape consistait à faire marcher le robot (5 à 6 foulées), puis l'arrêter afin qu'il acquière son cap et corrige sa dérive par une rotation. L'expérience a été conduite à 14h00, c'est-à-dire pendant le midi solaire (degré de polarisation minimal), par temps clair (indice UV : 2).

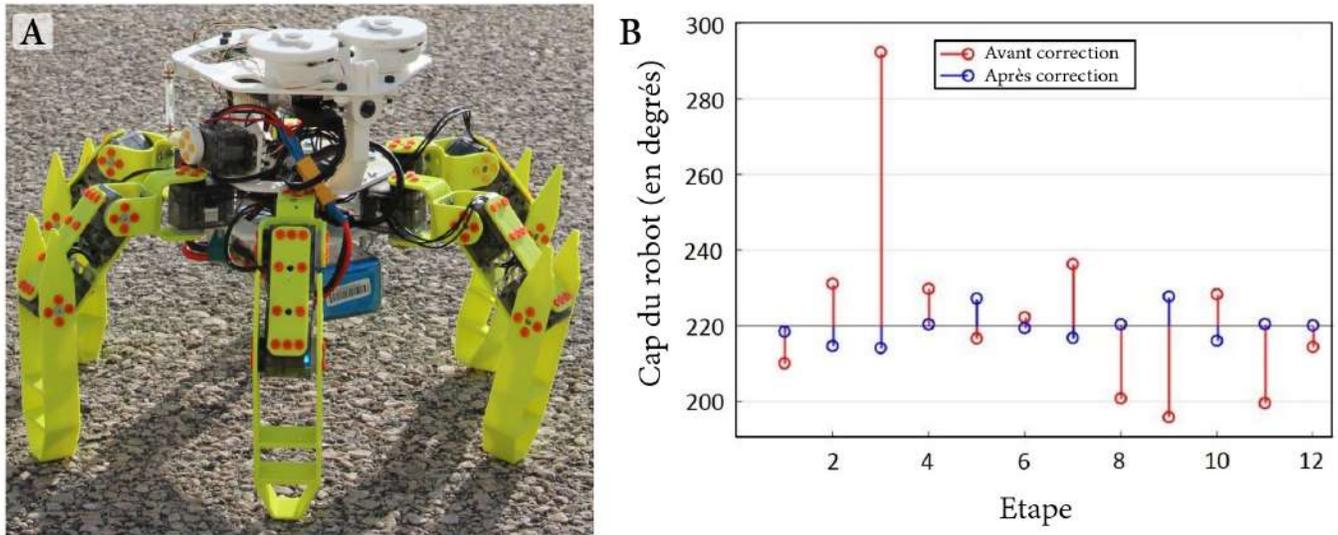


FIGURE 2.26 – Expérience de maintien du cap avec Hexabot. **A** Le robot Hexabot équipé du compas céleste. On peut notamment voir la texture du sol sur lequel les tâches de navigation ont été réalisées. **B** Evolution du cap du robot avant (en rouge) et après (en bleu) correction du cap.

Les résultats de l'expérience présentés en figure 2.26 montrent que l'erreur de cap moyenne était de -0.3° , ce qui est cohérent avec les précédents résultats (voir Fig. 2.25). L'erreur maximale observée a atteint 7.7° (étape n°9). Etant donné le contexte météorologique, on peut considérer que la référence solaire est restée stable au cours de l'expérience et n'a donc pas eu d'incidence sur les résultats obtenus. Les erreurs de cap sont donc essentiellement dues aux interactions entre les pattes et le sol d'une part, et à la résolution angulaire des foulées du robot, mesurée à $10.9^\circ/pas$, d'autre part.

2.4.4 Comparaison avec un magnétomètre en zone urbaine

Afin de montrer l'intérêt d'utiliser le compas céleste dans un environnement urbain, nous avons placé le robot Hexabot sur une table tournante dans un environnement propice aux perturbations magnétiques (forte présence de matériaux ferromagnétiques dans les édifices voisins). En effectuant des rotations régulières par pas de 10° dans l'intervalle $[0^\circ; 360^\circ]$, nous souhaitons comparer le cap fourni par le compas céleste avec celui donné par un magnétomètre (LMS303D) préalablement calibré pour fonctionner sans être perturbé par l'électro-robotique du robot. Les données ont été acquises le 6 avril 2017 par temps clair (indice UV : 6) et sont présentées en figure 2.27. L'erreur quadratique moyenne était de seulement 0.25° pour le compas céleste, contre 104.14° pour le magnétomètre.

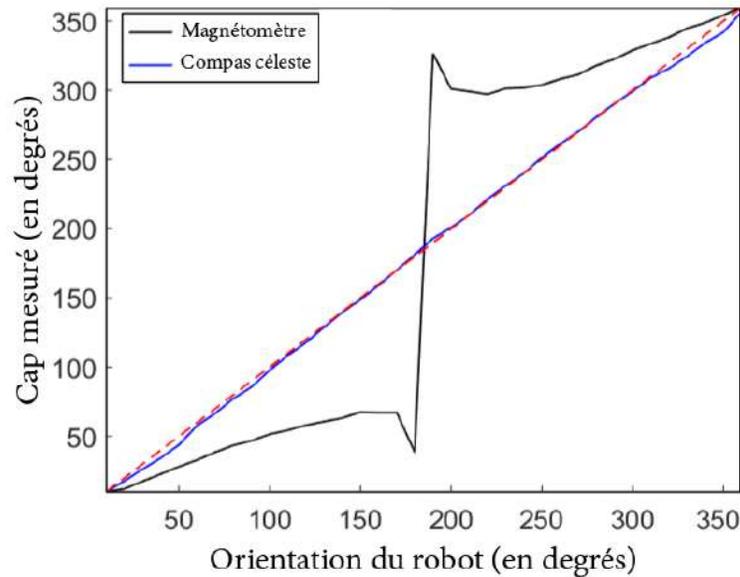


FIGURE 2.27 – Comparaison entre le compas céleste (bleu) et le magnétomètre calibré LMS303D (noir) lors d’une rotation complète du robot Hexabot. La vérité terrain est représentée en pointillés rouges.

2.4.5 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 de longueur 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. Lambrinos et al. [139, 140] 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 et AntBot) pour mesurer le niveau d’UV diffusés par l’atmosphère à gauche et à droite du robot (Fig. 1.18).

Lors de l’initialisation du robot, celui-ci est orienté de manière à être aligné avec le soleil. On mesure alors l’orientation Ψ_{init} du robot, laquelle permet de marquer la séparation entre la gauche et la droite du robot (Fig. 2.28). 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)⁶.

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

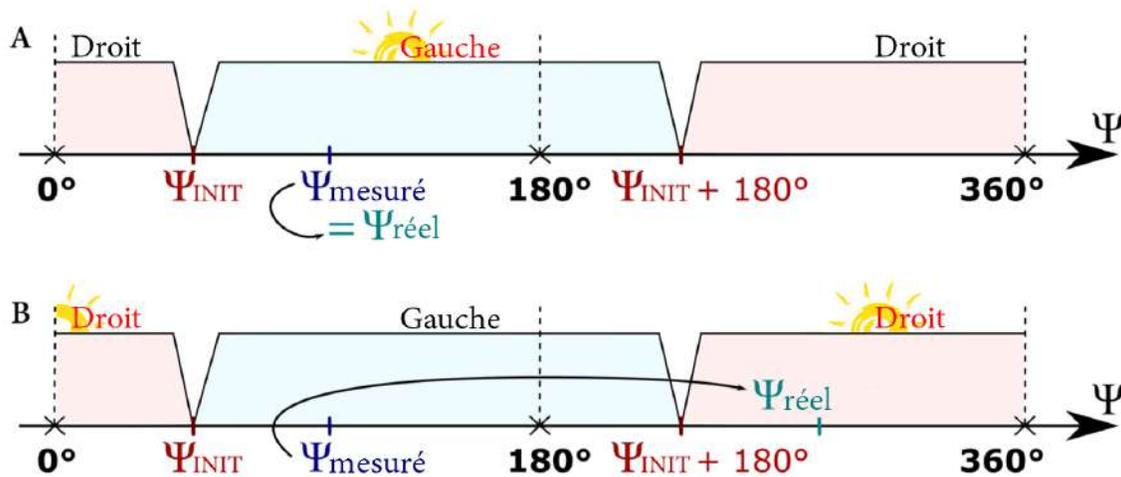


FIGURE 2.28 – Principe de la résolution de l’ambiguïté solaire sur la mesure du cap à partir de la position du soleil dans la voûte céleste. **A** L’angle Ψ se trouve dans le même secteur angulaire que le soleil. L’angle réel est donc égal à l’angle mesuré. **B** Ici, l’angle mesuré ne coïncide pas avec la position du soleil. L’angle réel est donc égal à l’angle mesuré auquel on ajoute 180° .

2.5 Extension des applications de la boussole céleste

Les contextes expérimentaux précédemment mentionnés étaient favorables à une utilisation optimale de la boussole céleste : aucune contrainte temporelle vis-à-vis du temps d’acquisition et de traitement de l’information ; un champ de vision parfaitement dégagé ; des conditions météorologiques restreintes à un temps exclusivement sec. Les résultats préliminaires avancés dans ce qui suit visent à montrer les applications potentielles de ce capteur dans des conditions plus variées telles que sous des canopées arborées et sous l’eau. La contrainte temporelle est également questionnée au travers de la résolution angulaire minimale satisfaisante assurant une bonne estimation du cap.

2.5.1 Réduction de la résolution angulaire

Dans sa configuration la plus récente, c’est-à-dire lors de son utilisation pour les expériences de navigation avec le robot AntBot, le capteur est en mesure de produire une acquisition complète du motif de lumière polarisée en 13 secondes pour une résolution angulaire effective de $360^\circ/374 = 0.96^\circ$. Nous avons pu voir dans le cadre des premiers tests menés sur Hexabot (temps d’acquisition : 42 s ; résolution angulaire : 1.29°) que le mouvement du soleil dans le ciel influe sur l’amplitude crête-crête du signal enregistré. Cette variation en amplitude peut avoir un effet négatif sur la détection de l’AdP. Preuve en est l’amélioration de l’erreur angulaire médiane entre Hexabot et AntBot (division par 3 du temps d’acquisition).

Il apparaît donc primordial de parvenir à diminuer le temps d’acquisition tout en maintenant les performances. Une première piste serait d’augmenter la bande passante des photodiodes en augmentant la fréquence de coupure des filtres passe-bas, afin de procéder à une démodulation sinusoïdale. Une autre solution consisterait à réduire le nombre de points de mesure, i.e. la résolution angulaire. Nous avons paramétré le capteur pour réaliser une acquisition en seulement 4 secondes pour une résolution angulaire de $360^\circ/224 = 1.61^\circ$. Le cap du robot a alors été déterminé pour des orientations régulièrement décalées de 10° entre 0°

et 170° . Pour chaque configuration, 10 acquisitions ont été effectuées. La durée totale de l'expérience est de 20 min. Le temps était dégagé, avec un indice UV égal à 7 (septembre 2018). Les courbes donnant le ratio logarithmique après filtrage et normalisation des signaux UV_0 et UV_1 ainsi que le cap déterminé par la méthode d'AntBot sont présentés en figure 2.29. On peut y observer notamment la capacité du compas à déterminer relativement correctement le cap du robot.

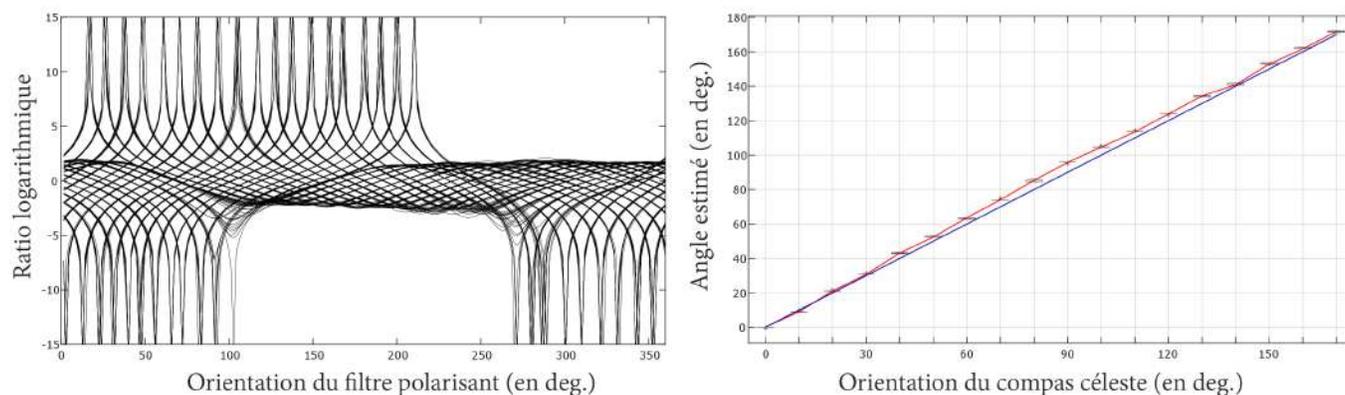


FIGURE 2.29 – Détermination du cap à basse résolution. **Gauche** Fonctions logarithmiques calculées pour l'estimation du cap pour chaque orientation du robot ($N = 18$) et pour chaque acquisition ($n = 10$). **Droite** Cap estimé correspondant en fonction de l'orientation du robot (i.e. du compas céleste). La courbe bleue donne la vérité terrain, tandis que la courbe rouge donne les médianes. Les diagrammes en boîtes sont donnés pour chaque configuration du robot.

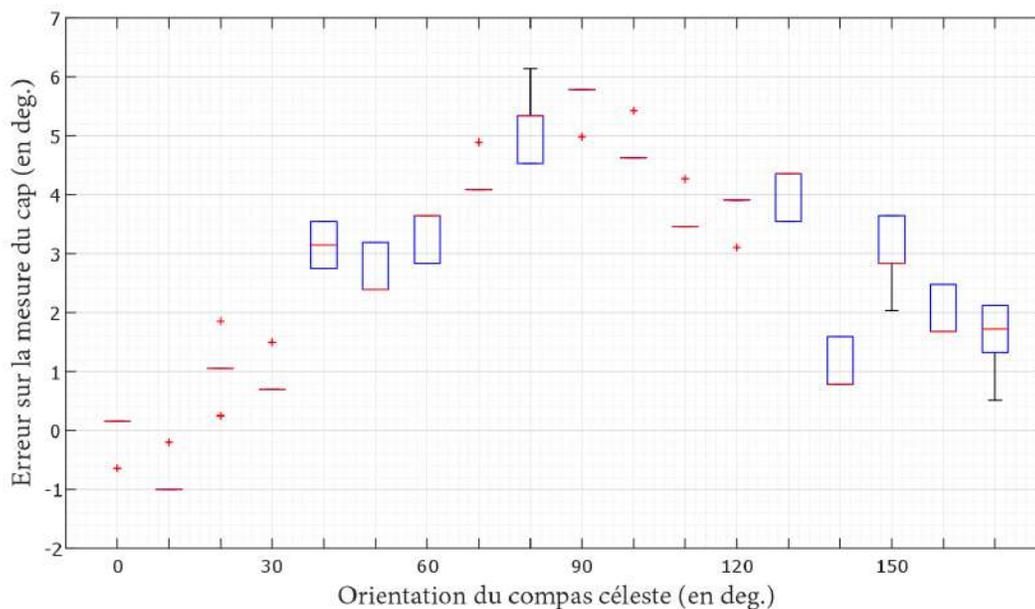


FIGURE 2.30 – Erreurs de cap en fonction de l'orientation du robot (i.e. du compas céleste).

Toutefois, l'erreur angulaire semble plus importante comme le montrent les diagrammes donnés en figure 2.30, corroborés par les données numériques fournies dans le tableau 2.3 donnant le cap médian et l'erreur au sens des moindres carrés (RMSE) correspondante pour chaque orientation du robot. Le profil des erreurs présente une certaine symétrie et donne à

penser qu’une correction par ajustement polynômial pourrait augmenter la fiabilité de l’estimation, comme l’ont fait Chu et al. dans [31] avec leur version intégrée du compas céleste à 3 unités de polarisation.

Cap imposé	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
Cap médian	0.16°	9.00°	21.05°	30.70°	43.15°	52.39°	63.64°	74.09°	85.34°
RMSE	0.32°	0.90°	1.07°	0.92°	3.18°	2.66°	3.34°	4.26°	5.29°
Cap imposé	90°	100°	110°	120°	130°	140°	150°	160°	170°
Cap médian	95.79°	104.63°	113.46°	123.91°	134.36°	140.79°	152.84°	161.68°	171.72°
RMSE	5.63°	4.80°	3.64°	3.76°	4.05°	1.09°	3.04°	2.04°	1.73°

TABLEAU 2.3 – Performances du compas céleste à basse résolution angulaire.

2.5.2 Détection de la polarisation sous les arbres

Dans la recherche de la pleine autonomie de l’intégrateur de chemin développé et testé avec AntBot, l’utilisation du compas céleste sous les canopées reste une étape importante et nécessite que l’on s’y intéresse. Nous avons donc testé la capacité de cette boussole à détecter l’AdP sous deux canopées formées d’arbres typiques du pourtour méditerranéen et que l’on retrouve particulièrement en Provence : l’arbre de Judée (*Cercis siliquastrum*), et le chêne pubescent (*Quercus pubescens*). Le robot équipé de la boussole céleste a donc été positionné sous ces deux types de canopée de façon à regarder vers le ciel. Les orientations du robot ont été déterminées pour trois orientations régulièrement espacées de 60° les unes des autres. Les acquisitions ont été faites durant l’été 2018 à Marseille (Parc National des Calanques); le temps était généralement dégagé avec un vent modéré de $5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ à $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ pour un indice UV compris entre 7 et 10.

La figure 2.31 représente les angles de cap déterminés sous les canopées pour les trois orientations suivantes : 0°, 60° et 120°. Les résultats statistiques sont présentés dans le tableau 2.4. On note que le compas céleste permet de déterminer correctement l’angle de cap avec une erreur globale de $0.08^\circ \pm 0.54^\circ$ sous les chênes pubescents ($n = 55$), et de $-0.02^\circ \pm 0.47^\circ$ sous les arbres de Judée ($n = 57$). D’autre part, les distributions des erreurs angulaires suivent une loi normale (test de Lilliefors; $P > 0.05$). Ces résultats préliminaires sont cohérents avec les performances du capteur sous un ciel ouvert. On observe tout de même une légère amélioration de la précision des l’estimation du cap sous les arbres, mais cette tendance pourrait être imputable à un indice UV inférieur à 6 lors des expériences à ciel ouvert, et supérieur à 8 sous les arbres. Dans l’ensemble, la présence du feuillage au-dessus du capteur ne semble pas perturber la mesure du cap en bande UV, et confirme donc les applications en navigation autonome. Cette dernière remarque tend à confirmer l’hypothèse formulée par Barta et Horvath [250] et selon laquelle l’information de polarisation serait moins affectée par la traversée des nuages et des canopées dans l’UV, expliquant ainsi la prédominance de la préférence UV chez les insectes navigateurs exploitant la polarisation de la lumière du ciel.

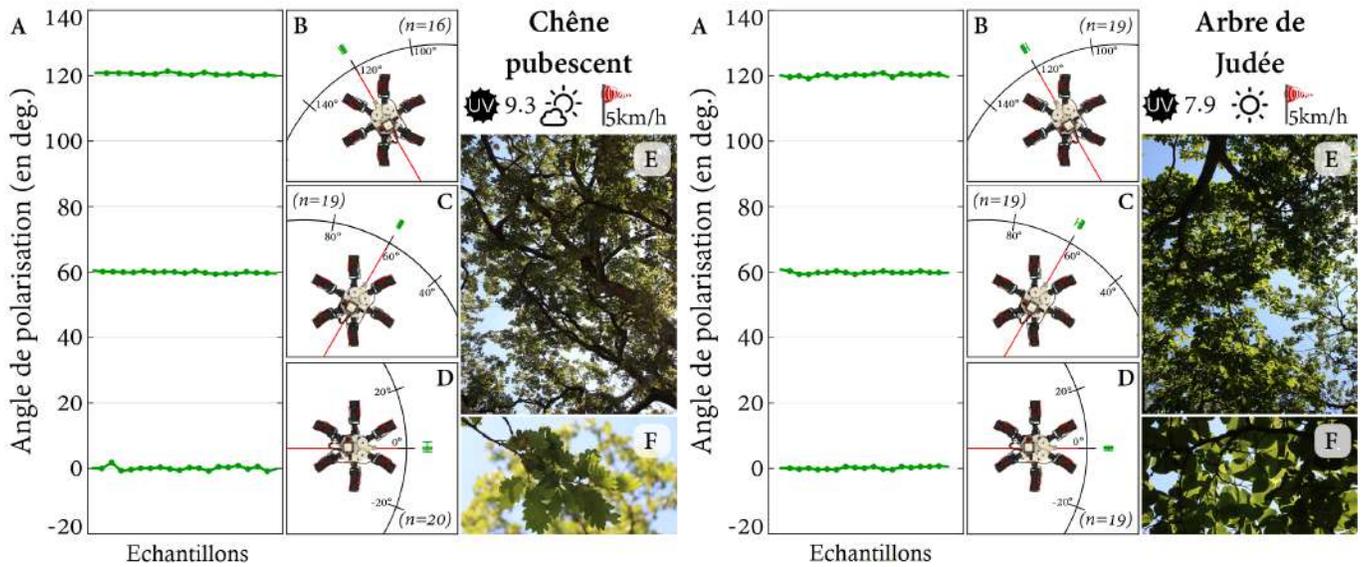


FIGURE 2.31 – Estimation de l’angle de polarisation (AdP) sous des canopées typiques de la méditerranéenne : chênes pubescents (gauche) et arbres de Judée (droite). **A** Angles de polarisation. **B-D** Représentation polaire des diagrammes en boîtes des angles déterminés. **E** Vue du ciel obstruée par la canopée. **F** Vue agrandie des feuilles. Les conditions météorologiques (indice UV, nature du ciel et vent) sont précisées pour chaque contexte expérimental.

	Chêne pubescent				Arbre de Judée			
	Médiane	Moyenne	Ecart-type	<i>n</i>	Médiane	Moyenne	Ecart-type	<i>n</i>
0°	0.04°	0.00°	0.64°	20	0.00°	0.00°	0.35°	19
60°	59.88°	59.84°	0.32°	19	59.74°	59.84°	0.55°	19
120°	120.50°	120.48°	0.40°	16	120.14°	120.11°	0.47°	19
Erreur globale	0.06°	0.08°	0.54°	55	0.00°	-0.02°	0.47°	57

TABLEAU 2.4 – Estimation de l’angle de polarisation (AdP) sous les canopées.

2.5.3 Exploitation sous-marine du compas céleste

Cette section s’intéresse aux potentielles applications de la boussole céleste en milieu aquatique. Deux situations sont ici considérées : présence de gouttelettes d’eau sur le capteur (simulant la situation pendant ou après une averse par exemple), et mesure sous-marine.

En 1954, Talbot Waterman a démontré que la lumière polarisée provenant du ciel était accessible sous l’eau jusqu’à 200 *m* de profondeur [235]. L’exploitabilité de ces informations à des fins de navigation a longtemps fait débat [203, 236]. En effet, une idée fautive mais pourtant très répandue affirme que la majeure partie de la lumière polarisée l’est de manière horizontale, et ne peut donc pas servir dans la détermination du cap. Talbot Waterman a démontré que le motif de polarisation observé sous l’eau est similaire à celui observé à l’air libre dans le domaine spectral des basses longueurs d’onde (Fig. 2.32A) [236]. On sait aujourd’hui qu’un certain nombre d’espèces marines utilisent la lumière polarisée pour s’orienter [145, 153, 225]. Dans le cadre de cette thèse, nous avons donc développé une version étanche de la boussole céleste (Fig. 2.32B). Ce capteur mono-pixel est directement adapté de la boussole céleste introduite dans le chapitre 2. La photodiode et son filtre polarisant ont été encapsulés dans un étui en plastique et recouvert de résine époxy pour étanchéifier l’ensemble. Le

capteur est monté sur un moteur pas-à-pas (de ceux que l'on trouve dans les imprimantes standards). La résolution est de $360^\circ/400 = 0.9^\circ$. Le calcul de l'AdP se fait à l'aide de la méthode *AntBot*.

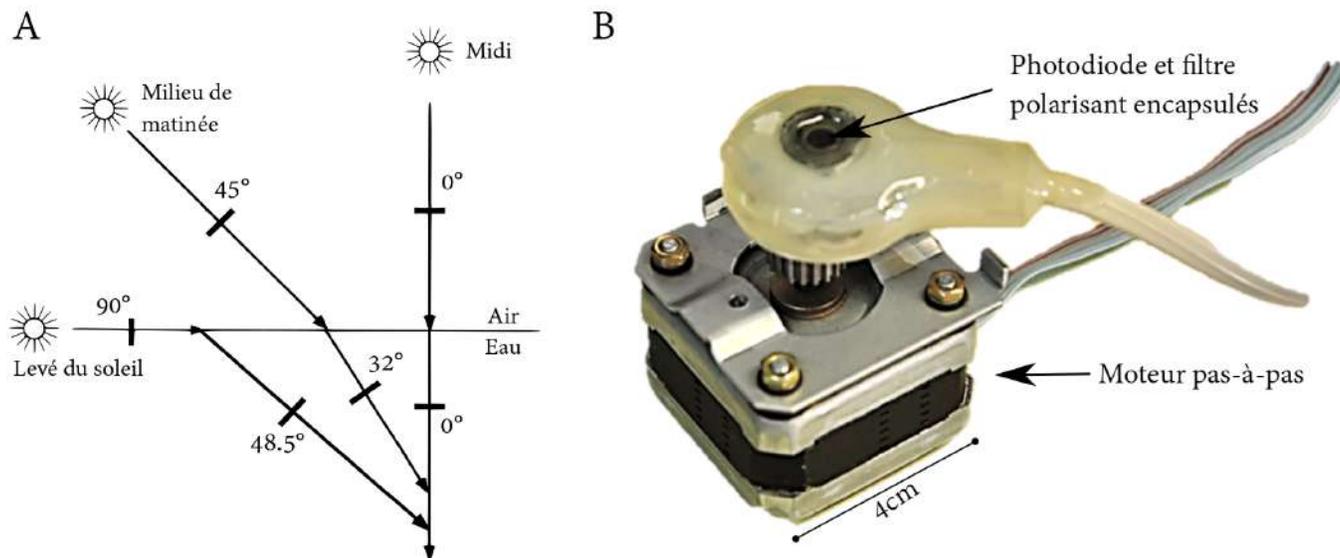


FIGURE 2.32 – **A** Diagramme simplifié illustrant l'effet de l'interface air/eau sur la propagation des rayons lumineux polarisés en fonction de l'élévation solaire. Traduit de [236]. **B** Boussole céleste mono-pixel en bande UV pour les applications sous-marines.

Simulation de la pluie

Cette première série d'expériences vise à déterminer (i) si la présence d'une gouttelette d'eau sur le capteur perturbe la mesure du cap par rapport à une mesure à sec ; (ii) vérifier la cohérence de la mesure du cap avec la gouttelette d'eau, en mesurant notamment le cap à 0° et à 90° . Les données ont été collectées en septembre 2019 par temps clair avec un indice UV s'élevant à 6.0 en moyenne.

Avec et sans gouttelette d'eau. Une première série d'acquisitions a été effectuée en l'absence de gouttelette et selon une orientation fixée arbitrairement ($n = 18$). Nous avons ensuite déposé une grosse gouttelette d'eau à l'aide d'une pipette et avons procédé à une nouvelle série d'acquisitions sans modifier l'orientation du capteur ($n = 12$). La procédure a duré environ 15 min, ce qui correspond à une variation de l'élévation solaire de 2.34° entre 15h30 et 15h45 le jour de l'expérience. Cette variation n'a pas été utilisée pour compenser les acquisitions, mais doit être connue pour mieux apprécier les résultats. Les signaux filtrés et normalisés obtenus en sortie de la boussole céleste sont affichés en figure 2.33A,C. Les courbes des fonctions P correspondantes, donnant le calcul du ratio logarithmique, sont données en figure 2.33B,D. En outre, la condition témoin (sans gouttelette) a donné un AdP égal à $142.2^\circ \pm 2.33^\circ$ (moyenne \pm écart-type). Après ajout de la goutte d'eau, le cap mesuré est de $143.9^\circ \pm 2.09^\circ$. La distribution des angles de cap pour chaque condition est donnée en figure 2.34. Les médianes sont alors respectivement de 144.0° et 144.5° . Enfin, l'erreur au sens des moindres carrés ϵ_{eau} a été calculée en prenant pour condition de référence le cas sans gouttelette (Eq. 2.30). Il en résulte une erreur $\epsilon_{eau} = 2.62^\circ$.

$$\epsilon_{eau} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (\bar{\psi}_{tmoïn} - \psi_{eau}[i])^2} \quad (2.30)$$

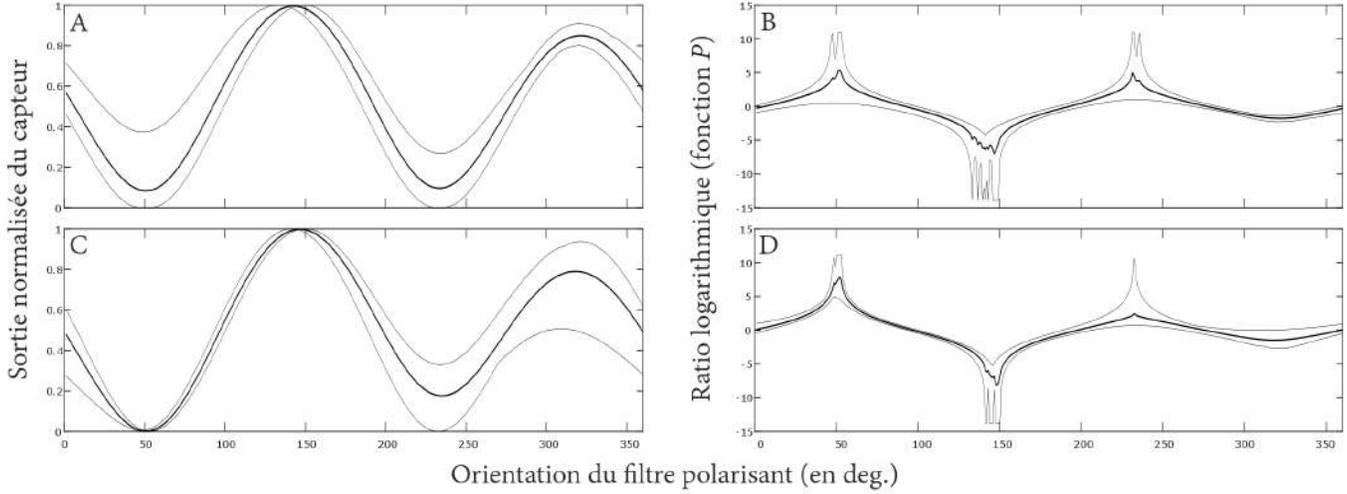


FIGURE 2.33 – Courbes issues du capteur de polarisation en cas de pluie. **A** Signaux acquis filtrés et normalisés en condition normale. **B** Fonctions P correspondantes (ratio logarithmique). **C** Signaux acquis filtrés et normalisés en présence d’une gouttelette d’eau. **D** Ratios logarithmiques correspondants. Pour tous les graphes, les courbes en gras décrivent les moyennes; les traits fins donnent les courbes maximales et minimales. L’ensemble est déterminé en fonction de l’orientation du filtre polarisant.

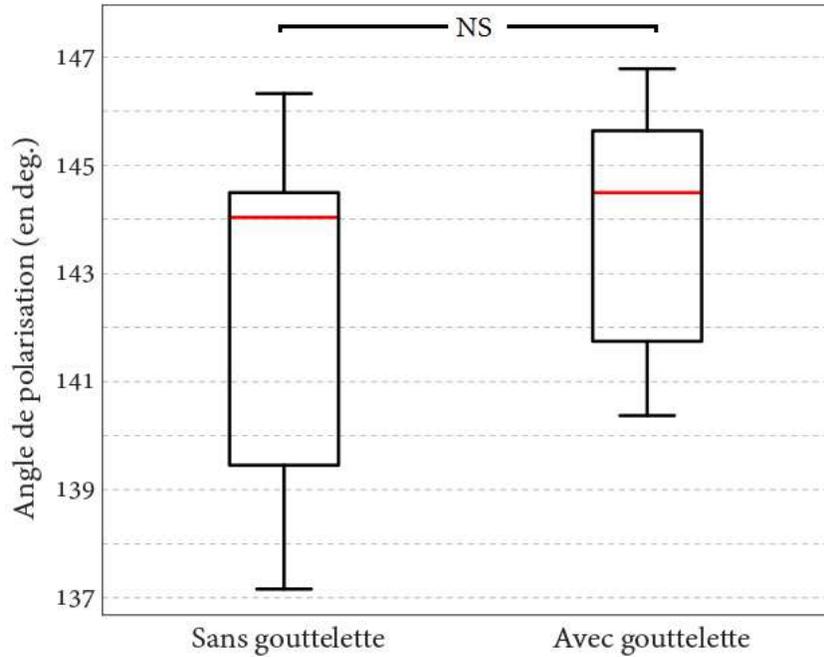


FIGURE 2.34 – Diagrammes en boîte décrivant les angles de polarisation calculés sans (gauche) et avec (droite) présence d’une goutte d’eau sur le capteur.

En tenant compte de la variation d'élévation solaire à 2.34° , on montre que la présence d'une gouttelette d'eau sur le filtre polarisant de la boussole céleste ne perturbe pas la mesure du cap. Ces résultats sont encourageants en vue d'un déploiement d'une version étanche de la boussole céleste dans des conditions météorologiques très dégradées impliquant des averses. Toutefois, les conditions expérimentales sont différentes d'un vrai contexte de pluie car le ciel était parfaitement dégagé. En cas de ciel totalement couvert, il faut s'attendre à de plus fortes perturbations dues aux nuages.

Avec gouttelette d'eau : mesures à 0° et à 90° . En présence d'une gouttelette d'eau, nous avons fait deux séries d'acquisitions : une première série selon une orientation fixe arbitraire, et une seconde après avoir tourné le compas de 90° . Les courbes filtrées correspondantes sont données en figure 2.35. Pour la première série, le cap mesuré est de $146.9^\circ \pm 0.96^\circ$ ($n = 9$). Cet angle passe à $56.0^\circ \pm 2.69^\circ$ ($n = 10$). L'erreur au sens des moindres carrés a été calculée entre les deux conditions (référence : 146.9°). Cette erreur est de 90.91° . Les acquisitions ayant duré 5 min, cela correspondait à une variation de l'élévation du soleil d'environ 0.8° . Ainsi, en tenant compte de la course du soleil, l'écart angulaire est cohérent avec le changement de cap du compas, montrant la cohérence de l'AdP après la traversée d'une goutte d'eau.

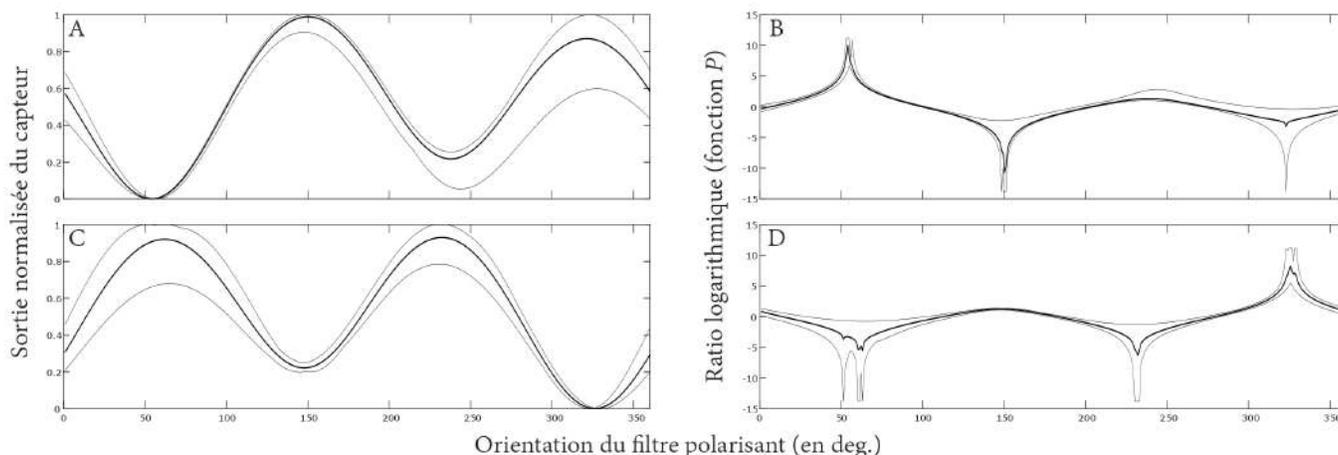


FIGURE 2.35 – Courbes issues du capteur de polarisation en cas de présence de gouttelettes d'eau simulant la pluie. **A** Signaux acquis filtrés et normalisés avec une gouttelette et une orientation du capteur à 0° . **B** Fonctions P correspondantes (ratio logarithmique). **C** Signaux acquis filtrés et normalisés en présence d'une gouttelette d'eau après avoir tourné le capteur de 90° . **D** Ratios logarithmiques correspondants. Pour tous les graphes, les courbes en gras sont décrivent les moyennes ; les traits fins donnent les courbes maximales et minimales. L'ensemble est déterminé en fonction de l'orientation du filtre polarisant.

Vision sous-marine

Dans cette partie, nous avons souhaité voir si la mesure du cap était possible sous 1 m d'eau douce. Nous sommes parvenus à réaliser 4 acquisitions dans une cuve avec la boussole céleste mono-pixel (Fig. 2.36A). Cette cuve contient $1 m^3$ d'eau (dimensions : $1 m \times 1 m \times 1 m$). Le capteur était placé dans le fond, au centre, afin de bénéficier d'une ouverture sur le ciel maximale de 52° (Fig. 2.36B,C). Les données ont été obtenues par temps clair en septembre 2019. Les courbes brutes et filtrées ainsi que les courbes du ratio logarithmique P sont données en figure 2.36D-F. Ces acquisitions se sont faites à orientation fixe ; elles ont notamment

permis d’aboutir aux angles de cap suivants : -4.9° , 3.6° , 3.2° et 2.3° , soit une moyenne de $1.0^\circ \pm 4.0^\circ$. Ces premiers résultats suggèrent que des applications sous-marines du compas céleste sont envisageables ; les travaux à venir devront particulièrement montrer la cohérence du capteur dans la détermination du cap en fonction de la profondeur d’une part, mais également en conditions réelles (en mer ou dans un lac), là où les eaux sont plus troubles et agitées. Il serait également intéressant de faire des observations suffisamment en profondeur afin de mesurer les effets des bords de la fenêtre de Snell⁷ sur les performances du compas céleste.

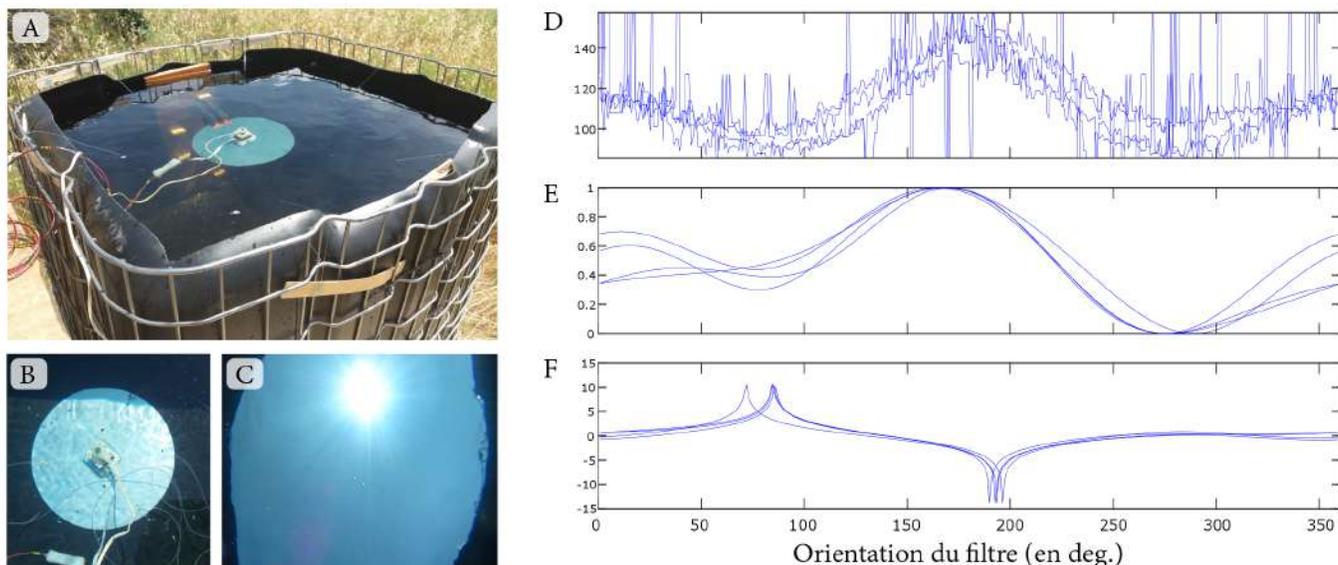


FIGURE 2.36 – Expérimentation dans une cuve de 1 m^3 d’eau douce. **A-C** Prises de vue de l’expérience. **D** Signaux bruts obtenus avec la boussole céleste. **E** Signaux filtrés et normalisés. **F** Fonctions P correspondantes. Profondeur du capteur pour les acquisitions : 1 m .

2.6 Conclusions sur la boussole céleste bio-inspirée

En utilisant la méthode d’AntBot, 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 0.968° . La méthode matricielle généralisée a également donné des résultats remarquables mais s’est avérée moins fiable en cas de couverture nuageuse totale.

Il a notamment été noté que hormis la méthode d’AntBot, toutes les autres utilisent un calcul d’arctangente pondéré d’un facteur $1/2$, réduisant à $]-45^\circ; 45^\circ[$ l’ensemble des angles calculés. Une indétermination mathématique a donc été introduite en plus de l’ambiguïté relative à la symétrie du motif de la polarisation céleste. La méthode d’AntBot a donné les meilleurs résultats, toutes conditions météorologiques confondues, sans introduire d’ambiguïté angulaire supplémentaire. Elle permet donc d’obtenir un cap modulo 180° . Le compas céleste est embarqué sur le robot AntBot. Ce dernier est équipé d’une tête articulée en roulis pour un débattement angulaire de $\pm 20^\circ$. Ce degré de liberté supplémentaire est utilisé pour résoudre

7. La fenêtre de Snell correspond au phénomène physique selon lequel un observateur immergé et regardant vers le ciel ne verrait ce qui se trouve à la surface qu’à travers un cône de perception de 97° , soit deux fois l’angle maximal de 48.5° tel que présenté dans la Fig. 2.32A.

l'ambiguïté solaire et ainsi déterminer si l'angle de cap appartient à $[0^\circ; 180^\circ[$ ou à $[180^\circ; 360^\circ[$. On mesure alors le niveau d'UV à gauche et à droite du robot afin de localiser le soleil. De plus, lorsqu'AntBot navigue, il est capable d'intégrer ses foulées en rotations. Cette information peut donc être utilisée pour lever l'indétermination. Au regard du champ de vision de la DRA des fourmis *Cataglyphis bicolor* (Fig. 2.5A), il semble que la forme ellipsoïde permettrait de résoudre cette ambiguïté solaire (détection de l'élévation solaire, mesure du gradient de couleurs (UV, bleu et vert) [22]). Cela n'est pour le moment pas possible avec le compas céleste du fait de sa symétrie circulaire. Cependant, l'articulation en roulis a permis de lever l'indétermination angulaire et confirme donc la nécessité d'allonger le champ de vision selon un axe arbitraire. En particulier, il a été montré que la DRA des insectes est décalée de 10° à 30° par rapport au centre de la voûte céleste, ce qui concorde avec notre débattement angulaire de 20° . Des études récentes menées chez la sauterelle ont montré que les positions des champs récepteurs des neurones du complexe central correspondent à la distribution des angles de polarisation dans le ciel [9]. Ces résultats suggèrent que l'AdP serait obtenu sans ambiguïté directement à partir du motif de polarisation.

Concernant le caractère biologiquement plausible de notre compas céleste à deux pixels et de la méthode d'AntBot, plusieurs points de comparaison méritent d'être mis en avant. Le cerveau des fourmis comporte en moyenne 250 000 neurones pour une masse d'environ 0.1 mg [211, 240]. Ces insectes n'ont donc que très peu de ressources pour déterminer leur vecteur de retour au nid (orientation et distance) lorsqu'elles naviguent. Le modèle d'opposition neuronale chez le grillon proposé par T. Labhart [135] a été implémenté dans la méthode d'AntBot avec une stratégie de WTA pour le calcul de l'angle. Cette solution, quoique bio-inspirée et tout à fait plausible [96], ne semble cependant pas coïncider avec les récents travaux sur la drosophile. En effet, des anneaux attracteurs ont été observés dans le complexe central de ces diptères et encoderaient l'AdP [123]. Compte tenu du degré élevé de similitude entre les insectes, les biologistes sont confiants quant à l'existence de tels réseaux de neurones chez d'autres insectes navigateurs, y compris les fourmis du désert. Néanmoins, les ressources calculatoires requises par la méthode d'AntBot sont très faibles et sont cohérentes avec les capacités restreintes des insectes.

D'autre part, la DRA de l'œil composé des fourmis *Cataglyphis* ne compte pas plus de 100 ommatidies [134], chacune d'elle comprenant 6 photorécepteurs sensibles au rayonnement UV [137]. Ainsi, l'insecte possède un total de 600 photorécepteurs spécialisés dans la détection de la lumière UV polarisée, ce qui représente 80% du nombre de mesures faites avec le compas céleste : 2×374 , soit 748 mesures. On peut alors supposer qu'une réduction de la résolution angulaire raisonnable du capteur n'affecterait pas ses performances.

Le compas céleste n'utilise que deux pixels, c'est-à-dire une unité de polarisation si l'on le compare aux ommatidies dans la DRA des insectes. La procédure de rotation des filtres polarisants permet de reproduire la grande variabilité des ommatidies présentes dans la DRA à moindre coût : alors que la version à 2 pixels ne coûte que 500€, son équivalent fixe à 2×374 pixels représenterait un coût de production d'environ 78000€ ! Cette solution de multiplexage temporel permet donc de mimer l'ensemble de la DRA à moindre frais. Toutefois, le délai introduit entre chaque mesure constitue une différence majeure dans la comparaison avec la biologie.

Contrairement à la DRA de la plupart des insectes ici considérés, presque aucune des implémentations robotiques mentionnées dans ce chapitre n'a utilisé le rayonnement UV. De plus, les capteurs développés ont été testés dans des conditions généralement favorables, soit

en laboratoire, soit en extérieur tôt le matin ou en fin d'après-midi pour limiter les risques de saturation. En outre, on sait d'après le modèle de diffusion de Rayleigh que le degré de polarisation est maximal à 90° de l'élévation solaire. Ainsi, en procédant à des acquisitions en début de matinée et en fin de journée, le soleil se trouve proche de l'horizon et donc le degré de polarisation est maximal au zénith, là où regardent les capteurs. Dans notre étude, toutes les conditions d'éclairement ont été abordées en bande UV : indice UV, luminosité ambiante, couverture nuageuse. Bien que la bande spectrale de la DRA des fourmis *Cataglyphis* et de notre capteur soit semblable, elle diffère par ses limites et pics de sensibilité. En effet, ce pic se trouve à 280 nm pour le compas céleste et l'ensemble des UV sont détectés (UV-A, UV-B, et UV-C). En revanche, le pic de sensibilité spectrale de *Cataglyphis* se situe à 350 nm et ne couvre que les UV-A. Cette différence de sensibilité peut avoir un impact sur les performances et doit être considéré dans les travaux à venir. L'état de développement actuel des technologies UV ne nous a pas permis de trouver un composant qui puisse correspondre plus fidèlement aux ommatidies de la DRA des fourmis *Cataglyphis* sans altérer de manière délétère la sensibilité en amplitude. Par ailleurs, la question de la préférence bleue ou verte chez certains insectes reste une énigme et mérite d'être approfondie dans le contexte de la navigation.

Le minimalisme de notre compas céleste inspiré de l'œil composé des insectes a permis d'obtenir une estimation fiable et robuste du cap du robot en conditions extérieures avec une précision médiane de 0.4° . Les applications d'un tel système sont considérables, particulièrement avec la course au véhicule autonome. Cependant la précision du compas devra être améliorée si l'on souhaite l'embarquer sur des véhicules ; en effet, avec une erreur de 0.4° pour un véhicule lancé à $130 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ sur une autoroute, cela correspondrait à un risque de percuter un véhicule se situant sur la voie adjacente en moins de 10 s !

Chapitre 3

Navigation autonome : l'intégration de chemin

Ce chapitre présente le système de navigation inspiré des fourmis du désert *Cataglyphis fortis* pour permettre à notre robot hexapode AntBot de se repérer dans un environnement extérieur inconnu. Notre démarche se veut bio-inspirée, à l'instar des travaux remarquables de Nicolas Franceschini sur la vision inspirée de celle des mouches [72], ou encore de ceux de Barbara Webb sur le comportement navigationnel des insectes [237]. Dans un premier temps, nous cherchons à définir un nouveau mode de localisation robuste et fiable afin de répondre à une demande technologique croissante. D'autre part, nous pensons que notre implémentation robotique de la fourmi du désert pourra intéresser les biologistes dans leur réflexion sur les comportements navigationnels et sur les modèles associés.

3.1 Introduction

Le développement de systèmes de navigation autonomes, robustes et précis est l'un des enjeux techniques et technologiques majeurs de notre époque. Les applications civiles et militaires de ces systèmes sont nombreuses : exploration d'environnements inconnus, accidentés ou hostiles, par exemple après une catastrophe naturelle ou industrielle, ou dans un contexte d'exploration extra-terrestre ; surveillance et inspection d'infrastructures urbaines ; transport à grande échelle d'humains et de marchandises ; automatisation de l'agriculture ; trafics maritime et fluvial ; missions de reconnaissance.

De nos jours, le GPS (*Global Positioning System*) constitue la principale méthode de géolocalisation des systèmes mobiles tels que les voitures, les avions, ou encore les bateaux et, de manière restreinte, les robots et les drones. Le GPS est d'ailleurs généralement intégré aux nouvelles technologies (smartphones, voitures avec conduite assistée, montres connectées), mais sa précision dans le domaine civil reste relativement faible (4.9 m sur un smartphone). Cette performance tend à se dégrader en cas d'occlusion partielle ou totale de l'espace aérien par des obstacles comme les infrastructures urbaines ou les canopées arborées [185]. Les conditions météorologiques jouent également un rôle déterminant dans la qualité du signal GPS, optimale lorsque le ciel est dégagé et que la pollution est faible.

Depuis plusieurs décennies, les caméras s'imposent de plus en plus comme une alternative au GPS pour la détermination de la position d'un système navigant, particulièrement

avec l'essor des algorithmes de type SLAM (*Simultaneous Localization And Mapping*) qui permettent de localiser le véhicule ou le robot en même temps qu'il construit une carte de l'environnement dans lequel il navigue. Ces solutions sont largement plébiscitées par les roboticiens, notamment dans le développement de drones autonomes (UAV, pour *Unmanned Aerial Vehicle*) [91, 158, 249]. En fonction de l'environnement dans lequel ils sont utilisés (intérieur ou extérieur), les algorithmes SLAM permettent d'obtenir d'excellents niveaux de précision, souvent au prix d'un coût en traitement de l'information extrêmement élevé. Par ailleurs, les résultats des méthodes visuelles de localisation dépendent fortement de la qualité optique de la scène dont l'optimalité repose notamment sur une constante luminosité, un critère quasiment impossible à satisfaire en conditions réelles [149, 229]. Les caméras événementielles pourraient rapidement s'avérer être une alternative sérieuse aux imageurs traditionnels. Preuve en est l'utilisation d'une caméra à vision dynamique (DVS ou DAVIS pour *Dynamic Vision System*) comme instrument de mesure odométrique [162]. Les méthodes de localisation par détection laser (LIDAR) permettent de générer des cartes de très haute résolution et en 3D pouvant être utilisées pour la navigation des véhicules et des robots terrestres [63]. Une fois encore, les excellents résultats obtenus avec toutes ces méthodes, à l'exception des caméras événementielles, s'accompagnent de limites comme l'encombrement physique et le coût de calcul. D'autre part, les caméras événementielles sont encore peu utilisées, le traitement de l'information nécessitant une approche radicalement différente de celle des caméras traditionnelles.

Les solutions dites proprioceptives constituent la troisième grande catégorie de localisation. Les systèmes mobiles sont alors équipés de capteurs tels que les codeurs rotatifs qui, placés sur les axes des roues, permettent de déterminer la distance parcourue par le robot. Selon le même principe, on utilise des sondes à effet Hall pour déterminer la vitesse de rotation des hélices des drones, ce qui permet de déterminer le comportement dynamique de celui-ci (vitesse, attitude). Les centrales inertielles (IMU - *Inertial Measurement Units*), généralement constituées d'un accéléromètre, d'un gyroscope, d'un magnétomètre et parfois d'un altimètre, fournissent des informations précieuses sur la vitesse et l'orientation du robot, ainsi que son altitude. Ces informations peuvent alors être fusionnées avec celles d'un GPS pour affiner l'estimation de position et d'attitude du système, réduisant ainsi les limites de chacune de ces solutions technologiques [261]. Parmi les inconvénients liés aux IMUs, on peut citer les dérives en régime dynamique (accéléromètre) et en régime statique (gyroscope). Le magnétomètre est également par nature sensible aux interférences électromagnétiques dues à la présence de matériaux ferromagnétiques présents dans l'environnement mais aussi dans le robot lui-même. Des algorithmes permettent de réduire l'effet à long terme de ces dérives, particulièrement le filtrage de Kalman et le filtrage complémentaire, sans pour autant parvenir à réduire les erreurs de localisation.

L'ensemble des stratégies de navigation ainsi décrites sont intrinsèquement adaptées à une utilisation en extérieur, mais restent contraintes à des applications spécifiques. L'emploi du GPS pour localiser un micro-robot de quelques centimètres apparaît donc absurde. On note à ce sujet qu'aujourd'hui encore, les exemples de navigation autonome proviennent presque exclusivement du secteur automobile pour lequel les contraintes liées à l'encombrement et au traitement de l'information sont moins importantes. En conséquence, notre objectif est ici de définir un système de navigation simple et efficace, qui ne soit pas affecté par les problèmes d'échelle dans son utilisation, et qui puisse être exploité en extérieur quelles que soient les conditions météorologiques et l'environnement dans lequel le système mobile évolue. Nous

avons présenté dans le chapitre 2 un compas céleste inspiré des fourmis fiable et robuste dans de nombreuses conditions expérimentales. Nous proposons donc de nous inspirer des comportements de navigation de ces fourmis du désert pour développer notre système de localisation.

3.2 La navigation chez les fourmis du désert

3.2.1 Les fourmis *Cataglyphis*

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 [15] (Fig. 3.1). Dans l'ensemble, les fourmis *Cataglyphis* vivent dans des milieux arides (dunes, steppe, brousse), jusqu'à 3000 mètres d'altitude et dans des conditions de température extrêmes.

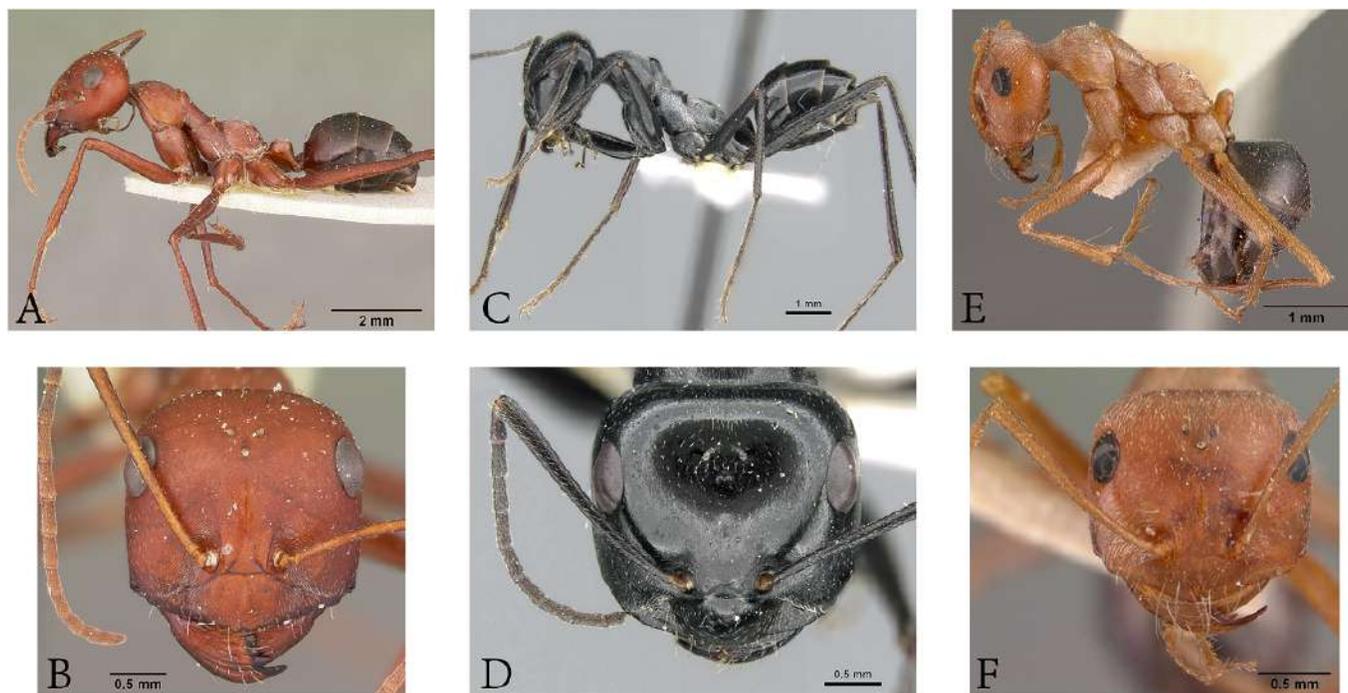


FIGURE 3.1 – Trois espèces de fourmis du genre *Cataglyphis* et vivant dans le désert du Sahara. **A-B** *Cataglyphis bicolor* (Crédits : April Nobile). **C-D** *Cataglyphis fortis* (Crédits : Estella Ortega). **E-F** *Cataglyphis bombycinus* (Crédits : April Nobile). Source : AntWeb.org sous la licence CC-BY-SA-3.0.

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 la colonie. Diverses stratégies de résistance à la température ont émergé au cours de l'évolution de ces fourmis. 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 $70 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ [243]. Une telle allure leur permet notamment de retrouver rapidement leur nid tout en minimisant le risque d'hyperthermie.

Les fourmis *Cataglyphis* 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*, tout comme leurs cousines des déserts australiens *Melophorus* 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 voute céleste afin d'en extraire leur cap. Enfin, elles sont capables de mesurer le flux optique lors de leur déplacement à des fins d'évaluation de distance.

3.2.2 L'intégrateur de chemin, un fil d'Ariane

Les fourmis du désert *Cataglyphis* sont des navigatrices hors pair. Elles 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. 3.2). En moins de 25 minutes, ces fourmis sont capables des distances équivalentes à plus de 70000 fois leur taille à la vitesse moyenne de $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [247, 248]. 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 [242] ou d'intégration de chemin [159]. 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 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 [248]. 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. Les informations relatives au cap sont déterminées par la polarisation de la lumière du ciel, la position du soleil dans la voute céleste, et par le gradient spectral céleste [127, 221, 247]. 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* [241], tout comme les abeilles [57], 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

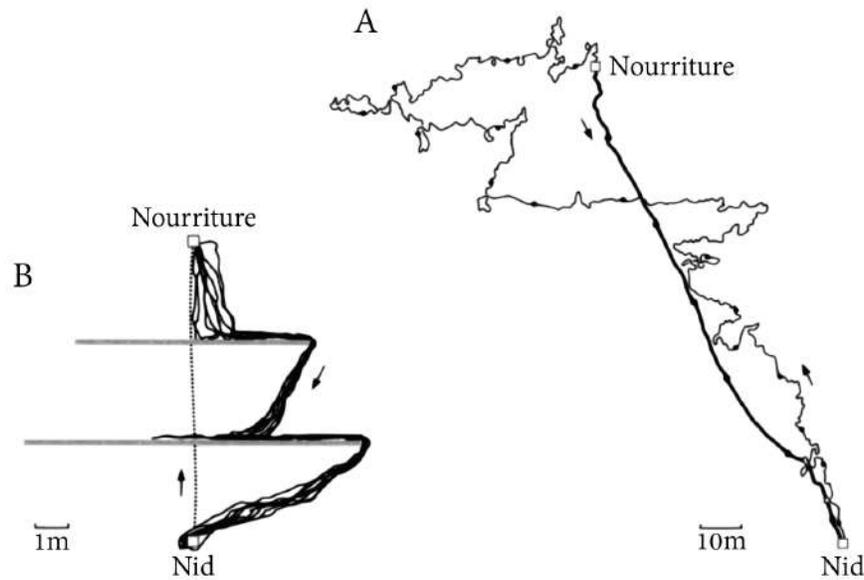


FIGURE 3.2 – L'intégration de chemin chez les fourmis du désert *Cataglyphis fortis*. Adapté de [247]. **A** Intégration de chemin durant une sortie de l'insecte pour trouver de la nourriture (aller : 592 m en 18.8 min ; retour : 140 m en 6.5 min. Les points noirs correspondent à des intervalles réguliers 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.

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 [70]. 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 pas tranchée actuellement.

Polarisation de la lumière du ciel

La toute première preuve de l'utilisation de la polarisation de la lumière du ciel chez les insectes fut apportée en 1949 par Karl von Frisch, qui reçut notamment le prix Nobel de physiologie en 1973 pour ses travaux sur les insectes sociaux. Il montra alors que les abeilles orientent leur danse à l'entrée du nid en fonction de l'AdP qu'elles détectent [77]. Comme nous l'avons vu dans le précédent chapitre, de nombreux travaux ont mis en évidence la vision polarisée chez les insectes, en particulier chez les fourmis du désert [136].

Position du soleil

La position du soleil constitue un amer visuel très saillant dans la voûte céleste et peut être utilisé pour lever l'ambiguïté angulaire de cap générée par la polarisation de la lumière [142, 199]. Toutefois, cette méthode est facilement mise en défaut par de nombreuses contraintes comme la présence de nuages ou de la végétation, ou la variation de l'azimut solaire [238].

Gradient spectral céleste

Il a été montré que les abeilles sont capables de différencier la moitié solaire et la moitié anti-solaire de la voûte céleste simplement en fonction du spectre d'émission de la lumière du ciel. En particulier, lorsque les longueurs d'ondes sont majoritairement au dessus de 410 nm , elles considèrent la partie du ciel correspondante comme solaire ; a contrario, la région du ciel émettant une plus grande fraction de longueurs d'ondes en dessous de 410 nm sera associée à la partie anti-solaire [59]. Cette sensibilité spectrale, également observée chez les fourmis *Cataglyphis* permet de déterminer la position du soleil même lorsque celui-ci est dissimulé par les nuages ou la végétation [239]. Cette différenciation de la voûte céleste permet notamment de lever l'indétermination angulaire du cap liée à la symétrie du motif de polarisation.

Odométrie

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 nord) et *Melophorus* (australie) peuvent collecter des informations odométriques à partir de plusieurs sources : le flux optique panoramique [240, 256, 258], la ligne d'horizon panoramique [87], le flux optique ventral [196], et enfin le comptage de foulées (ou podomètre) [252, 253, 255]. 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. En revanche, l'utilisation du flux optique ventral reste sujet à débat [127]. De récentes études suggèrent cependant que les deux indices odométriques (flux optique et foulées) peuvent être utilisés, séparément ou non, pour estimer la distance au nid [177].

3.2.3 Les autres modes de navigation

3.2.3.1 La navigation visuelle

La navigation visuelle (guidage visuel) permet à l'insecte de retrouver son chemin par comparaison d'images mémorisées. Cette technique est particulièrement utilisée dans les environnements encombrés dans lesquels les points de repères visuels sont suffisamment grands et contrastés pour être mémorisés (arbres, rochers, broussailles) [33, 76, 228, 244]. Des décennies durant, des études sur les fourmis du désert ont tenté d'expliquer les liens existant entre l'intégration de chemin et le guidage visuel, en particulier les conditions et critères de choix de l'une ou l'autre méthode par l'insecte [32, 99, 163, 247]. Il a été observé que les deux procédés peuvent se superposer [245], mais l'intégrateur de chemin n'est jamais éteint et est maintenu à jour tout au long des expéditions de l'insecte (fil d'Ariane) [244]. On note également que les fourmis tendent à privilégier l'intégrateur de chemin lorsque les scènes visuelles leur semblent moins familières [144].

D'autre part, on sait maintenant que les fourmis sont capables de mémoriser des séries d'images prises le long routes permettant d'accéder à l'entrée du nid [217]. La zone démarquée par ces routes (*catchment area*) peut s'étendre jusqu'à 10 m autour du nid [34, 35, 83]. L'insecte, en entrant dans cette zone, peut comparer ce qu'il voit aux images qu'il a mémorisé. Cette comparaison fournit un cap à suivre par différence angulaire des images panoramique

(Fig. 3.3E). A mesure que l'insecte se rapproche du nid, on observe une décroissance de la différence d'image (Fig. 3.3A-D) [258].

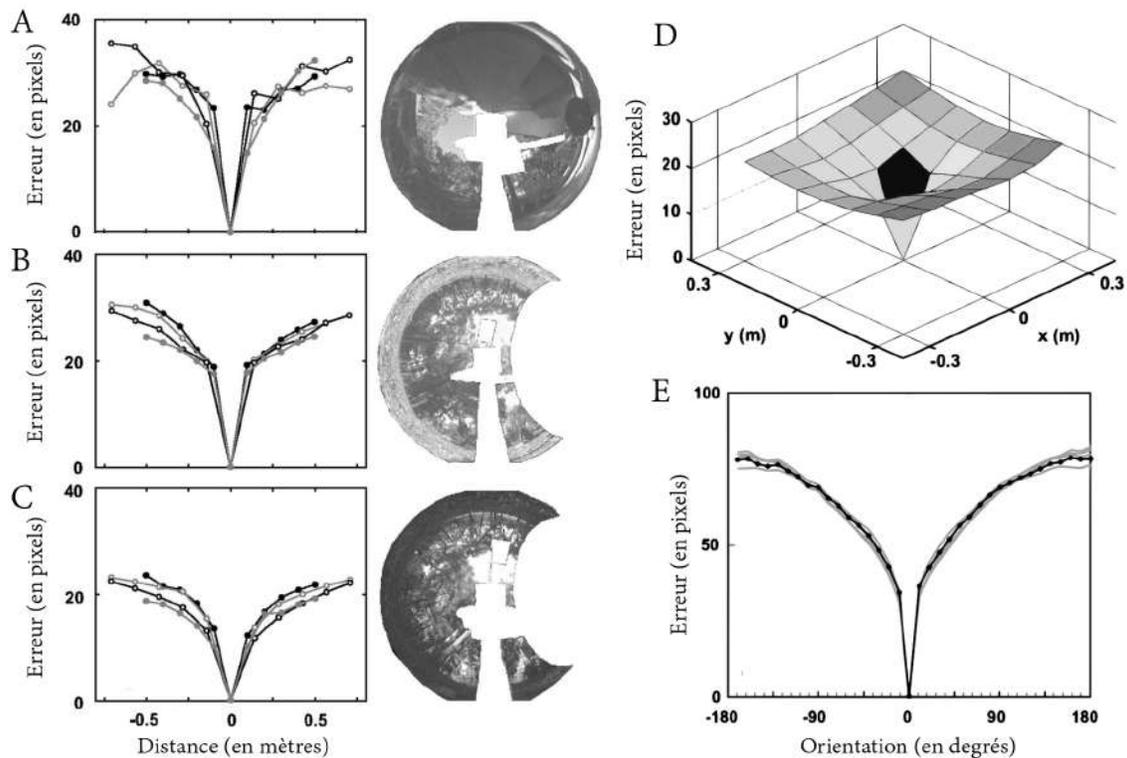


FIGURE 3.3 – Principe mathématique du guidage visuel en vision panoramique chez les fourmis du désert. Adapté de [258]. **A-C** Différences d'images pour trois environnements différents. Considérant une image panoramique de référence en 0, on donne l'erreur en pixels en fonction de la distance à la référence selon un axe. **D** Différence 2D en distance. **E** Différence d'image en fonction de l'orientation de l'imageur. On donne l'erreur en pixels en fonction de l'orientation en degrés de l'image par rapport à une image de référence.

Outre les applications de navigation, la vision panoramique est avant tout utilisée pour déterminer la présence d'obstacles et de prédateurs (Fig. 3.2B).

3.2.3.2 L'olfaction

On a pu voir que la navigation par suivi de pistes de phéromones est impossible dans le désert. Pourtant, des études ont montré que *Cataglyphis fortis* est capable d'utiliser l'olfaction à des fins de navigation. On sait par exemple qu'elles utilisent leur odorat pour détecter leur nourriture grâce aux flux d'air qu'elles perçoivent [18]. En particulier, un insecte de la taille d'une drosophile peut attirer une fourmi dans un rayon de 5 m. De manière analogue, les fourmis *Cataglyphis* peuvent localiser précisément l'entrée de leur nid en détectant le flux de CO₂ qui s'en échappe, lequel étant produit par l'activité de la colonie [20]. Enfin, en analysant 100 échantillons d'odeurs récoltés sur un terrain de 100 m × 100 m où ces fourmis ont l'habitude de naviguer, Buehlmann et al. [19] ont montré une corrélation entre certaines odeurs et le lieu où elles se concentrent, et donc que celles-ci peuvent être utilisées pour localiser des points d'intérêt.

3.3 Odométrie : le 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 [82, 102, 110, 128, 165]. 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.

3.3.1 Le flux optique chez les insectes

Nombre d'insectes volants se réfèrent au flux optique, notamment les abeilles dont l'allure peut atteindre $32 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ dans des environnements complexes, souvent arborés, afin d'éviter les obstacles tels que les arbres et autres broussailles (Fig. 3.4A) [213, 219, 220]. On sait également depuis peu que le syrphe ceintré (*Epysirphus balteatus*) ne perçoit pas la gravité et détecte sa variation en altitude en partie à l'aide du flux optique latéral généré par l'environnement qui l'entoure [85]. De la même manière, le flux optique serait impliqué dans la stabilisation en tangage chez les syrphes, comme l'ont proposé Goulard et al. [86].

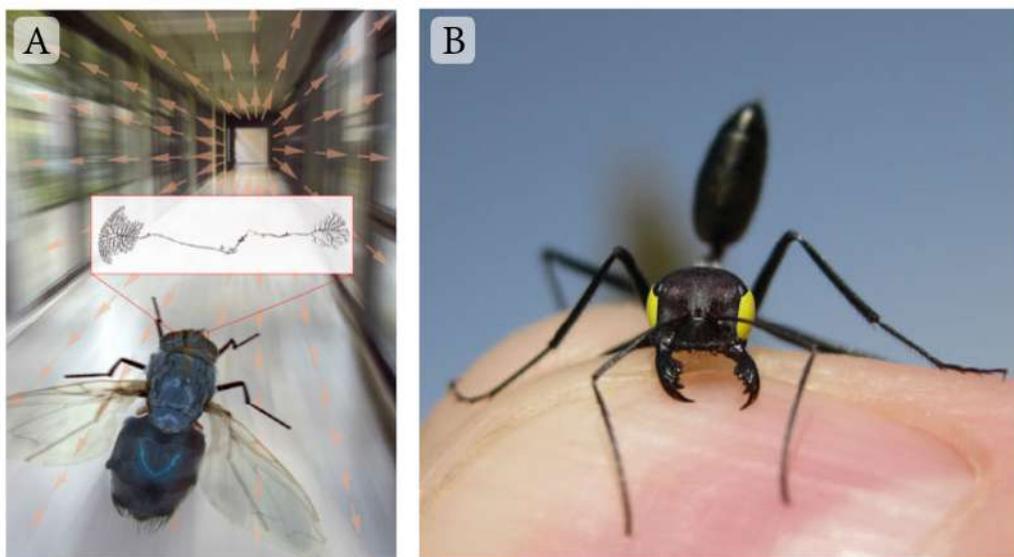


FIGURE 3.4 – Le flux optique chez les insectes. **A** Champ de vecteur de flux optique perçu par une mouche volant en ligne droite dans un tunnel. Les neurones des ganglions visuels sont également représentés, en correspondance avec les yeux composés de l'insecte (Crédits : Robert Schorner, PhotoLab/Max Planck Institute of Neurobiology) [66]. **B** Une fourmi *Cataglyphis fortis* dont la partie ventrale des yeux composés a été peinte de façon à supprimer le flux optique ventral lors de tâches de navigation [177].

Chez les fourmis du désert, le flux optique ventral est utilisé pour déterminer la distance parcourue [196]. Cependant, 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, Pfeffer et al. 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 congénaires, tandis que les individus non aveugles étaient capables de rejoindre leur nid (Fig. 3.4B) [177]. Ces travaux démontrent 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.

3.3.2 Etat de l'art des capteurs de flux optique

En vision par ordinateur, les caméras traditionnelles CMOS sont majoritairement utilisées pour la détection du flux optique. Bien que les principes du flux optique ont été appréhendés dès le début du 20^{ème} siècle [101], il faudra attendre le début des années 1980 pour que les premiers algorithmes d'extraction du flux optique voient le jour, avec les travaux de Lucas et Kanade [150] d'une part, et de Horn et Schunck [109] d'autre part. Ces algorithmes produisent un champ de vecteurs donnant la direction, le sens et la distance de déplacement de chaque amer visuel détecté dans la scène. Depuis, plusieurs algorithmes ont été proposés et s'appliquent sous diverses conditions plus ou moins restrictives [184]. L'exploitation du flux optique s'est également étendue au cadre des algorithmes de type SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*). Ces algorithmes permettent l'extraction d'amers visuels saillants, lesquels sont ensuite suivis d'une image à l'autre pour estimer le mouvement et la position du robot. De nombreuses solutions de type SLAM ont été proposées pour les robots terrestres [231], les voitures autonomes [81, 158] et pour les drones [12, 103, 117, 249].

De nombreux capteurs visuels neuromorphiques sont aujourd'hui disponibles pour la mesure du flux optique, s'inspirant de la rétine des vertébrés afin d'allier précision et robustesse [13, 179, 257]. Les caméras ATIS (*Asynchronous Time-based Image Sensor*) et les caméras DAVIS (*Dynamic and Active-pixel Vision Sensor*) sont des caméras CMOS événementielles dont chaque pixel répond à un changement de contraste ou de luminosité dans la scène [10]. L'information n'est alors plus représentée par une matrice de pixels comme c'est le cas pour les caméras conventionnelles, mais consiste en une succession d'évènements, un évènement étant défini par l'adresse et l'instant d'activation d'un pixel donné, et sa polarité : +1 si le pixel a détecté une augmentation de contraste, -1 si c'est une diminution. L'adressage par pixel plutôt que par image permet une détection des mouvements beaucoup plus rapide, et le traitement de l'information est considérablement réduit dès lors que seuls les pixels contenant de l'information seront traités.

Devant la demande croissante en capteurs de flux optique performants et adaptés à une utilisation en extérieur, plusieurs projets de rétines artificielles ont vu le jour au cours des dernières années. Les détecteurs élémentaires de mouvement (DEM) sont des modèles de détection du mouvement inspirés des coléoptères qui ont été introduits par Hassenstein et Reichardt [93, 143] (voir le schéma de principe en Fig. 3.6D). Ces DEM sont à la base de la conception des rétines artificielles bio-inspirées, à l'instar du projet CURVACE d'œil composé biomimétique inspiré de l'œil de la mouche et dont le champ de vision atteint $60^\circ \times 180^\circ$ (Fig. 3.5A,B) [71, 230]. Il a notamment été utilisé pour du suivi de tunnel en vision panoramique (deux capteurs CURVACE disposés en opposition) [62], et dans des tâches de suivi de cible dans les travaux de Colonnier et al. [38], montrant ainsi un fort potentiel quant à une utilisation en conditions réelles. Un autre bel exemple d'implémentation d'œil composé à structure convexe est celui de Song et al. [218] (Fig. 3.5C), représentant une matrice de 16×16 pixels disposés dans une structure hémisphérique réalisée en PDMS (polydiméthylsiloxane), un polymère siliconé. Les angles d'acceptance et interommatidial de cet œil artificiel sont de 9.7° et 11.0° respectivement. D'autres exemples de capteurs bio-inspirés, planes ou convexes, sont présentés dans l'état de l'art de Cheng et al. [26]. Enfin, le capteur M²APix,

utilisé dans ce projet doctoral pour fournir les données de flux optique ventral et que nous allons décrire dans la section suivante, constitue également une implémentation de rétine artificielle plane constituée de 10 DEM capables de s'adapter aux changements de luminosité [151].

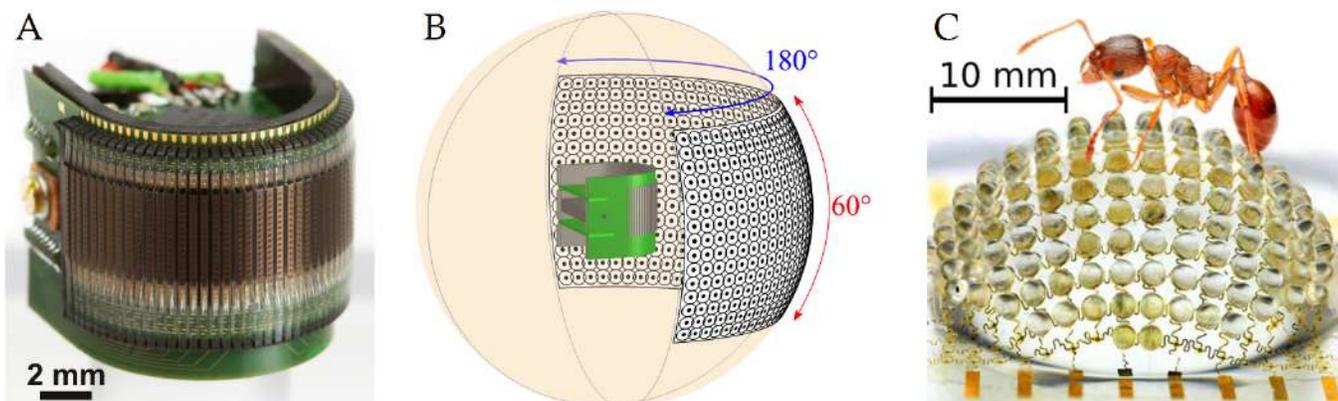


FIGURE 3.5 – Exemples de rétines artificielles. **A** La rétine artificielle bio-inspirée Curvace. **Gauche** Photographie de la rétine artificielle. Le capteur occupe un volume total de seulement 2.2 mm^3 , ne pèse que 1.75 g et consomme au maximum 0.98 W . **B** Illustration du champ de vision du capteur Curvace. Adapté de [71, 230]. Plus d'informations à l'adresse suivante : <http://www.curvace.org/>. **C** Le tout premier œil artificiel composé de 256 pixels encapsulés dans une structure souple en élastomère à géométrie convexe. La matrice de 16 par 16 pixels surmontés de micro-lentilles occupe une surface de $14.72 \text{ mm} \times 14.72 \text{ mm}$ (Crédits : John Roger, Beckman Institute et University of Illinois) [218].

3.3.3 M^2APix , le capteur de flux optique bio-inspiré

Le capteur visuel M^2APix est composé de deux lignes de six pixels hexagonaux (Fig. 3.6A-C) [151, 227]. Ceux-ci sont auto-adaptatifs aux changements de luminosité ambiante grâce à la loi de Michaelis-Menten qu'ils implémentent. La rétine, qui mesure $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, est un circuit CMOS intégré sur une puce LCC24 de $9 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$ et dotée de 24 broches (Fig. 3.6A). La fréquence d'échantillonnage pouvant aller de 100 Hz à 1 kHz , a été fixée à 333 Hz pour toutes les applications faites durant cette thèse. La réponse de chaque photorécepteur, notée V , est donnée par l'équation de Michaelis-Menten [157] :

$$V = V_m \cdot \frac{I^n}{I^n + \sigma^n} \quad (3.1)$$

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 M^2APix [151]). Cette équation décrit le phénomène d'adaptation aux changements 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) [164]. La constante de temps d'adaptation des pixels, égale à 0.5 s , est fixée par un condensateur externe (47 nF) [151]. Le capteur M^2APix peut mesurer un flux optique bidimensionnel comme l'ont montré Pericet-Camara et al. avec un œil élémentaire composé d'un triplet de pixels hexagonaux disposés aux coins d'un triangle équilatéral [175]. Toute-

fois, 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.

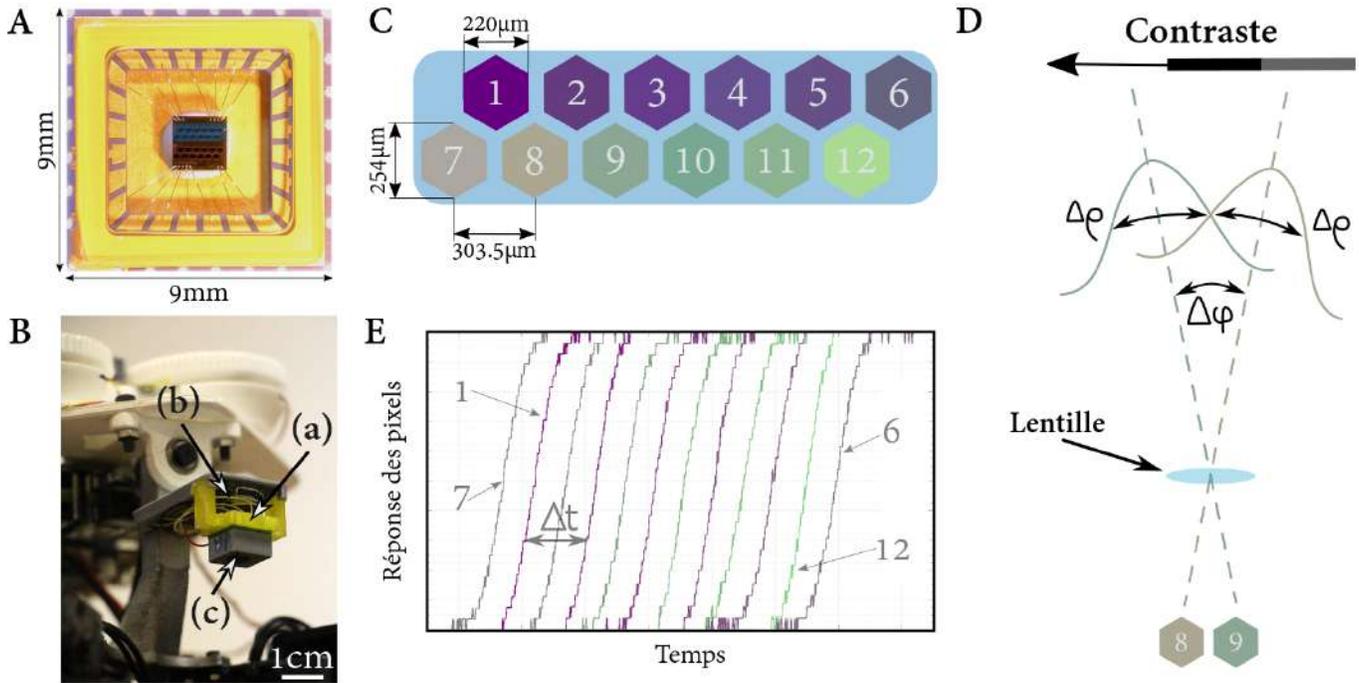


FIGURE 3.6 – Le capteur de flux optique M²APix. **A** La rétine M²APix. Adapté de [151]. **B** Photographie du capteur M²APix embarqué sur l'avant de la tête du robot AntBot. La rétine (a) est connectée à un microcontrôleur (b, Teensy 3.2) et surmontée d'une lentille défocalisée (c). **C** Vue schématique 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 [227]. **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.

3.3.4 Mesure du flux optique et estimation de distance parcourue

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 :

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta T} \quad (3.2)$$

$\Delta\varphi$ 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. 3.6D,E). Calculer le flux optique ω revient donc à déterminer ce délai ΔT . Deux méthodes ont été testées en lumière contrôlée par Vanhoutte et al. [227] :

- La méthode par seuillage : lorsqu'un pixel i a détecté un contraste, c'est-à-dire que sa réponse a dépassé un seuil prédéfini, un compteur est déclenché. Celui-ci s'arrête lorsque le pixel voisin $i \pm 1$ détecte également ce contraste. Le temps ΔT correspond donc à la valeur du compteur (Fig. 3.7A).

- La méthode de la corrélation croisée : on conserve la réponse temporelle de chaque pixel dans un buffer de taille fixe. Le temps de délai ΔT est alors déterminé par le décalage temporel du buffer d'un pixel donnant le maximum de corrélation avec le buffer non retardé du pixel voisin (Fig. 3.7B,C).

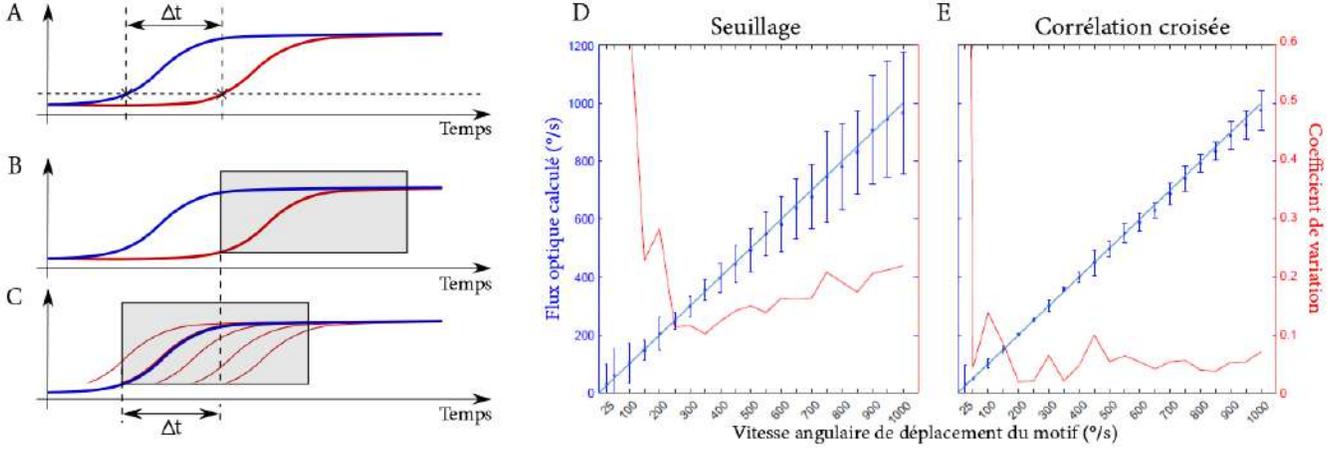


FIGURE 3.7 – Calcul du flux optique. **A-C** Calcul du flux optique entre le pixel i (bleu) et le pixel $i \pm 1$ (rouge). **A** Méthode par seuillage. **B,C** Méthode par corrélation croisée. **D** Précision du flux optique obtenu par seuillage. **E** Précision du flux optique obtenu par corrélation croisée. Le flux optique théorique est donné par la première bissectrice. Adapté de [227].

Les performances de chaque algorithme ont été évaluées [226, 227]. Le flux optique calculé a ainsi pu être comparé à la vitesse angulaire de déplacement d'un motif texturé placé devant le capteur, perpendiculairement à son axe optique (Fig. 3.7D,E). La méthode par corrélation croisée s'avère considérablement plus précise que la méthode par seuil, avec une faible variabilité des estimations de flux optique quelle que soit la vitesse du motif texturé. Cette tendance se confirme au travers de la lecture du coefficient de variation $C_v = \sigma/\mu$, où σ est l'écart-type et μ est la moyenne. En effet, celui-ci se stabilise en dessous de 10% avec la méthode par corrélation croisée, tandis qu'il augmente et dépasse 20% avec la méthode par seuillage.

Chaque paire de pixels adjacents dans une même ligne (*i.e.* DEM) est utilisée pour calculer une valeur de flux optique ω . En connaissant la hauteur au sol d du M²APix, on peut déterminer la vitesse \mathcal{V} d'avance du robot :

$$\mathcal{V} = d \cdot \omega \quad (3.3)$$

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 :

$$D = \frac{d \cdot \Delta\varphi \cdot T}{\Delta T} \quad (3.4)$$

3.3.5 Calibration en lumière contrôlée

Le calcul de la distance parcourue D (Eq. 3.4) implique de connaître avec exactitude la valeur de l'angle interpixel $\Delta\varphi$. Un banc de test a donc été mis en place afin de caractériser le

capteur M²APix (Fig. 3.8A) [54, 197, 227]. On mesure alors la réponse des 12 pixels du capteur pour des vitesses différentes d'un motif texturé placé devant (de 15 cm · s⁻¹ à 85 cm · s⁻¹ par paliers de 10 cm · s⁻¹). D'après les équations 3.2 et 3.3, on a :

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta T \cdot \mathcal{V}}{d} \quad (3.5)$$

Ainsi, pour chaque vitesse imposée du motif texturé, il est possible de calculer $\Delta\varphi$ connaissant la distance d séparant l'optique du capteur et le motif en mouvement, la vitesse \mathcal{V} donnée par le tachymètre, et le délai ΔT déterminé par la méthode de corrélation croisée. L'angle interpixel $\Delta\varphi$ est alors en moyenne de 3.57°, pour un écart-type très faible de 0.027° (Fig. 3.8B,D). Le rapport signal-sur-bruit (RSB), pris comme étant égal à l'inverse du coefficient de variation $C_v = \sigma/\mu$, a lui aussi été calculé, donnant une valeur moyenne de 31.97 dB (Fig. 3.8C).

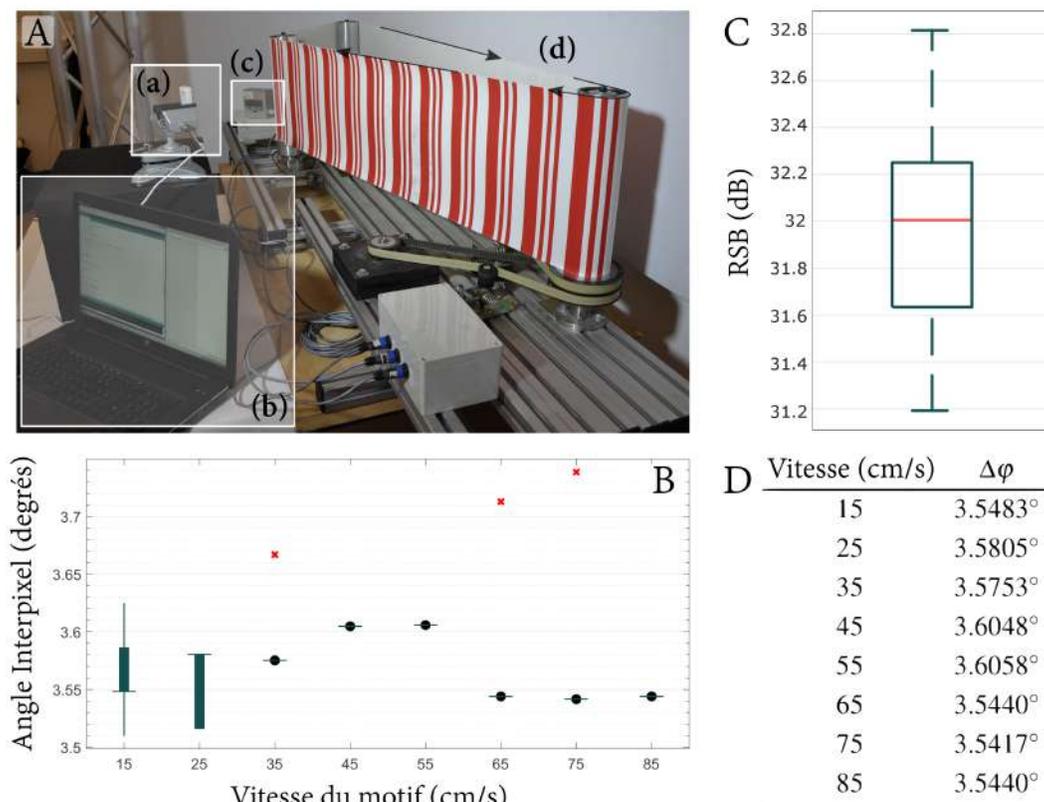


FIGURE 3.8 – Caractérisation du capteur de flux optique M²APix en lumière contrôlée. **A** Photographie du banc de test, montrant (a) le M²APix; (b) l'ordinateur pour la collecte et le traitement des données; (c) le tachymètre; (d) le motif mis en mouvement dans le sens perpendiculaire à l'axe optique du M²APix. **B,D** Détermination de l'angle interpixel $\Delta\varphi$ en fonction de la vitesse du motif texturé. **C** Diagramme en boîte du rapport signal-sur-bruit (RSB), dont la moyenne s'établit à 31.97 dB \pm 0.44 dB.

3.4 L'intégrateur de chemin d'AntBot

3.4.1 L'algorithme de navigation

Soient Ψ l'orientation du robot par rapport à l'axe $(O; \vec{x})$, 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. 3.9). 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 Section 3.4.2).

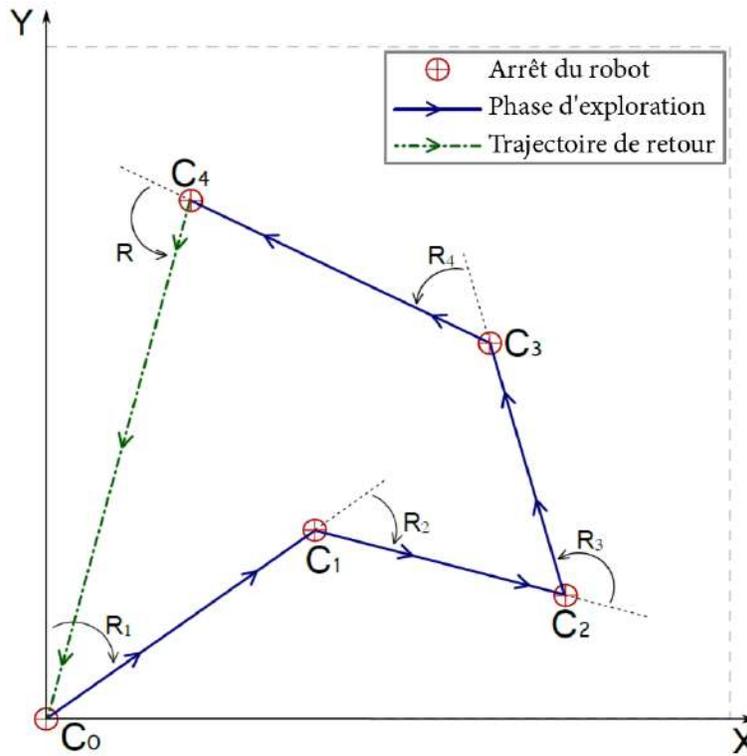


FIGURE 3.9 – Graphe de principe de l'intégrateur de chemin pour un trajet aller incluant $N_{seg} = 4$ segments de lignes droites. Les angles R_i correspondent aux ordres de rotation du robot, et R est la consigne de retour à la base.

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

$$\Psi_i = \Psi_{ciel,i} - \Psi_{init} \quad (3.6)$$

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 :

$$\begin{cases} x_i = x_{i-1} + D_i \cdot \cos(\Psi_i) \\ y_i = y_{i-1} + D_i \cdot \sin(\Psi_i) \end{cases} \quad (3.7)$$

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 :

$$D_R = \sqrt{x_{N_{seg}}^2 + y_{N_{seg}}^2} \quad (3.8)$$

et la direction Ψ_R de retour :

$$\Psi_R = \begin{cases} \operatorname{atan}\left(\frac{y_{N_{seg}}}{x_{N_{seg}}}\right) & \text{si } x_{N_{seg}} < 0 \\ 180^\circ + \operatorname{atan}\left(\frac{y_{N_{seg}}}{x_{N_{seg}}}\right) & \text{si } x_{N_{seg}} > 0 \end{cases} \quad (3.9)$$

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. 3.7), puis réévaluer la trajectoire de retour optimale (Eq. 3.8 et 3.9).

3.4.2 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 un nombre d'indices et de faibles ressources calculatoires.

PI-ST : le mode aveugle

Le premier modèle de navigation, dit *aveugle*, ne requiert aucune information visuelle. 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 foulée s'opère simplement par une copie de la commande motrice envoyée au contrôleur du robot. En conséquence :

$$D_i = N_{marche,i} \cdot d_{marche} \quad (3.10)$$

$$\Psi_i = N_{rot,i} \cdot \Delta\Psi_{rot} \quad (3.11)$$

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 Psi_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 PI-ST-OF

Le modèle de navigation PI-ST-OF estime toujours l'orientation du robot sur la base du comptage de foulées en rotation. En revanche, les données odométriques sont calculées avec le flux optique ventral, mesuré au moyen du capteur M²APix. En conséquence :

$$D_i = \frac{d \cdot \Delta\varphi \cdot T}{\Delta T_i} \quad (3.12)$$

$$\Psi_i = N_{rot,i} \cdot \Delta\Psi_{rot} \quad (3.13)$$

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. Les panneaux texturés utilisés pour générer le flux optique sont donnés en annexe G.

Le modèle PI-ST-Fuse

Le modèle de navigation PI-ST-Fuse 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 :

$$D_i = \frac{1}{2} \left(N_{marche,i} \cdot d_{marche} + \beta \cdot \frac{d \cdot \Delta\varphi \cdot T}{\Delta T_i} \right) \quad (3.14)$$

$$\Psi_i = N_{rot,i} \cdot \Delta\Psi_{rot} \quad (3.15)$$

où β est une constante empirique fixée à l'avance. Les servomoteurs Dynamixel AX18A utilisés par le robot AntBot montrent des comportements dynamiques variables en fonction de la température ambiante. Ainsi, la distance moyenne estimée peut varier selon que les expériences soient 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 foulées tendent à générer des valeurs de flux optiques élevées du fait du passage d'une vitesse nulle à une vitesse maximale, et réciproquement (Fig. 3.10). 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. 3.1).

Le modèle 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 embarqué sur sa tête, dont l'ambiguïté angulaire est résolue par localisation du soleil dans la voûte céleste, mais

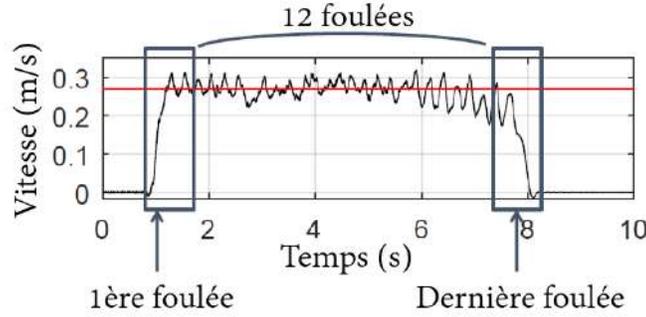


FIGURE 3.10 – Vitesse d’avance en ligne droite du robot AntBot mesurés à l’aide du système VICON de l’arène de vol de l’ISM. La vitesse instantanée est donnée en noir ; la vitesse moyenne est donnée en rouge. La première et la dernière foulée génèrent des profils de vitesses pouvant conduire à des estimations erronées de la vitesse moyenne du robot. La vitesse moyenne 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

TABLEAU 3.1 – Constante β utilisée pour l’odométrie. β_M : valeurs retenues pour le matin ; β_A : valeurs retenues pour l’après-midi.

également d’après le nombre de foulées en rotation effectuées. L’intégration des foulées en ligne droite permet la mesure de la distance parcourue. En conséquence :

$$D_i = N_{marche,i} \cdot d_{marche} \quad (3.16)$$

$$\Psi_i = \frac{1}{4} \left(\Delta\psi \cdot \left(\arg \min_{i \in [1..N/2]} P_i + \arg \min_{i \in [N/2+1..N]} P_i + \arg \max_{i \in [1..N/2]} P_i + \arg \max_{i \in [N/2+1..N]} P_i \right) - 180^\circ \right) \quad (3.17)$$

Voir la section 2.3.3 pour le calcul du cap à l’aide du compas céleste. 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 l’insecte : 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 :

$$D_i = \frac{1}{2} \left(N_{marche,i} \cdot d_{marche} + \beta \cdot \frac{d \cdot \Delta\varphi \cdot T}{\Delta T_i} \right) \quad (3.18)$$

$$\Psi_i = \frac{1}{4} \left(\Delta\psi \cdot \left(\arg \min_{i \in [1..N/2]} P_i + \arg \min_{i \in [N/2+1..N]} P_i + \arg \max_{i \in [1..N/2]} P_i + \arg \max_{i \in [N/2+1..N]} P_i \right) - 180^\circ \right) \quad (3.19)$$

3.5 Démonstration de faisabilité

3.5.1 Objectifs

Une première série d'expériences ont été conduites afin de démontrer la pertinence de notre intégrateur de chemin inspiré des fourmis du désert. Seuls les modes PI-ST (aveugle) et PI-Full (modèle de la fourmi) précédemment décrits ont été appliqués au robot AntBot afin d'être comparés qualitativement et quantitativement.

3.5.2 Protocole expérimental

Chaque mode de navigation a été testé au travers de 5 tâches navigationnelles ainsi décrites : pour chaque tâche, le robot est d'abord placé sur sa position initiale $(0, 0)$ afin de mesurer l'AdP initial Ψ_{init} . Le robot est ensuite déplacé vers une position aléatoire (x_{alea}, y_{alea}) et selon une orientation aléatoire Ψ_{alea} . Les nouvelles coordonnées sont ensuite communiquées au robot qui, après avoir acquis sa nouvelle orientation, détermine son itinéraire pour rejoindre sa position initiale (Eq. 3.8 et 3.9). La procédure de retour décrite en Section 3.4.2 est ensuite exécutée jusqu'au retour du robot. Chaque tâche de navigation correspond à une position (x_{alea}, y_{alea}) différente.

Les expériences menées avec le mode aveugle ont été réalisées dans l'arène de vol, permettant ainsi de bénéficier du système VICON pour l'acquisition de la réalité terrain. Le mode PI-Full a quant à lui été testé aux abords du laboratoire ($43^\circ 14' 02.1''N$, $5^\circ 26' 37.4''E$), en extérieur, du 15 au 25 février 2018 et sous un ciel parfaitement dégagé. D'après l'Agence Spatiale Européenne, l'indice UV est resté stable autour de 1.6 durant toute la période d'expérimentation.

3.5.3 Résultats et conclusions

En utilisant le mode aveugle PI-ST, AntBot subit une erreur de position égale à 124 cm accompagnée d'une forte variabilité de 59 cm (Fig. 3.11A). Cette erreur de navigation chute à seulement $4.8 \text{ cm} \pm 1.8 \text{ cm}$ lorsque le mode utilisé correspond à l'intégrateur de chemin des fourmis du désert PI-Full (Fig. 3.11B,C). Une autre lecture de ces résultats suggère de confronter ce que croit faire le robot et ce qu'il fait réellement. En particulier, l'erreur entre la position finale réelle et celle estimée par l'intégrateur de chemin est considérablement meilleure avec le mode PI-Full (seulement 5.4 cm en moyenne) qu'avec le mode aveugle (120 cm en moyenne), montrant clairement ainsi le besoin d'estimer la dérive subit lors des phases de locomotion. Enfin, on constate que les positions finales d'AntBot (réelles et estimées) se situent toutes à moins de 8.2 cm de la cible, c'est-à-dire à moins d'une foulée.

Ces résultats de retour à la base après un déplacement manuel et aléatoire du robot montrent clairement l'intérêt de l'intégrateur de chemin en mode PI-Full, lequel mime le comportement navigationnel des fourmis *Cataglyphis*. Il reste cependant à déterminer, dans

un contexte de navigation réel incluant un itinéraire aller durant lequel le robot intègrerait ses propres déplacements, quel mode se veut statistiquement optimal, mais également si les résultats sont robustes et fiables, et enfin si les performances dépendent ou non de la trajectoire parcourue dans le sens aller (distance, forme), de la distance à parcourir pour revenir à la base.

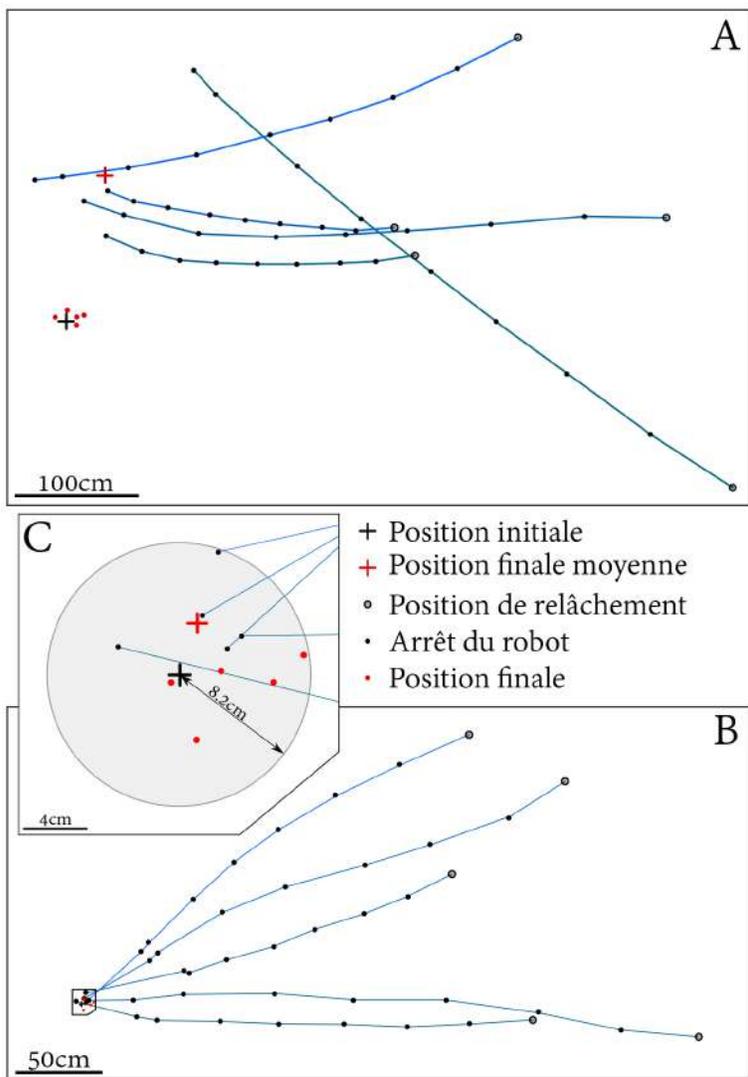


FIGURE 3.11 – Premiers résultats de navigation autonome. **A** Trajectoire de retour d’AntBot en application du mode aveugle (PI-ST) de l’intégrateur de chemin. **B** Trajectoires de retour du robot obtenues avec le mode PI-Full. **C** Vue agrandie des résultats du mode PI-Full. Le cercle de rayon 8.2 cm délimite les positions se situant à moins d’une foulée de la position cible. Les points rouges donnent la position finale du robot donnée par le système de navigation.

3.6 Navigation autonome en conditions extérieures

3.6.1 Les contextes expérimentaux

Les expériences relatées dans cette section 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 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. Tous les modes ne requérant pas l'utilisation du compas céleste ont été testés dans l'arène de vol.

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. 3.9). 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.

3.6.2 Un positionnement centimétrique

3.6.2.1 Résultats

Groupe A. Les résultats sont présentés en figure 3.12. L'erreur médiane maximale a été obtenue avec le mode aveugle PI-ST (7.29% de la distance totale parcourue, voir annexe H), 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 (voir annexes K et L). 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 cm². 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-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. Statistiquement, on constate que les modes PI-ST, PI-OF-ST et PI-Full montrent une distribution normale des erreurs de navigation (tests de normalité de Lilliefors, $p > 0.05$, Fig. 3.12F).

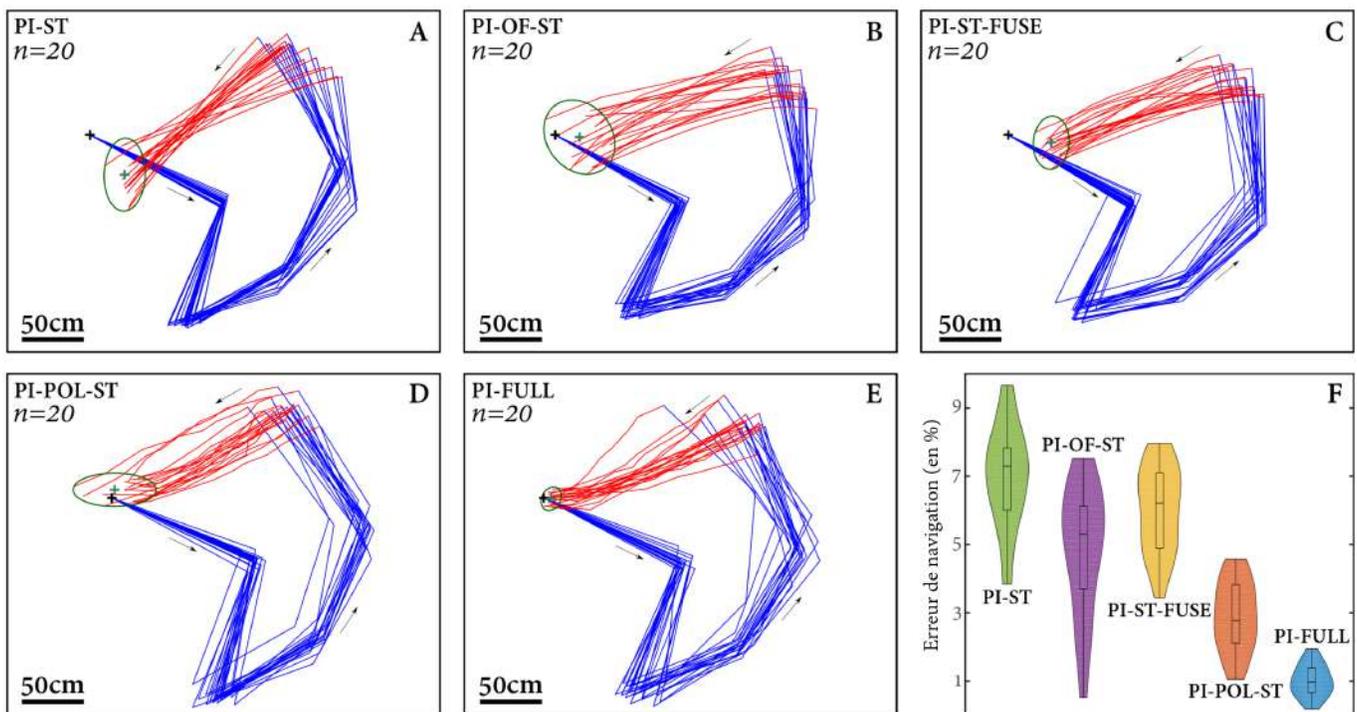


FIGURE 3.12 – Trajectoires de navigation du Groupe A. **A-E** Les phases d'exploration sont tracées en bleu tandis que les trajets de retour sont tracés en rouge. Pour chaque mode testé, on compte $n = 20$ trajectoires. Les croix noires représentent la position de départ ; les croix vertes symbolisent 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.

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 3.13. 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-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. La normalité des distributions des erreurs de navigation pour l'ensemble des modes de navigation est établie (tests de normalité de Lilliefors, $p > 0.05$, Fig. 3.13F).

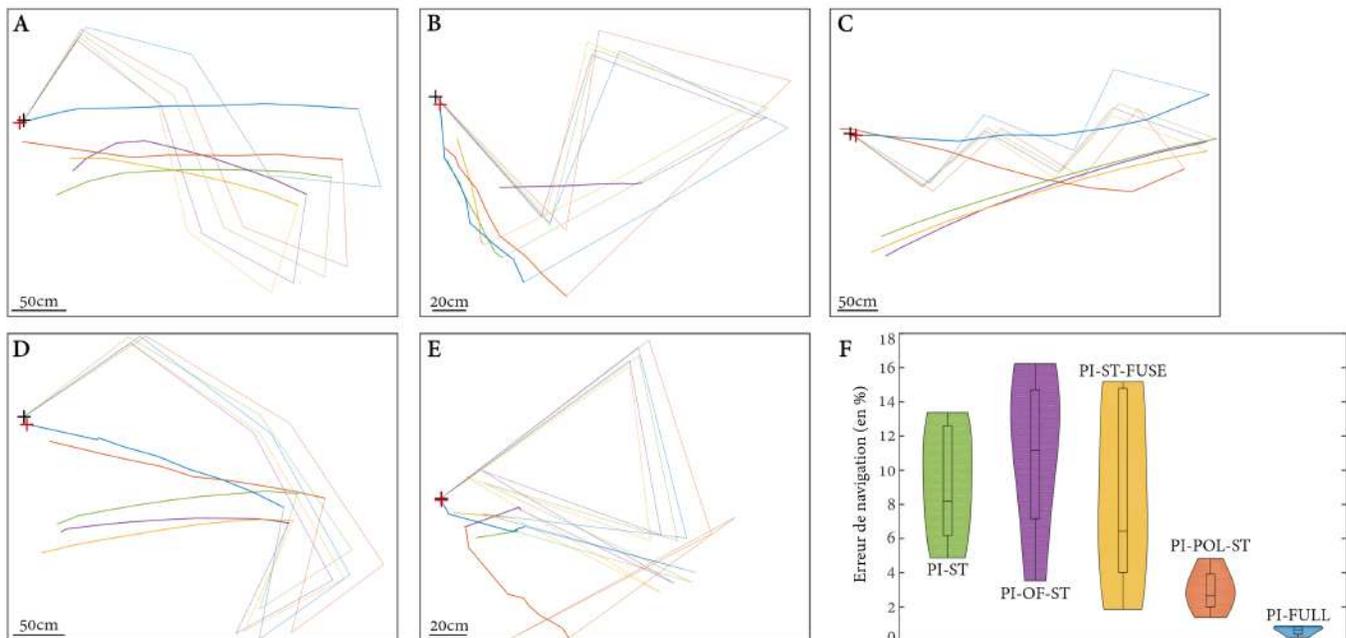


FIGURE 3.13 – Trajectoires de navigation pour des itinéraires aléatoires (Groupe B). **A-E** Les trajectoires aller sont représentées par un trait fin, celles de retour par un trait épais. **F** Diagrammes "en violons" des erreurs de navigation (en % de la distance totale parcourue) pour chaque mode de navigation. Le code couleur des représentations graphiques **A-E** est indiqué par ces diagrammes.

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 en figure 3.14. 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. Ceci 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).

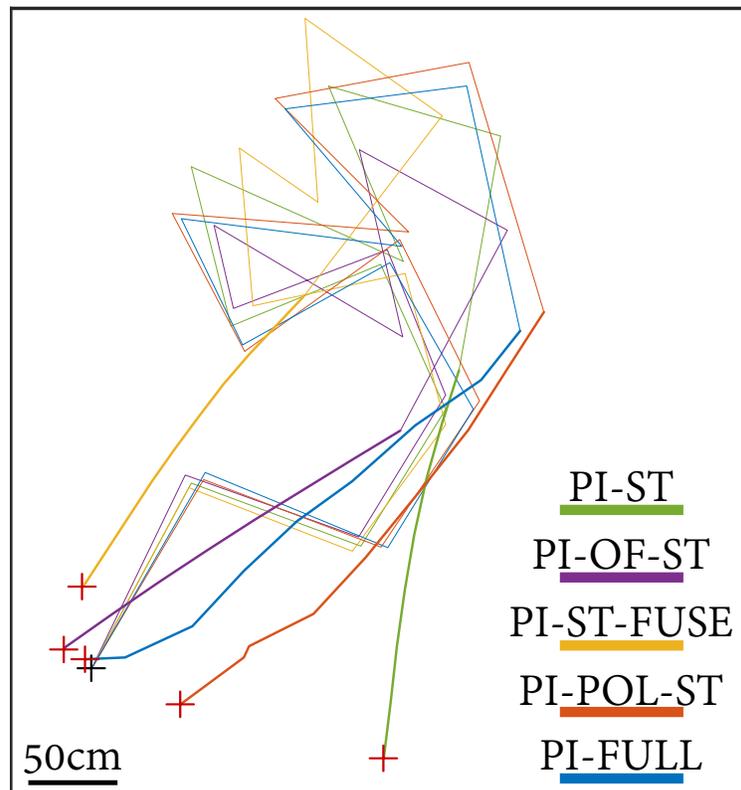


FIGURE 3.14 – Résultats de navigation du Groupe C. La position initiale est marquée d'une croix noire, tandis que les positions finales pour chaque mode de navigation sont données par les croix rouges. Le trajet aller est tracé en traits fins, celle de retour en traits épais.

Les résultats pour chacune des 26 expériences de chaque mode sont répertoriés dans les annexes H à L. Les données de la réalité 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 en figure 3.15. 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.

Mode	Groupe A		Groupe B				Groupe C	Moy.	Ecart	
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 = 26		n = 26

FIGURE 3.15 – 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 : 130 expériences).

3.6.2.2 La distance à l'objectif, 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 $L = 45$ cm de sa cible, alors la navigation était un succès. La figure 3.16 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 $L/2$) et diminue progressivement ensuite. A $L/4 = 11.3$ cm, seul le mode PI-Full permet d'aboutir à plus de 90% de succès de navigation, tous les autres étant en 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. A plus forte raison si l'on tient compte du très faible nombre de pixels embarqués et du faible coût en traitement de l'information.

3.7 Le cas du véhicule intelligent

Les performances remarquables obtenues avec AntBot à l'aide du mode de navigation PI-Full inspiré des fourmis du désert *Cataglyphis* laissent envisager une multitude d'applications autres que celles qui nous motivent au travers de ces travaux de thèse. En particulier, on a pu montrer que le compas céleste constitue un moyen fiable et robuste de déterminer le cap d'un système mobile à des fins d'orientation et de navigation. Aussi, le développement du véhicule autonome pourrait constituer l'une des principales sources d'application de notre compas.

Le compas céleste a été fixé sur le toit d'une voiture (Sirroco, Volkswagen), de même qu'un module GPS (M8P RTK v. XL, Drotek). Le paramétrage du compas céleste a permis d'atteindre une résolution angulaire de 0.96° en seulement 13 secondes. L'ensemble a été utilisé pour mesurer le cap (compas céleste en acquisition continue) et la position du véhicule

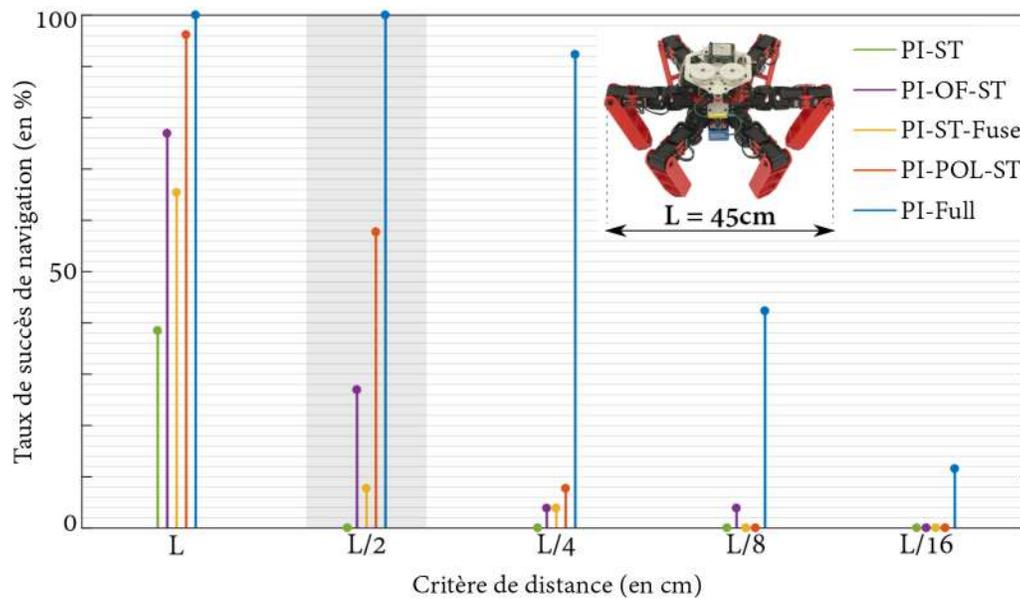


FIGURE 3.16 – Taux de succès de chaque mode de navigation en fonction du critère en distance retenu.

(GPS) sur une trajectoire de 25 km à travers les rues de Marseille, alternant entre zones boisées, d'autres plus urbaines et enfin une section longeant le littoral, sans occlusion visuelle. Le tracé de l'itinéraire est donné en figure 3.17.



FIGURE 3.17 – Trajectoire de comparaison entre les données GPS et celles du compas céleste dans Marseille (environ 25 km parcourus en 1h10).

Le cap du robot déterminé par la boussole céleste est représenté en figure 3.18, et comparé avec le cap donné par le GPS. On peut distinguer plusieurs sections de l'itinéraire sur lesquelles une forte correspondance existe entre les deux informations : sur les zones dénotées 1 et 5, correspondant au trajet réalisé dans le Parc National des Calanques ; sur les zones

2 et 3, correspondant à des trajectoires rectilignes sur de grands boulevards arborés (bd Michelet et bd du Prado) ; sur la zone 4 avec une succession de virages en milieu urbain. Sur ces sections de trajectoire, on observe donc une bonne cohérence entre les deux mesures du cap.

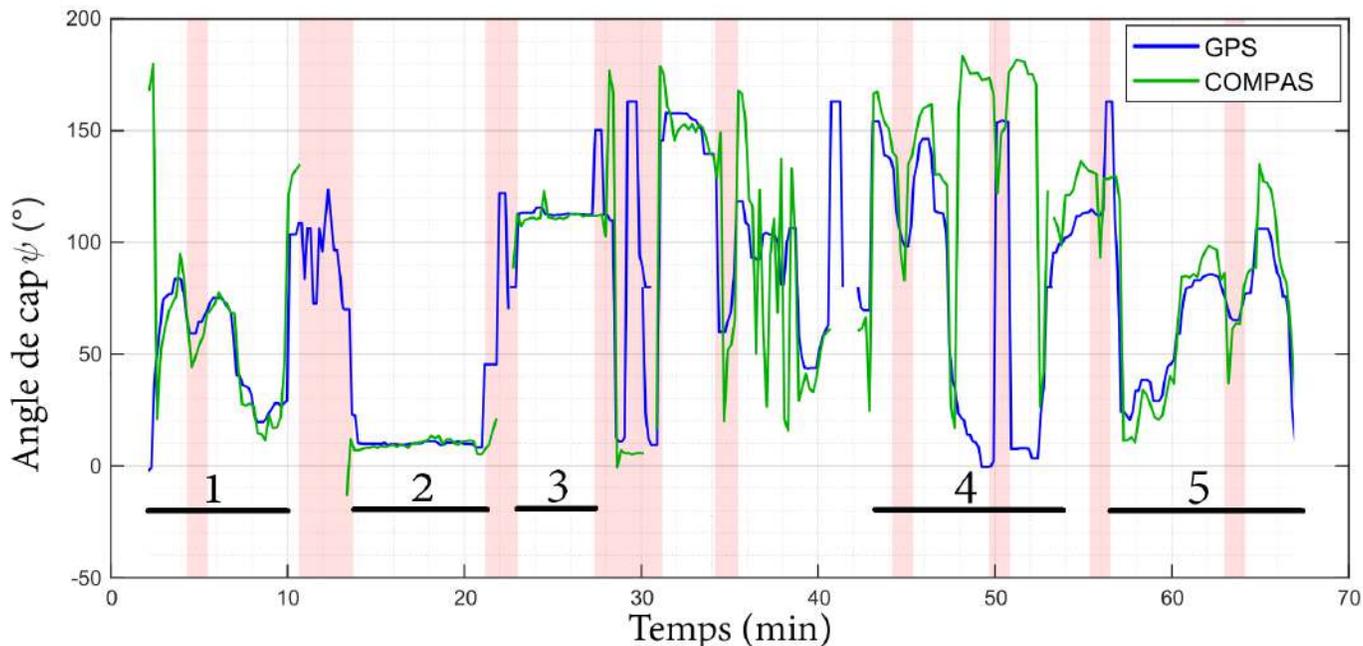


FIGURE 3.18 – Compas céleste (vert) vs. GPS (bleu) en environnement urbain le long d’une trajectoire de 25 km à travers Marseille. Les zones rouges correspondent aux ronds-points.

En particulier, les boulevards Michelet et Prado sont situés perpendiculairement l’un par rapport à l’autre, et ce décalage se retrouve dans les mesures du cap (Fig. 3.19) : le cap mesuré sur l’axe Michelet est de $9.91^\circ \pm 0.67^\circ$ avec le GPS, et de $8.33^\circ \pm 1.74^\circ$ avec la boussole céleste ; ce cap est ensuite évalué sur l’axe Prado à $113.04^\circ \pm 0.98^\circ$ avec le GPS et $111.96^\circ \pm 2.64^\circ$ avec la boussole. Cela correspond donc à une variation de cap céleste de 103.63° contre 103.13° avec le GPS (erreur relative inférieure à 0.5%). Enfin, les sections 1 et 5 correspondent au même trajet pris en sens aller et retour : on retrouve une forte symétrie dans le profil du cap donné par le compas céleste.

Nous pouvons dire que le compas céleste fournit des informations pertinentes en milieux urbains et semi-urbains en comparaison au GPS. Ces résultats sont cependant fortement limités par les éléments suivants : (i) le GPS lui-même ne dispose pas d’une précision suffisante pour permettre de valider celle du compas céleste en conditions réelles à l’échelle urbaine ; (ii) les mesures observées entre les zones 3 et 4 montrent une certaine défaillance dans la détermination du cap lorsque celui-ci varie rapidement. Ce deuxième point est certainement aisément soluble en minimisant la durée d’acquisition du signal.

Dépôt d’un brevet pour le compas céleste embarqué. En partenariat avec le groupe PSA, nous avons déposé un brevet concernant une boussole céleste embarquée sur une voiture (deux configurations d’implantation du capteur sont présentées dans la figure 3.20A). Le brevet concerne une boussole céleste constituée de $N \geq 3$ unités de polarisation, une unité étant définie comme un ensemble de deux photodiodes surmontées chacune par un filtre polarisant dont les orientations sont déphasées de 90° l’une par rapport à l’autre (Fig. 3.20B,C).

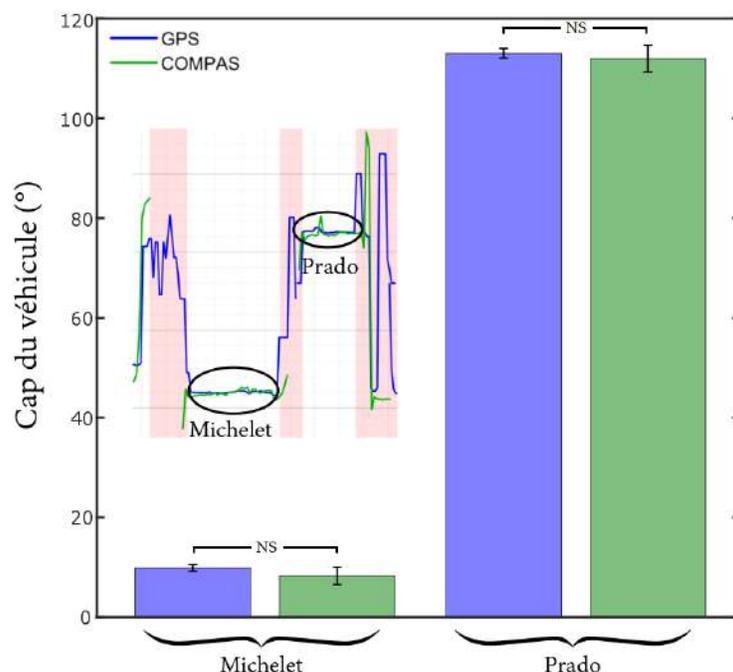


FIGURE 3.19 – Compas céleste (vert) vs. GPS (bleu) sur les axes Michelet (zone 2) et Prado (zone 3).

Le domaine de sensibilité spectral concerné s'étend des UVs aux infrarouges. Le traitement de l'information est analogue à celui introduit par la méthode d'AntBot.

3.8 Conclusions sur l'intégrateur de chemin

Cinq modes de navigation inspirés des fourmis du désert ont été testés à bord du robot AntBot, en intégrant successivement chaque source d'information de façon à reconstruire progressivement l'intégrateur de chemin de ces insectes navigateur : le mode PI-Full. Ce système de navigation requiert deux informations afin de déterminer un vecteur de retour à la base : la direction à suivre et la distance à parcourir. Le compas céleste à 2 pixels a été utilisé pour fournir le cap dont l'ambiguïté solaire, due à la symétrie du motif de polarisation, a été corrigée en considérant l'intégrateur de foulées de rotation et la détection de la position du soleil. La distance parcourue est quant à elle obtenue par fusion des informations de flux optique ventral fourni par le M²APix, un capteur à 12 pixels auto-adaptatifs aux changements de luminosité ambiante, et par le comptage de pas. Ensemble, ces informations ont permis à AntBot de retrouver son chemin avec une erreur de navigation, en pourcentage de la distance totale parcourue, de seulement $0.65\% \pm 0.27\%$. D'autre part, l'erreur commise entre les estimations de positions faites par l'intégrateur de chemin d'AntBot et la localisation fournie par la vérité terrain sont très faible, avec une erreur au sens des moindres carrés de seulement 4.6 cm . Notons par ailleurs que l'erreur de navigation est restée inférieure à la résolution en distance des foulées du robot, quelles que soient les conditions expérimentales. Les conditions expérimentales retenues dans cette étude ont montré la résilience du système de navigation à l'égard de la forme de la trajectoire parcourue, mais aussi de la distance de l'itinéraire. Ces performances suggèrent la possibilité de considérer l'intégrateur de chemin PI-Full dans un contexte de navigation autonome en environnement ouvert, à plus forte raison s'il est combiné

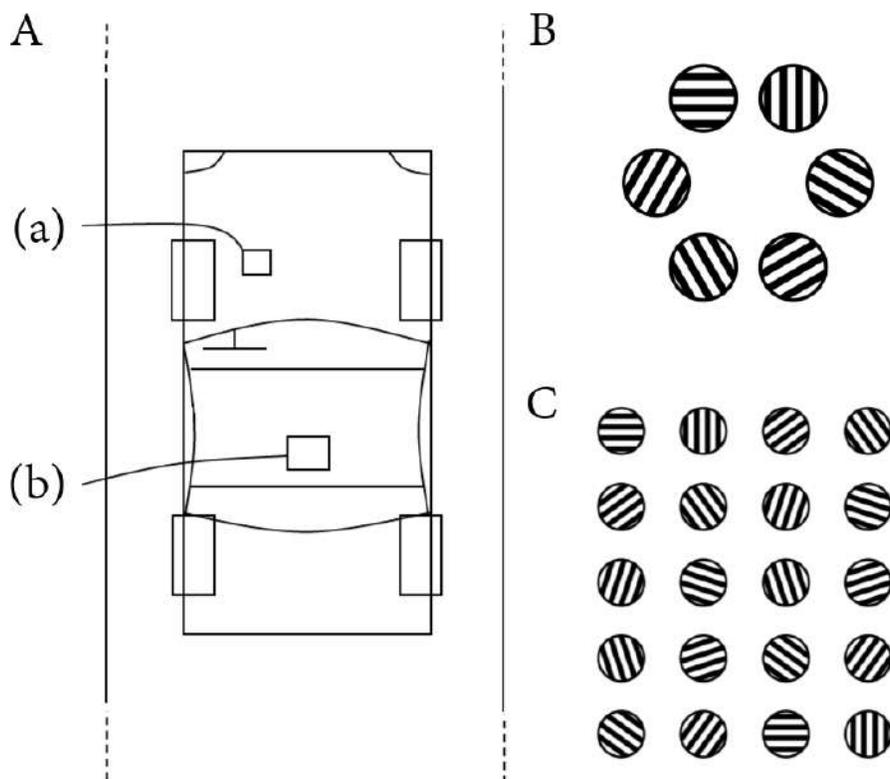


FIGURE 3.20 – Dépôt de brevet - Compas céleste embarqué sur un véhicule. **A** Schéma de principe montrant deux situations possibles (a) et (b), mais non exhaustives, d'implantation de la boussole céleste sur le véhicule. **B,C** Deux exemples de configurations des unités de polarisation et des filtres polarisants considérées dans le brevet.

à d'autres stratégies conventionnelles telles que le GPS, le compas magnétique, les centrales inertielle ou encore la navigation visuelle (SLAM).

La navigation inspirée des fourmis a donné de très bons résultats avec les robots à roues [28, 140]. L'erreur moyenne de navigation la plus basse fût obtenue avec le robot Sahabot 2, mais la variabilité des résultats était plus élevée que celle d'AntBot : Sahabot 2 [140], $13.5 \text{ cm} \pm 6.3 \text{ cm}$ dans le cas d'une trajectoire de 70 m de long (0.19% de la trajectoire totale); Chu et al. [28], 42 cm après une trajectoire de 32 m (soit 1.31%); et AntBot, 6.47 cm après une trajectoire de 14 m (0.46%). Cependant, il n'existe aucune comparaison morphologique possible entre les fourmis et les robots à roues, ces derniers étant avantagés par une tendance à la dérive plus faible. De plus, les perturbations visuelles sont plus importantes chez les fourmis et les robots à pattes que chez les robots à roues : *Cataglyphis* est capable de naviguer rapidement et efficacement en dépit de perturbations en roulis (jusqu'à 10°) et tangage (jusqu'à 60°) de sa tête. On a pu démontrer avec le robot Hexabot que le *firmware* de locomotion produisait des perturbations analogues à celles subies par les fourmis, particulièrement en roulis mais aussi, dans une moindre mesure, en tangage. Les perturbations visuelles perçues par le robot AntBot sont donc *a priori* cohérentes avec ce qui se produit chez les fourmis *Cataglyphis*. Par ailleurs, AntBot est en mesure de se mouvoir sur des terrains plus complexes que les robots à roues comme Sahabot. Tandis que chez la fourmi du désert la distance parcourue peut être fourni par le comptage de pas projeté sur un plan horizontal (proprioception) et par le flux optique ventral généré par le mouvement de l'insecte dans son environnement, les stratégies

utilisées par les robots à roues comme Sahabot 2 utilisent l'odométrie par intégration de la vitesse de rotation des roues. Cette solution est souvent utilisée dans la navigation à l'estime des robots, mais également pour estimer la position d'un véhicule passant sous un tunnel lorsque le signal GPS est perdu. AntBot quant à lui est en mesure de reproduire fidèlement l'odomètre de l'insecte et peut ainsi être utilisé pour mieux comprendre la navigation chez l'animal. On observe d'ailleurs au travers de ces résultats que c'est bien la fusion de l'odométrie par flux optique et du podomètre qui permet d'obtenir la meilleure estimation de distance (modes PI-ST et PI-OF-ST). *In fine*, c'est bien le compas céleste qui s'est avéré décisif dans le succès de la navigation, avec plus de 50% de réussite pour les modes de navigation y faisant référence (PI-POL-ST et PI-Full), tandis que les autres modes n'excèdent pas 25% de réussite. Notons tout de même que si l'on ne considère qu'une seule source d'information odométrique, le flux optique fournit de bien meilleures performances (25%) que le comptage de pas (échec systématique).

En comparant *a posteriori* les performances des systèmes de navigation aveugles à la polarisation, on constate que le mode n'utilisant que du flux optique pour l'estimation de la distance (PI-OF-ST) a surpassé les autres modes (PI-ST et PI-ST-Fuse). Dès lors il apparaît qu'avec le compas céleste, il eut été intéressant de connaître les performances d'un mode PI-POL-OF n'utilisant que le flux optique pour l'odométrie. Théoriquement, si l'on extrapole la répartition des taux de succès en intérieur, ce mode PI-POL-OF aurait pu être plus performant que le mode PI-Full. Le choix de ne pas réaliser les expériences relatives à ce mode de navigation sont avant tout techniques : la mise en œuvre des expérimentations en extérieur fût une tâche très complexe compte tenu des conditions météorologiques hivernales d'une part, et de l'usure importante du robot. Nous avons donc décidé de faire l'impasse sur ce mode de navigation, motivés par le fait que les biologistes semblent davantage sûrs de l'implication du comptage de pas dans l'odomètre de l'insecte qu'ils ne le sont de l'emploi du flux optique seul dans les conditions normales.

Le critère de réussite retenu dans cette étude était la capacité pour le robot à revenir à sa base avec une erreur en distance inférieure ou égale à la moitié de son envergure $L = 45 \text{ cm}$. Du fait de la résolution des foulées du robot (distance et rotation), ce choix est un bon compromis entre les aptitudes locomotrices du robot et son objectif de localisation. Lorsque l'on durcit le critère de succès, on observe que le taux de réussite reste très élevé avec le mode PI-Full ($> 90\%$ à $L/4$, et $\approx 50\%$ à $L/8$ soit 5.6 cm). L'amélioration des performances en navigation à des critères de succès plus sévères implique nécessairement d'augmenter la résolution des foulées du robot. Les distributions des erreurs en distance pour chaque mode de navigation ont été analysées : toutes suivent une loi normale. D'autre part, les distributions des résolutions en distance et en rotation des foulées du robot ne sont pas statistiquement différentes de lois normales. Il semble donc tout à fait envisageable de considérer l'utilisation du filtrage de Kalman pour augmenter les performances et réduire les effets de dérives. Un premier étage de filtrage pourrait en ce sens être utilisé pour estimer les variations des longueurs des pas et tenir compte de la dérive angulaire de $0.12^\circ/\text{pas}$. Un second filtre serait consacré à la correction de l'estimation du navigateur lui-même.

Dans le cadre des expériences de navigation, AntBot marchait à une vitesse de $10 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ sur une distance de 14 m (diamètre du robot : $L = 45 \text{ cm}$). Les fourmis *Cataglyphis fortis* ne mesurent que 1 cm de longueur et peuvent marcher 732.6 m en moins de 30 min comme l'a rapporté R. Wehner dans ses travaux [248]. En conservant les ordres grandeurs, cela signifie qu'AntBot aurait dû parcourir pas moins de 32 km pour pouvoir véritablement valider les

hypothèses biologiques. Ces distances sont naturellement inenvisageables avec AntBot pour le moment. Transposé à la voiture autonome, ce problème reviendrait à vérifier la justesse de l'intégrateur de chemin sur une distance de 380 km, soit la distance entre New-York et Washington DC.

La procédure d'intégration de chemin inspirée des fourmis du désert *Cataglyphis fortis* a été embarquée sur le robot insectoïde AntBot équipé de capteurs parcimonieux et inspirés du système visuel des insectes. Cette stratégie a permis d'aboutir à des résultats très encourageants pour l'avenir de la navigation autonome terrestre. Toutefois, l'erreur finale de positionnement n'existe pas chez les fourmis : elles peuvent en effet utiliser d'autres modes de localisation comme la navigation visuelle (évitement d'obstacles, détection de points d'intérêts, reconnaissance de lieux), mais aussi la mémoire de chemins appris avec l'expérience, ou encore le suivi des traces de CO₂ provenant de l'activité de la fourmilière.

Parmi les pistes de développement à explorer dans la suite de ce projet de recherche, on retrouve avant toute chose l'inclusion de la vision panoramique afin de le rendre plus autonome, capable d'éviter des obstacles fixes ou mobiles, et de mémoriser des scènes clés. Des résultats préliminaires sont présentés en annexe M, introduisant notamment la détection d'obstacles par flux optique et la localisation par comparaison d'images mémorisées. La question du nombre d'images mémorisées et de ce qui génère une nouvelle mémorisation reste ouverte. On peut toutefois imaginer que le robot mémoriserait une nouvelle prise de vue chaque fois que la différence, en pixels, entre l'image courante et la dernière image mémorisée, dépasse un seuil fixe ou modulable. L'intégrateur de chemin serait maintenu actif tout au long de la trajectoire afin de repérer les images mémorisées dans l'espace relatif au point de départ. Toutefois, plusieurs débats subsistent autour de la vision panoramique elle-même. Par exemple, une étude de Ronacher et al. [195] a montré que le flux optique latéral ne semble pas avoir d'incidence sur l'estimation des distances parcourues chez *Cataglyphis fortis*. Le débat subsiste également autour de la représentation de l'environnement chez ces insectes, en particulier au sujet de la question de l'existence de cellules de lieux ou de la construction de cartes cognitives. Enfin, il serait intéressant de développer une véritable proprioception pour le robot afin de lui permettre de déterminer la pente du sol qu'il arpente. Ce dernier point est crucial en ce sens que la version actuelle du système de navigation suppose un sol plat. Pour être parfaitement viable, la distance parcourue doit être projetée sur une surface plane comme cela a été mis en évidence chez les fourmis du désert [254].

Conclusion générale

Contributions

Intégration robotique

Deux robots hexapodes ont été développés : Hexabot (2015-2017, LABRI / ISM - Biorobotique) et AntBot (2017-2019, ISM - Biorobotique). Ces robots se veulent relativement petits et légers, et sont dotés d'une tête articulée en roulis (débattement angulaire : $\pm 20^\circ$). Chaque patte est équipée de 3 servomoteurs Dynamixel (Hexabot : XL-320 ; AntBot : AX-18A). Les deux robots sont également contrôlés par le même micrologiciel de locomotion développé par Grégoire Passault (LABRI) dans le cadre de sa thèse sur les robot Metabot. Ce *firmware* tourne sur une carte OpenCM9.04 compatible Arduino et exclusivement dédiée à la génération de la marche. Hexabot et AntBot sont des projets open-source à bas coût, entièrement reproductibles à l'aide de l'impression 3D.

La tête du robot permet d'embarquer capteurs et électronique. Une carte Raspberry Pi 2B est utilisée pour coordonner le robot (perception et action). Une carte électronique a été réalisée par Marc Boyron (ISM/CNRS) en vue de faciliter l'intégration électronique des composants utilisés (compas céleste, capteur de flux optique, IMU). Un protocole de communication WiFi est utilisé pour dialoguer avec le robot à distance.

Les performances dynamiques des deux robots 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). Par ailleurs, Hexabot atteint une vitesse maximale de $35 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. AntBot quant à lui peut marcher jusqu'à $90 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ sur un sol lisse.

Ces aptitudes remarquables sont toutefois entachées d'une limite d'utilisation : les servomoteurs utilisés sont constitués d'engrenages en plastiques fragiles et une utilisation répétée, comme ce fût le cas avec AntBot, mais aussi une forte charge embarquée (limite d'Hexabot), tendent à réduire la durabilité des actionneurs. De plus, le comportement dynamique est très dépendant de la température, ce qui a eu une double incidence sur les expériences de navigation : influence sur la distance moyenne parcourue par foulée, et risque élevé de mise en sécurité d'un servomoteur (température critique de 70°C).

Perception visuelle

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. Afin de reproduire

l'ensemble de l'aire dorsale marginale de la fourmi, les filtres ont été mis en rotation. On peut alors obtenir la réponse du capteur pour un ensemble de $N = 374$ orientations des filtres. Ainsi, 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. Cette solution permet de bénéficier d'un capteur aux propriétés comparables à l'œil composé de l'insecte tout en réduisant considérablement 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€.

Cinq modèles d'extraction de l'AdP ont été proposés, dont deux sont directement extraits de la littérature : le modèle physique de Stokes [222, 223] et le modèle implémenté sur le robot Sahabot [139, 140]. Les trois modèles suivants sont : (i) le modèle matriciel, directement adapté du modèle de Sahabot ; (ii) le modèle matriciel généralisé, correspondant à une extension du modèle matriciel à l'ordre N ; (iii) le modèle d'AntBot développé pour la navigation du robot éponyme et utilisant une stratégie apparentée au *winner take all* pour déterminer le cap. Ces algorithmes ont été testés sous trois conditions météorologiques : ciel dégagé, ciel variable et ciel couvert. Sous ces trois conditions, le modèle généralisé et surtout le modèle d'AntBot ont montré de remarquables performances avec des erreurs médianes de 0.248° et 0.398° respectivement en cas de ciel dégagé, et 2.858° et 0.598° respectivement en cas de ciel totalement couvert. En particulier, l'erreur médiane de l'algorithme d'AntBot se situe toujours en dessous de la résolution angulaire du compas, égale à 0.968° .

Ainsi, une meilleure précision a pu être atteinte lorsqu'un grand nombre de points de mesure étaient considérés ($N = 374$), tandis que les méthodes n'utilisant que quelques échantillons ont une erreur médiane qui se dégrade rapidement avec les conditions météorologiques. La méthode de Stokes fait cependant exception pour les conditions suivantes : ciel dégagé et ciel variable, avec une erreur médiane là encore inférieure à la résolution angulaire du capteur. Les expériences ainsi décrites furent conduites à toute heure du jour durant une période d'environ six mois, couvrant l'hiver et le printemps 2017. L'indice UV était donc compris entre 1 et 8. La méthode d'AntBot a donc permis de déterminer le cap du robot avec une importante résilience à la couverture nuageuse, à l'indice UV, et à l'heure (i.e. la position du soleil dans la voûte céleste).

Enfin, la boussole céleste a été testée avec le robot Hexabot dans des tâches de réorientation après des perturbations aléatoires en lacet, mais aussi dans une épreuve de maintien de cap sur un sol granuleux, lequel facilitait la dérive du robot. L'erreur angulaire moyenne du robot était de 0.3° sous un ciel dégagé.

Navigation autonome

La navigation autonome en environnement extérieur a été réalisée avec succès à l'aide du robot hexapode AntBot équipé de deux capteurs optiques minimalistes et bio-inspirés comprenant au total 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 résiliente à la forme et à la distance de la trajectoire d'exploration.

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 [44], 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 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.

Conclusion et 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 ultraviolet polarisé. Si l'odométrie par flux optique est un concept déjà bien maîtrisé, le principe de détection de cap par l'observation de la voûte céleste représente quant à elle 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 présenté dans le chapitre 2 sur les diverses implémentations de compas célestes inspirés de l'aire dorsale marginale de l'œil composé des insectes, il ressort que l'exploitation du domaine spectral du 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. 3.2). De nombreuses hypothèses se sont succédées pour expliquer un tel phénomène (voir [250] 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 [40] et confirmées ensuite par M.L. Brines et J.L. Gould [16]. 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 [250].

Espèce	λ_{POL} (en nm)	Référence
<i>Calliphora erythrocephala</i> (mouche)	330-350	[216]
<i>Apis mellifera</i> (abeille)	345-350	[133]
<i>Bombus hortorum</i> (bourdon)	353 et 430	[156]
<i>Cataglyphis bicolor</i> (fourmi du désert)	380-410	[53]
<i>Cataglyphis setipes</i> (fourmi du désert)	380-410	[75]
<i>Lethrus apterus</i> (scarabée)	350	[75]
<i>Pachysoma striatum</i> (bousier du désert)	350	[47]
<i>Drassodes cupreus</i> (arraignée)	350	[46]

TABLEAU 3.2 – Etat de la préférence UV chez certains insectes. La longueur d'onde renseignée ici correspond au maximum de sensibilité dans l'aire dorsale marginale, sensible à la polarisation de la lumière. D'après [250].

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. 2.8). Ainsi, il serait intéressant de développer une version similaire de la boussole céleste développée lors de ce projet doctoral, en incluant notamment des photodiodes supplémentaires sous chaque filtre rotatif et dont la sensibilité spectrale maximale correspondrait au bleu et au vert. Il semble par ailleurs peu judicieux de chercher à observer l'état de la polarisation du ciel dans l'infrarouge au motif que l'activité humaine rayonne principalement dans ce domaine spectral ; l'information serait donc fortement bruitée et altérerait certainement le cap mesuré.

Les applications nocturnes de la boussole céleste n'ont pas pu être examinées durant la thèse du fait de la trop faible luminosité ambiante par rapport à la sensibilité des photodiodes utilisées. 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 [88, 89]. 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 retenu dans ces travaux de thèse est fondé sur une vue de l'esprit formulée par T. Labhart en 1988 d'après ses travaux sur la sauterelle [135]. 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 [123], ou encore le modèle proposé par Gkaniyas et al. [84] et 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 l'abeille peut-elle éviter une feuille lorsqu'elle vole à près de 50 km/h ? 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 durant cette thèse, la confrontation de la vision robotique avec l'approche biologique permet de faire émerger de nouvelles solutions techniques et 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.

Epilogue

Nicolas Franceschini a consacré toute sa carrière à percer les mystères de la vision chez la mouche. En 1979, il créait son équipe de recherche en neurocybernétique après un passage de 14 ans à l'université de Tübingen en Allemagne. Cette équipe, aujourd'hui devenue Biorobotique, s'est notamment intéressé à la compréhension de la vision chez la mouche [72]. Après 20 années de recherche, entre 1989 et 1991, le tout premier robot autonome inspiré de la mouche fût créé. Equipé de 114 détecteurs de mouvement élémentaires, le "Robot-mouche" était capable d'éviter les obstacles en les détectant par flux optique à la manière des mouches [73, 74].

Trente ans après le Robot-mouche, le robot AntBot s'inspire des fourmis du désert à trois niveaux : (i) structurel, avec une morphologie des pattes et un mode de locomotion cohérents avec la fourmi ; (ii) perceptif, en détectant la lumière polarisée en bande UV d'une part, et en mesurant du flux optique ventral d'autre part ; (iii) comportemental, au travers notamment de l'intégrateur de chemin, fil d'Ariane pour l'insecte comme pour le robot [248].

D'aucun pourrait croire que la mouche et la fourmi du désert n'ont que peu de choses en commun, et pourtant ! On observe d'importantes similitudes entre les insectes navigateurs, tant au niveau perceptif (structure de l'œil composé, présence de trois ocelles, vision de la polarisation et du flux optique, très basse résolution) que neuronal (traitement de l'information, organisation corticale, comportement). Par exemple, cette incroyable constance nous a permis d'extrapoler des résultats physiologiques obtenus chez le grillon et chez la drosophile afin d'élaborer et de discuter nos propres modèles de calcul de l'angle de polarisation. Force est de constater qu'en plus d'être biologiquement plausible, notre approche fonctionne.

Tout comme la mouche, l'abeille ou le papillon, la fourmi du désert est une source incroyable d'innovation et d'optimisation. C'est un insecte mesurant moins d'un centimètre et pouvant néanmoins parcourir jusqu'à 100 000 fois sa taille en un temps record de moins de 30 minutes ! Avec une résolution visuelle variant de 5° à 10° , cette fourmi voit 300 fois moins bien qu'un être humain. Cela ne l'empêche pas d'être l'une des meilleures navigatrices au monde. S'en inspirer pour innover et penser nos déplacements de demain était donc une évidence.

La biorobotique est une boucle interactive. Nous utilisons les données amassées par les biologistes durant des années afin d'en extraire de nouvelles manières de percevoir et d'agir. C'est ainsi qu'AntBot a vu le jour, au même titre que le Robot-mouche. Cette stratégie novatrice et non-conventionnelle pourrait à terme fournir une nouvelle source d'information dans la localisation en temps réel de systèmes mobiles (voitures, avions, drones, robots au sol, etc.). Mais AntBot est également un outil fonctionnel offrant un large spectre d'applications dans la vérification des modèles biologiques, et c'est pourquoi nous souhaitons que les biologistes s'approprient un jour ce petit robot pour tester leurs hypothèses.

Bibliographie

- [1] J. AKIZONO, T. TANAKA, K. NAKAGAWA, T. TSUJI et M. IWASAKI, « Seabottom roughness measurement by aquatic walking robot », in *OCEANS'97. MTS/IEEE Conference Proceedings*, IEEE, t. 2, 1997, p. 1395–1398.
- [2] T. J. ALLEN, R. D. QUINN, R. J. BACHMANN et R. E. RITZMANN, « Abstracted biological principles applied with reduced actuation improve mobility of legged vehicles », in *Intelligent Robots and Systems, 2003.(IROS 2003). Proceedings. 2003 IEEE/RSJ International Conference on*, IEEE, t. 2, 2003, p. 1370–1375. DOI : 10.1109/IROS.2003.1248835.
- [3] C. ANGLE et R. BROOKS, « Small planetary rovers », in *Intelligent Robots and Systems' 90.'Towards a New Frontier of Applications', Proceedings. IROS'90. IEEE International Workshop on*, IEEE, 1990, p. 383–388.
- [4] S. AXEL, P. JAN, S. MALTE et S. JOSEF, « Hector, a bio-inspired and compliant hexapod robot », in *Biomimetic and Biohybrid Systems*, N. F. DUFF Armin and Lepora, A. MURA, T. J. PRESCOTT et P. F. M. J. VERSCHURE, édcs., Cham : Springer International Publishing, 2014, p. 427–429, ISBN : 978-3-319-09435-9. DOI : 10.1007/978-3-319-09435-9_51.
- [5] T. M. AYCOCK, D. B. CHENAULT, A. LOMPADO et J. L. PEZZANITI, *Sky polarization and sun sensor system and method*, US Patent 9,989,625, 2018.
- [6] J. BARES, M. HEBERT, T. KANADE, E. KROTKOV, T. MITCHELL, R. SIMMONS et W. WHITTAKER, « Ambler : an autonomous rover for planetary exploration », *Computer*, t. 22, n° 6, p. 18–26, juin 1989, ISSN : 0018-9162. DOI : 10.1109/2.30717.
- [7] D. BARNES, « Hexapodal robot locomotion over uneven terrain », in *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Control Application*, t. 1, 1998, p. 441–445.
- [8] T. BARTHOLET, « The first functionoid developed by odetics inc », in *Proc. ICAR Symp., Tokyo, Japan*, 1983, p. 293.
- [9] M. BECH, U. HOMBERG et K. PFEIFFER, « Receptive fields of locust brain neurons are matched to polarization patterns of the sky », *Current Biology*, t. 24, n° 18, p. 2124–2129, 2014, ISSN : 0960-9822. DOI : 10.1016/j.cub.2014.07.045.
- [10] R. BERNER, C. BRANDLI, M. YANG, S.-C. LIU et T. DELBRUCK, « A 240x180 10mw 12us latency sparse-output vision sensor for mobile applications », in *VLSI Circuits (VLSIC), 2013 Symposium on*, IEEE, 2013, p. C186–C187.

- [11] K. BERNS, S. CORDES et W. ILG, « Adaptive, neural control architecture for the walking machine lauron », in *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'94)*, sept. 1994, 1172–1177 vol.2. DOI : 10.1109/IROS.1994.407466.
- [12] M. BLOSCH, S. WEISS, D. SCARAMUZZA et R. SIEGWART, « Vision based mav navigation in unknown and unstructured environments », in *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, mai 2010, p. 21–28. DOI : 10.1109/ROBOT.2010.5509920.
- [13] K. A. BOAHEN et A. G. ANDREOU, « A contrast sensitive silicon retina with reciprocal synapses », in *Advances in neural information processing systems*, 1992, p. 764–772.
- [14] F. BONIN-FONT, A. ORTIZ et G. OLIVER, « Visual navigation for mobile robots : a survey », *Journal of intelligent and robotic systems*, t. 53, n° 3, p. 263–296, 2008.
- [15] R. BOULAY, S. ARON, X. CERDÁ, C. DOUMS, P. GRAHAM, A. HEFETZ et T. MONNIN, « Social life in arid environments : the case study of cataglyphis ants », *Annual review of entomology*, t. 62, p. 305–321, 2017.
- [16] M. L. BRINES et J. L. GOULD, « Skylight polarization patterns and animal orientation », *Journal of Experimental Biology*, t. 96, n° 1, p. 69–91, 1982.
- [17] R. A. BROOKS, « A robot that walks ; emergent behaviors from a carefully evolved network », *Neural computation*, t. 1, n° 2, p. 253–262, 1989.
- [18] C. BUEHLMANN, P. GRAHAM, B. S. HANSSON et M. KNADEN, « Desert ants locate food by combining high sensitivity to food odors with extensive crosswind runs », *Current Biology*, t. 24, n° 9, p. 960–964, 2014, ISSN : 0960-9822. DOI : 10.1016/j.cub.2014.02.056.
- [19] —, « Desert ants use olfactory scenes for navigation », *Animal Behaviour*, t. 106, p. 99–105, 2015, ISSN : 0003-3472. DOI : 10.1016/j.anbehav.2015.04.029.
- [20] C. BUEHLMANN, B. S. HANSSON et M. KNADEN, « Path integration controls nest-plume following in desert ants », *Current Biology*, t. 22, n° 7, p. 645–649, 2012, ISSN : 0960-9822. DOI : 10.1016/j.cub.2012.02.029.
- [21] S. BURDEN, J. CLARK, J. WEINGARTEN, H. KOMSUOGLU et D. KODITSCHKEK, « Heterogeneous leg stiffness and roll in dynamic running », in *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on*, IEEE, 2007, p. 4645–4652. DOI : 10.1109/ROBOT.2007.364195.
- [22] Y. CAMLITEPE et V. AKSOY, « First evidence of fine colour discrimination ability in ants (hymenoptera, formicidae) », *Journal of Experimental Biology*, t. 213, n° 1, p. 72–77, 2010, ISSN : 0022-0949. DOI : 10.1242/jeb.037853.
- [23] N. CAREY et W. STÜRZL, « 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. DOI : 10.1109/ICCVW.2011.6130258.
- [24] J. CHAHL et A. MIZUTANI, « Biomimetic attitude and orientation sensors », *IEEE Sensors Journal*, t. 12, n° 2, p. 289–297, 2012. DOI : 10.1109/JSEN.2010.2078806.

- [25] B. CHANDRASEKARAN, *Intelligence as adaptive behavior : an experiment in computational neuroethology*. Academic Press, 2013, t. 6.
- [26] Y. CHENG, J. CAO, Y. ZHANG et Q. HAO, « Review of state-of-the-art artificial compound eye imaging systems », *Bioinspiration & Biomimetics*, t. 14, n° 3, p. 031 002, fév. 2019. DOI : 10.1088/1748-3190/aaffb5.
- [27] C.-P. CHOU et B. HANNAFORD, « Measurement and modeling of mckibben pneumatic artificial muscles », *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, t. 12, n° 1, p. 90–102, fév. 1996, ISSN : 1042-296X. DOI : 10.1109/70.481753.
- [28] J. CHU, H. WANG, ². CHEN et R. LI, « 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.
- [29] J. CHU, K. ZHAO, Q. ZHANG et T. WANG, « Design of a novel polarization sensor for navigation », in *Mechatronics and Automation, 2007. ICMA 2007. International Conference on*, IEEE, 2007, p. 3161–3166.
- [30] —, « Construction and performance test of a novel polarization sensor for navigation », *Sensors and Actuators A : Physical*, t. 148, n° 1, p. 75–82, 2008.
- [31] J. CHU, Z. WANG, L. GUAN, Z. LIU, Y. WANG et R. ZHANG, « Integrated polarization dependent photodetector and its application for polarization navigation », *IEEE Photonics Technol. Lett*, t. 26, n° 5, p. 469–472, 2014. DOI : 10.1109/LPT.2013.2296945.
- [32] M. COLLETT et T. S. COLLETT, « How do insects use path integration for their navigation? », *Biological Cybernetics*, t. 83, n° 3, p. 245–259, août 2000, ISSN : 1432-0770. DOI : 10.1007/s004220000168.
- [33] M. COLLETT, T. S. COLLETT, S. BISCH et R. WEHNER, « Local and global vectors in desert ant navigation », *Nature*, t. 394, n° 6690, p. 269, 1998. DOI : 10.1038/28378.
- [34] T. S. COLLETT et J. ZEIL, « The selection and use of landmarks by insects », in *Orientation and Communication in Arthropods*, M. LEHRER, éd. Basel : Birkhäuser Basel, 1997, p. 41–65, ISBN : 978-3-0348-8878-3. DOI : 10.1007/978-3-0348-8878-3_2.
- [35] T. S. COLLETT et J. ZEIL, « Places and landmarks : an arthropod perspective. », 1998.
- [36] S. COLLINS, A. RUINA, R. TEDRAKE et M. WISSE, « Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walkers », *Science*, t. 307, n° 5712, p. 1082–1085, 2005. DOI : 10.1126/science.1107799.
- [37] S. H. COLLINS et A. RUINA, « A bipedal walking robot with efficient and human-like gait », in *Proceedings of the 2005 IEEE international conference on robotics and automation*, IEEE, 2005, p. 1983–1988. DOI : 10.1109/ROBOT.2005.1570404.
- [38] F. COLONNIER, A. MANECY, R. JUSTON, H. MALLOT, R. LEITEL, D. FLOREANO et S. VIOLLET, « A small-scale hyperacute compound eye featuring active eye tremor : application to visual stabilization, target tracking, and short-range odometry », *Bioinspiration & biomimetics*, t. 10, n° 2, p. 026 002, 2015. DOI : 10.1088/1748-3190/10/2/026002.
- [39] S. CORDES, K. BERNS et I. LEPPANEN, « Sensor components of the six-legged walking machine lauron ii », in *1997 8th International Conference on Advanced Robotics. Proceedings. ICAR'97*, juil. 1997, p. 71–76. DOI : 10.1109/ICAR.1997.620164.

- [40] K. L. COULSON, *Polarization and intensity of light in the atmosphere*. A Deepak Pub, 1988.
- [41] K. COULSON, « Characteristics of the radiation emerging from the top of a rayleigh atmosphere—i : intensity and polarization », *Planetary and Space Science*, t. 1, n° 4, p. 265–276, 1959. DOI : 10.1016/0032-0633(59)90031-5.
- [42] T. W. CRONIN et J. MARSHALL, « Patterns and properties of polarized light in air and water », *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, t. 366, n° 1565, p. 619–626, 2011. DOI : 10.1098/rstb.2010.0201.
- [43] H. CRUSE, « What mechanisms coordinate leg movement in walking arthropods? », *Trends in Neurosciences*, t. 13, n° 1, p. 15–21, 1990, ISSN : 0166-2236. DOI : 10.1016/0166-2236(90)90057-H.
- [44] A. CULLY, J. CLUNE, D. TARAPORE et J.-B. MOURET, « Robots that can adapt like animals », *Nature*, t. 521, n° 7553, p. 503, 2015. DOI : 10.1038/nature14422.
- [45] M. DACKE, B. el JUNDI, J. SMOLKA, M. BYRNE et E. BAIRD, « The role of the sun in the celestial compass of dung beetles », *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, t. 369, n° 1636, p. 20 130 036, 2014. DOI : 10.1098/rstb.2013.0036.
- [46] M. DACKE, D.-E. NILSSON, E. WARRANT, A. BLEST, M. LAND et D. O'CARROLL, « Built-in polarizers form part of a compass organ in spiders », *Nature*, t. 401, n° 6752, p. 470, 1999. DOI : 10.1038/46773.
- [47] M. DACKE, P. NORDSTRÖM, C. SCHOLTZ et E. WARRANT, « A specialized dorsal rim area for polarized light detection in the compound eye of the scarab beetle *pachysoma striatum* », *Journal of Comparative Physiology A*, t. 188, n° 3, p. 211–216, avr. 2002, ISSN : 1432-1351. DOI : 10.1007/s00359-002-0295-9.
- [48] M. DACKE, M. J. BYRNE, C. H. SCHOLTZ et E. J. WARRANT, « Lunar orientation in a beetle », *Proceedings of the Royal Society of London. Series B : Biological Sciences*, t. 271, n° 1537, p. 361–365, 2004. DOI : 10.1098/rspb.2003.2594.
- [49] M. DACKE et B. el JUNDI, « The dung beetle compass », *Current Biology*, t. 28, n° 17, R993–R997, 2018, ISSN : 0960-9822. DOI : 10.1016/j.cub.2018.04.052.
- [50] M. DACKE, D.-E. NILSSON, C. H. SCHOLTZ, M. BYRNE et E. J. WARRANT, « Animal behaviour : insect orientation to polarized moonlight », *Nature*, t. 424, n° 6944, p. 33, 2003. DOI : 10.1038/424033a.
- [51] E. DEVJANIN, V. GURFINKEL, E. GURFINKEL, V. KARTASHEV, A. LENSKY, A. Y. SHNEIDER et L. SHTILMAN, « The six-legged walking robot capable of terrain adaptation », *Mechanism and Machine Theory*, t. 18, n° 4, p. 257–260, 1983.
- [52] C. DING et D. TAO, « A comprehensive survey on pose-invariant face recognition », *ACM Transactions on intelligent systems and technology (TIST)*, t. 7, n° 3, p. 37, 2016.
- [53] P. DUELLI et R. WEHNER, « The spectral sensitivity of polarized light orientation in *cataglyphis bicolor* (formicidae, hymenoptera) », *Journal of Comparative Physiology A*, t. 86, n° 1, p. 37–53, mar. 1973, ISSN : 1432-1351. DOI : 10.1007/BF00694476.

- [54] J. DUPEYROUX, V. BOUTIN, J. R. SERRES, L. U. PERRINET et S. VIOLLET, « M²apix : a bio-inspired auto-adaptive visual sensor for robust ground height estimation », in *2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, mai 2018, p. 1–4. DOI : 10.1109/ISCAS.2018.8351433.
- [55] J. DUPEYROUX, J. DIPERI, M. BOYRON, S. VIOLLET et J. SERRES, « A bio-inspired celestial compass applied to an ant-inspired robot for autonomous navigation », in *2017 European Conference on Mobile Robots (ECMR)*, sept. 2017, p. 1–6. DOI : 10.1109/ECMR.2017.8098680.
- [56] —, « A novel insect-inspired optical compass sensor for a hexapod walking robot », in *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, sept. 2017, p. 3439–3445. DOI : 10.1109/IROS.2017.8206183.
- [57] F. C. DYER et J. A. DICKINSON, « Development of sun compensation by honeybees : how partially experienced bees estimate the sun’s course », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, t. 91, n° 10, p. 4471–4474, 1994, ISSN : 0027-8424. DOI : 10.1073/pnas.91.10.4471.
- [58] S. DZHANTIMIROV, F. PALIS, U. SCHMUCKER, A. TELESCH et Y. ZAVGORODNIY, « Hil/sil by development of six-legged robot slair2 », in *Advances in climbing and walking robots*, World Scientific, 2007, p. 652–661. DOI : 10.1142/9789812770189_0075.
- [59] W. EDRICH, C. NEUMEYER et O. von HEIVERSEN, « “anti-sun orientation” of bees with regard to a field of ultraviolet light », *Journal of comparative physiology*, t. 134, n° 2, p. 151–157, juin 1979, ISSN : 1432-1351. DOI : 10.1007/BF00610473.
- [60] K. S. ESPENSCHIED, R. D. QUINN, R. D. BEER et H. J. CHIEL, « Biologically based distributed control and local reflexes improve rough terrain locomotion in a hexapod robot », *Robotics and Autonomous Systems*, t. 18, n° 1, p. 59–64, 1996, ISSN : 0921-8890. DOI : 10.1016/0921-8890(96)00003-6.
- [61] S. EXNER, *Die physiologie der facettirten augen von krebse und insecten : eine studie*. Franz Deuticke, 1891.
- [62] F. EXPERT et F. RUFFIER, « Flying over uneven moving terrain based on optic-flow cues without any need for reference frames or accelerometers », *Bioinspiration & biomimetics*, t. 10, n° 2, p. 026 003, 2015. DOI : 10.1088/1748-3182/10/2/026003.
- [63] M. FALLON, « Accurate and robust localization for walking robots fusing kinematics, inertial, vision and lidar », *Interface Focus*, t. 8, n° 4, 2018, ISSN : 2042-8898. DOI : 10.1098/rsfs.2018.0015.
- [64] C. FAN, X. HU, X. HE, L. ZHANG et J. LIAN, « Integrated polarized skylight sensor and mimu with a metric map for urban ground navigation », *IEEE Sensors Journal*, t. 18, n° 4, p. 1714–1722, fév. 2018, ISSN : 1530-437X. DOI : 10.1109/JSEN.2017.2786404.
- [65] C. FAN, X. HU, J. LIAN, L. ZHANG et X. HE, « Design and calibration of a novel camera-based bio-inspired polarization navigation sensor », *IEEE Sensors Journal*, t. 16, n° 10, p. 3640–3648, 2016. DOI : 10.1109/JSEN.2016.2533628.
- [66] K. FARROW, J. HAAG et A. BORST, « Nonlinear, binocular interactions underlying flow field selectivity of a motion-sensitive neuron », *Nature neuroscience*, t. 9, n° 10, p. 1312, 2006. DOI : 10.1038/nn1769.

- [67] C. FERRELL, « Failure recognition and fault tolerance of an autonomous robot », *Adaptive behavior*, t. 2, n° 4, p. 375–398, 1994. DOI : 10.1177/105971239400200403.
- [68] —, « Robust and adaptive locomotion of an autonomous hexapod », in *From Perception to Action Conference, 1994., Proceedings*, IEEE, 1994, p. 66–77. DOI : 10.1109/FPA.1994.636083.
- [69] —, « A comparison of three insect-inspired locomotion controllers », *Robotics and autonomous systems*, t. 16, n° 2, p. 135–159, 1995. DOI : 10.1016/0921-8890(95)00147-6.
- [70] P. N. FLEISCHMANN, R. GROB, V. L. MÜLLER, R. WEHNER et W. RÖSSLER, « The geomagnetic field is a compass cue in cataglyphis ant navigation », *Current Biology*, t. 28, n° 9, p. 1440–1444, 2018. DOI : 10.1016/j.cub.2018.03.043.
- [71] D. FLOREANO, R. PERICET-CAMARA, S. VIOLLET, F. RUFFIER, A. BRÜCKNER, R. LEITEL, W. BUSS, M. MENOUNI, F. EXPERT, R. JUSTON, M. K. DOBRZYNSKI, G. L'ÉPLAT-TENIER, F. RECKTENWALD, H. A. MALLOT et N. FRANCESCHINI, « Miniature curved artificial compound eyes », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, t. 110, n° 23, p. 9267–9272, 2013, ISSN : 0027-8424. DOI : 10.1073/pnas.1219068110.
- [72] N. FRANCESCHINI, « Small brains, smart machines : from fly vision to robot vision and back again », *Proceedings of the IEEE*, t. 102, n° 5, p. 751–781, mai 2014, ISSN : 0018-9219. DOI : 10.1109/JPROC.2014.2312916.
- [73] N. FRANCESCHINI, J. M. PICHON, C. BLANES, J. M. BRADY, H. B. BARLOW, J. P. FRISBY, G. A. HORRIDGE et M. A. JEEVES, « From insect vision to robot vision », *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B : Biological Sciences*, t. 337, n° 1281, p. 283–294, 1992. DOI : 10.1098/rstb.1992.0106.
- [74] N. FRANCESCHINI, J. PICHON et C. BLANES, « Bionics of visuo-motor control », *Evolutionary Robotics : From Intelligent Robots to Artificial Life*, p. 49–67, 1997.
- [75] L. FRANTSEVICH, V. ZOLOTOV, F. GRIBAKIN, A. POLIANOVSKI et V. GOVARDOVSKI, « Polarotaxis in beetles of genus lethrus (coleoptera, scarabaeidae) in different spectral regions », *Doklady Akademii nauk SSSR*, t. 226, n° 3, p. 733, 1976.
- [76] M. O. FRANZ, B. SCHÖLKOPF, H. A. MALLOT et H. H. BÜLTHOFF, « Where did i take that snapshot? scene-based homing by image matching », *Biological Cybernetics*, t. 79, n° 3, p. 191–202, oct. 1998, ISSN : 1432-0770. DOI : 10.1007/s004220050470.
- [77] K. v. FRISCH, « Die polarisation des himmelslichtes als orientierender faktor bei den tänzen der bienen », *Experientia*, t. 5, n° 4, p. 142–148, avr. 1949, ISSN : 1420-9071. DOI : 10.1007/BF02174424.
- [78] J. GÁL, G. HORVÁTH, A. BARTA et R. WEHNER, « 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*, t. 106, n° D19, p. 22 647–22 653, 2001. DOI : 10.1029/2000JD000085.
- [79] M. GARCIA, C. EDMISTON, R. MARINOV, A. VAIL et V. GRUEV, « Bio-inspired color-polarization imager for real-time in situ imaging », *Optica*, t. 4, n° 10, p. 1263–1271, 2017. DOI : 10.1364/OPTICA.4.001263.

- [80] B. GASSMANN, K. SCHOLL et K. BERNIS, « Behavior control of lauron iii for walking in unstructured terrain », in *Proc Intl Conf on Climbing and Walking Robots (CLAWAR'01), Karlsruhe, Germany, 2001*, p. 651–8.
- [81] A. GEIGER, P. LENZ et R. URTASUN, « Are we ready for autonomous driving? the kitti vision benchmark suite », in *2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, juin 2012, p. 3354–3361. DOI : 10.1109/CVPR.2012.6248074.
- [82] J. J. GIBSON, « The senses considered as perceptual systems. », 1966.
- [83] M. GIURFA et E. A. CAPALDI, « Vectors, routes and maps : new discoveries about navigation in insects », *Trends in neurosciences*, t. 22, n° 6, p. 237–242, 1999. DOI : 10.1016/S0166-2236(99)01406-X.
- [84] E. GKANIAS, B. RISSE, M. MANGAN et B. WEBB, « From skylight input to behavioural output : a computational model of the insect polarised light compass », *PLoS computational biology*, 2019.
- [85] R. GOULARD, J.-L. VERCHER et S. VIOLLET, « To crash or not to crash : how do hoverflies cope with free-fall situations and weightlessness? », *Journal of Experimental Biology*, t. 219, n° 16, p. 2497–2503, 2016, ISSN : 0022-0949. DOI : 10.1242/jeb.141150.
- [86] —, « Modeling visual-based pitch, lift and speed control strategies in hoverflies », *PLoS computational biology*, t. 14, n° 1, e1005894, 2018. DOI : 10.1371/journal.pcbi.1005894.
- [87] P. GRAHAM et K. CHENG, « Ants use the panoramic skyline as a visual cue during navigation », *Current Biology*, t. 19, n° 20, R935–R937, 2009, ISSN : 0960-9822. DOI : 10.1016/j.cub.2009.08.015.
- [88] B. GREINER, T. W. CRONIN, W. A. RIBI, W. T. WCISLO et E. J. WARRANT, « Anatomical and physiological evidence for polarisation vision in the nocturnal bee megalopta genalis », *Journal of Comparative Physiology A*, t. 193, n° 6, p. 591–600, juin 2007, ISSN : 1432-1351. DOI : 10.1007/s00359-007-0214-1.
- [89] B. GREINER, W. A. RIBI et E. J. WARRANT, « Retinal and optical adaptations for nocturnal vision in the halictid bee megalopta genalis », *Cell and Tissue Research*, t. 316, n° 3, p. 377–390, juin 2004, ISSN : 1432-0878. DOI : 10.1007/s00441-004-0883-9.
- [90] V. GURFINKEL, E. GURFINKEL, A. Y. SHNEIDER, E. DEVJANIN, A. LENSKY et L. SHTILMAN, « Walking robot with supervisory control », *Mechanism and Machine Theory*, t. 16, n° 1, p. 31–36, 1981.
- [91] Y. HAM, K. K. HAN, J. J. LIN et M. GOLPARVAR-FARD, « Visual monitoring of civil infrastructure systems via camera-equipped unmanned aerial vehicles (uavs) : a review of related works », *Visualization in Engineering*, t. 4, n° 1, p. 1, jan. 2016, ISSN : 2213-7459. DOI : 10.1186/s40327-015-0029-z.
- [92] G. HAN, X. HU, J. LIAN, X. HE, L. ZHANG, Y. WANG et F. DONG, « Design and calibration of a novel bio-inspired pixelated polarized light compass », *Sensors*, t. 17, n° 11, p. 2623, 2017. DOI : 10.3390/s17112623.

- [93] B. HASSENSTEIN et W. REICHARDT, « Systemtheoretische analyse der zeit-, reihenfolgen- und vorzeichenbewertung bei der bewegungsperzeption des rüsselkäfers chlorophanus », *Zeitschrift für Naturforschung B*, t. 11, n° 9-10, p. 513–524, 1956. DOI : 10.1515/znb-1956-9-1004.
- [94] S. HEINZE, « Polarized-light processing in insect brains : recent insights from the desert locust, the monarch butterfly, the cricket, and the fruit fly », in *Polarized Light and Polarization Vision in Animal Sciences*, G. HORVÁTH, éd. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2014, p. 61–111, ISBN : 978-3-642-54718-8. DOI : 10.1007/978-3-642-54718-8_4.
- [95] S. HEINZE, J. FLORMAN, S. ASOKARAJ, B. el JUNDI et S. M. REPERT, « Anatomical basis of sun compass navigation ii : the neuronal composition of the central complex of the monarch butterfly », *Journal of Comparative Neurology*, t. 521, n° 2, p. 267–298, 2013. DOI : 10.1002/cne.23214.
- [96] S. HEINZE et U. HOMBERG, « Maplike representation of celestial e-vector orientations in the brain of an insect », *Science*, t. 315, n° 5814, p. 995–997, 2007, ISSN : 0036-8075. DOI : 10.1126/science.1135531.
- [97] —, « Neuroarchitecture of the central complex of the desert locust : intrinsic and columnar neurons », *Journal of Comparative Neurology*, t. 511, n° 4, p. 454–478, 2008. DOI : 10.1002/cne.21842.
- [98] —, « Linking the input to the output : new sets of neurons complement the polarization vision network in the locust central complex », *Journal of Neuroscience*, t. 29, n° 15, p. 4911–4921, 2009. DOI : 10.1523/JNEUROSCI.0332-09.2009.
- [99] S. HEINZE, A. NARENDRA et A. CHEUNG, « Principles of insect path integration », *Current Biology*, t. 28, n° 17, R1043–R1058, sept. 2018. DOI : 10.1016/j.cub.2018.04.058.
- [100] S. HEINZE et S. M. REPERT, « Sun compass integration of skylight cues in migratory monarch butterflies », *Neuron*, t. 69, n° 2, p. 345–358, 2011, ISSN : 0896-6273. DOI : 10.1016/j.neuron.2010.12.025.
- [101] H. v. HELMHOLTZ, « The perceptions of vision », *Treatise on Physiological Optics*, t. 3, 1925.
- [102] H. von HELMHOLTZ et J. P. C. SOUTHALL, *Treatise on physiological optics*. Courier Corporation, 2005, t. 3.
- [103] L. HENG, D. HONEGGER, G. H. LEE, L. MEIER, P. TANSKANEN, F. FRAUNDORFER et M. POLLEFEYS, « Autonomous visual mapping and exploration with a micro aerial vehicle », *Journal of Field Robotics*, t. 31, n° 4, p. 654–675, 2014. DOI : 10.1002/rob.21520.
- [104] G. HEPPNER, A. ROENNAU, J. OBERLÄNDER, S. KLEMM et R. DILLMANN, « Laurope-six legged walking robot for planetary exploration participating in the spacebot cup », *WS on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation*, 2015.
- [105] D. HERZMANN et T. LABHART, « Spectral sensitivity and absolute threshold of polarization vision in crickets : a behavioral study », *Journal of Comparative Physiology A*, t. 165, n° 3, p. 315–319, mai 1989, ISSN : 1432-1351. DOI : 10.1007/BF00619350.

- [106] U. HOMBERG, « In search of the sky compass in the insect brain », *Naturwissenschaften*, t. 91, n° 5, p. 199–208, mai 2004, ISSN : 1432-1904. DOI : 10.1007/s00114-004-0525-9.
- [107] U. HOMBERG, S. HEINZE, K. PFEIFFER, M. KINOSHITA et B. EL JUNDI, « Central neural coding of sky polarization in insects », *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, t. 366, n° 1565, p. 680–687, 2011. DOI : 10.1098/rstb.2010.0199.
- [108] U. HOMBERG, S. HOFER, K. PFEIFFER et S. GEBHARDT, « Organization and neural connections of the anterior optic tubercle in the brain of the locust, *schistocerca gregaria* », *Journal of Comparative Neurology*, t. 462, n° 4, p. 415–430, 2003. DOI : 10.1002/cne.10771.
- [109] B. K. HORN et B. G. SCHUNCK, « Determining optical flow », *Artificial intelligence*, t. 17, n° 1-3, p. 185–203, 1981.
- [110] B. HORN, B. KLAUS et P. HORN, *Robot vision*. MIT press, 1986.
- [111] P. V. HOUGH, *Method and means for recognizing complex patterns*, US Patent 3,069,654, 1962.
- [112] W. ILG et K. BERNIS, « A learning architecture based on reinforcement learning for adaptive control of the walking machine lauron », *Robotics and Autonomous Systems*, t. 15, n° 4, p. 321–334, 1995, Reinforcement Learning and Robotics, ISSN : 0921-8890. DOI : 10.1016/0921-8890(95)00009-5.
- [113] E.-V. IMMONEN, M. DACKE, S. HEINZE et B. el JUNDI, « Anatomical organization of the brain of a diurnal and a nocturnal dung beetle », *Journal of Comparative Neurology*, t. 525, n° 8, p. 1879–1908, 2017. DOI : 10.1002/cne.24169.
- [114] B. el JUNDI, E. J. WARRANT, M. J. BYRNE, L. KHALDY, E. BAIRD, J. SMOLKA et M. DACKE, « Neural coding underlying the cue preference for celestial orientation », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, t. 112, n° 36, p. 11 395–11 400, 2015, ISSN : 0027-8424. DOI : 10.1073/pnas.1501272112.
- [115] M. KAISER, M. DECK, A. RETEY, K. BERNIS, W. ILG et R. DILLMANN, « Using neural networks for real-world adaptive control », *Neural Networks : Producing Dependable Systems*, Solihull, UK, 1995.
- [116] S. B. KARMAN, S. Z. M. DIAH et I. C. GEBESHUBER, « Bio-inspired polarized skylight-based navigation sensors : a review », *Sensors*, t. 12, n° 11, p. 14 232–14 261, 2012. DOI : 10.3390/s121114232.
- [117] F. KENDOUL, I. FANTONI et K. NONAMI, « Optic flow-based vision system for autonomous 3d localization and control of small aerial vehicles », *Robotics and Autonomous Systems*, t. 57, n° 6, p. 591–602, 2009, ISSN : 0921-8890. DOI : 10.1016/j.robot.2009.02.001.
- [118] B. KENNEDY, A. OKON, H. AGHAZARIAN, M. GARRETT, T. HUNTSBERGER, L. MAGNONE, M. ROBINSON et J. TOWNSEND, « The lemur ii-class robots for inspection and maintenance of orbital structures : a system description », in *Climbing and Walking Robots*, Springer, 2006, p. 1069–1076.

- [119] B. KERSBERGEN, G. A. LOPES, T. J. van den BOOM, B. DE SCHUTTER et R. BABUŠKA, « Optimal gait switching for legged locomotion », in *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on*, IEEE, 2011, p. 2729–2734. DOI : 10.1109/IROS.2011.6095166.
- [120] T. KERSCHER, A. ROENNAU, M. ZIEGENMEYER, B. GASSMANN, J. M. ZOELLNER et R. DILLMANN, « Behaviour-based control of the six-legged walking machine lauron ivc », in *Advances in Mobile Robotics*. 2008, p. 736–743. DOI : 10.1142/9789812835772_0089.
- [121] J. KESSIS, J. PENNE et J. RAMBANT, « Six legged walking robot has brains in its legs », *Sensor review*, t. 2, n° 1, p. 30–32, 1982.
- [122] J. KESSIS, J. RAMBAUT et J. PENNE, « Walking robot multi-level architecture and implementation », in *Fourth Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators. Poland*, 1981.
- [123] S. S. KIM, H. ROUAULT, S. DRUCKMANN et V. JAYARAMAN, « Ring attractor dynamics in the drosophila central brain », *Science*, t. 356, n° 6340, p. 849–853, 2017, ISSN : 0036-8075. DOI : 10.1126/science.aal4835.
- [124] D. A. KINGSLEY, R. D. QUINN et R. E. RITZMANN, « A cockroach inspired robot with artificial muscles », in *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, oct. 2006, p. 1837–1842. DOI : 10.1109/IROS.2006.282229.
- [125] D. A. KINGSLEY, « A cockroach inspired robot with artificial muscles », thèse de doct., Case Western Reserve University, 2004.
- [126] C. A. KLEIN et R. L. BRIGGS, « Use of active compliance in the control of legged vehicles », *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, t. 10, n° 7, p. 393–400, 1980.
- [127] M. KNADEN et P. GRAHAM, « The sensory ecology of ant navigation : from natural environments to neural mechanisms », *Annual Review of Entomology*, t. 61, n° 1, p. 63–76, 2016, PMID : 26527301. DOI : 10.1146/annurev-ento-010715-023703.
- [128] J. J. KOENDERINK et A. J. van DOORN, « Facts on optic flow », *Biological Cybernetics*, t. 56, n° 4, p. 247–254, juin 1987, ISSN : 1432-0770. DOI : 10.1007/BF00365219.
- [129] N. J. KOHUT, A. O. PULLIN, D. W. HALDANE, D. ZARROUK et R. S. FEARING, « Precise dynamic turning of a 10 cm legged robot on a low friction surface using a tail », in *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, mai 2013, p. 3299–3306. DOI : 10.1109/ICRA.2013.6631037.
- [130] M. KONYEV, F. PALLS, Y. ZAVGORODNIY, A. MELNIKOV, A. RUDSKIY, A. TELESH, U. SCHMUCKER et V. RUSIN, « Walking robot “anton” : design, simulation, experiments », in *Advances In Mobile Robotics*, World Scientific, 2008, p. 922–929. DOI : 10.1142/9789812835772_0110.
- [131] N. KOYACHI, T. ARAI, H. ADACHI, A. MURAKAMI et K. KAWAI, « Mechanical design of hexapods with integrated limb mechanism : melmantis-1 and melmantis-2 », in *Advanced Robotics, 1997. ICAR'97. Proceedings., 8th International Conference on*, IEEE, 1997, p. 273–278.

- [132] N. KOYACHI, T. ARAI, H. ADACHI, K.-i. ASAMI et Y. ITOH, « Hexapod with integrated limb mechanism of leg and arm », in *Robotics and Automation, 1995. Proceedings, 1995 IEEE International Conference on*, IEEE, t. 2, 1995, p. 1952–1957.
- [133] T. LABHART, « Specialized photoreceptors at the dorsal rim of the honeybee's compound eye : polarizational and angular sensitivity », *Journal of comparative physiology*, t. 141, n° 1, p. 19–30, mar. 1980, ISSN : 1432-1351. DOI : 10.1007/BF00611874.
- [134] —, « The electrophysiology of photoreceptors in different eye regions of the desert ant, *cataglyphis bicolor* », *Journal of Comparative Physiology A*, t. 158, n° 1, p. 1–7, jan. 1986, ISSN : 1432-1351. DOI : 10.1007/BF00614514.
- [135] —, « Polarization-opponent interneurons in the insect visual system », *Nature*, t. 331, n° 6155, p. 435, 1988.
- [136] —, « Polarization-sensitive interneurons in the optic lobe of the desert ant *cataglyphis bicolor* », *Naturwissenschaften*, t. 87, n° 3, p. 133–136, 2000. DOI : 10.1007/s001140050691.
- [137] T. LABHART et E. P. MEYER, « Detectors for polarized skylight in insects : a survey of ommatidial specializations in the dorsal rim area of the compound eye », *Microscopy Research and Technique*, t. 47, n° 6, p. 368–379, 1999. DOI : 10.1002/(SICI)1097-0029(19991215)47:6<368::AID-JEMT2>3.0.CO;2-Q.
- [138] T. LABHART et E. P. MEYER, « Neural mechanisms in insect navigation : polarization compass and odometer », *Current opinion in neurobiology*, t. 12, n° 6, p. 707–714, 2002. DOI : 10.1016/S0959-4388(02)00384-7.
- [139] D. LAMBRINOS, H. KOBAYASHI, R. PFEIFER, M. MARIS, T. LABHART et R. WEHNER, « An autonomous agent navigating with a polarized light compass », *Adaptive behavior*, t. 6, n° 1, p. 131–161, 1997. DOI : 10.1177/105971239700600104.
- [140] D. LAMBRINOS, R. MÖLLER, T. LABHART, R. PFEIFER et R. WEHNER, « A mobile robot employing insect strategies for navigation », *Robotics and Autonomous systems*, t. 30, n° 1-2, p. 39–64, 2000. DOI : 10.1016/S0921-8890(99)00064-0.
- [141] M. F. LAND, « Visual acuity in insects », *Annual review of entomology*, t. 42, n° 1, p. 147–177, 1997.
- [142] B. C. LANFRANCONI, *Kompassorientierung nach dem rotierenden himmelmuster bei der wüstenameise cataglyphis bicolor*. Universität Zürich, 1982.
- [143] J. LECOEUR, E. BAIRD et D. FLOREANO, « Spatial encoding of translational optic flow in planar scenes by elementary motion detector arrays », *Scientific reports*, t. 8, n° 1, p. 5821, 2018. DOI : 10.1038/s41598-018-24162-z.
- [144] E. L. G. LEGGE, A. WYSTRACH, M. L. SPETCH et K. CHENG, « Combining sky and earth : desert ants (*melophorus bagoti*) show weighted integration of celestial and terrestrial cues », *Journal of Experimental Biology*, t. 217, n° 23, p. 4159–4166, 2014, ISSN : 0022-0949. DOI : 10.1242/jeb.107862.
- [145] A. LERNER, S. SABBAH, C. ERLICK et N. SHASHAR, « Navigation by light polarization in clear and turbid waters », *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, t. 366, n° 1565, p. 671–679, 2011.

- [146] C. LI, P. B. UMBANHOWAR, H. KOMSUOGLU, D. E. KODITSCHKEK et D. I. GOLDMAN, « Sensitive dependence of the motion of a legged robot on granular media », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, t. 106, n° 9, p. 3029–3034, 2009, ISSN : 0027-8424. DOI : 10.1073/pnas.0809095106.
- [147] G. A. LOPES, T. J. van den BOOM, B. DE SCHUTTER et R. BABUSKA, « Modeling and control of legged locomotion via switching max-plus systems. », in *WODES*, 2010, p. 382–387.
- [148] L. M. LORIGO, R. A. BROOKS et W. E. L. GRIMSOU, « Visually-guided obstacle avoidance in unstructured environments », in *Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems. Innovative Robotics for Real-World Applications. IROS '97*, t. 1, sept. 1997, 373–379 vol.1. DOI : 10.1109/IROS.1997.649086.
- [149] S. LOWRY, N. SÜNDERHAUF, P. NEWMAN, J. J. LEONARD, D. COX, P. CORKE et M. J. MILFORD, « Visual place recognition : a survey », *IEEE Transactions on Robotics*, t. 32, n° 1, p. 1–19, fév. 2016, ISSN : 1552-3098. DOI : 10.1109/TR0.2015.2496823.
- [150] B. D. LUCAS et T. KANADE, « An iterative image registration technique with an application to stereo vision », 1981.
- [151] S. MAFRICA, S. GODIOT, M. MENOUNI, M. BOYRON, F. EXPERT, R. JUSTON, N. MARCHAND, F. RUFFIER et S. VIOLLET, « A bio-inspired analog silicon retina with michaelis-menten auto-adaptive pixels sensitive to small and large changes in light », *Opt. Express*, t. 23, n° 5, p. 5614–5635, mar. 2015. DOI : 10.1364/OE.23.005614.
- [152] M. C. MAJUMDAR, *Artificial intelligence and other innovative computer applications in the nuclear industry*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [153] N. J. MARSHALL, « A unique colour and polarization vision system in mantis shrimps », *Nature*, t. 333, n° 6173, p. 557, 1988.
- [154] A. MARTIN-ALVAREZ, W. DE PEUTER, J. HILLEBRAND, P. PUTZ, A. MATTHYSSEN et J. DE WEERD, « Walking robots for planetary exploration missions », in *WAC*, t. 96, 1996, p. 27–30.
- [155] R. B. MCGHEE et G. I. ISWANDHI, « Adaptive locomotion of a multilegged robot over rough terrain », *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, t. 9, n° 4, p. 176–182, 1979.
- [156] V. B. MEYER-ROCHOW, « Electrophysiology and histology of the eye of the bumblebee *bombus hortorum* (l.) (hymenoptera : apidae) », *Journal of the Royal Society of New Zealand*, t. 11, n° 2, p. 123–153, 1981. DOI : 10.1080/03036758.1981.10419447.
- [157] L. MICHAELIS et M. L. MENTEN, *Die kinetik der invertinwirkung*. Universitätsbibliothek Johann Christian Senckenberg, 2007.
- [158] M. J. MILFORD et G. F. WYETH, « Seqslam : visual route-based navigation for sunny summer days and stormy winter nights », in *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, mai 2012, p. 1643–1649. DOI : 10.1109/ICRA.2012.6224623.
- [159] H. MITTELSTAEDT, « Role of multimodal convergence in homing by path integration », *Fortschritte der Zoologie*, p. 197–212, 1983.

- [160] U. MOCCI, M. PETTERNELLA et S. SALINARI, « Experiments with six-legged walking machines with fixed gait », in *Fourth International Symposium on External Control of Human Extremities, Dubrovnik, Yugoslavia, Aug, 1972*.
- [161] M. MOMENI et A. H. TITUS, « An analog vlsi chip emulating polarization vision of octopus retina », *IEEE transactions on neural networks*, t. 17, n° 1, p. 222–232, 2006. DOI : 10.1109/TNN.2005.860865.
- [162] E. MUEGGLER, H. REBECQ, G. GALLEGRO, T. DELBRUCK et D. SCARAMUZZA, « The event-camera dataset and simulator : event-based data for pose estimation, visual odometry, and slam », *The International Journal of Robotics Research*, t. 36, n° 2, p. 142–149, 2017. DOI : 10.1177/0278364917691115.
- [163] M. MÜLLER et R. WEHNER, « Path integration in desert ants, *cataglyphis fortis* », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, t. 85, n° 14, p. 5287–5290, 1988, ISSN : 0027-8424. DOI : 10.1073/pnas.85.14.5287.
- [164] K. I. NAKA et W. A. H. RUSHTON, « S-potentials from luminosity units in the retina of fish (cyprinidae) », *The Journal of Physiology*, t. 185, n° 3, p. 587–599, 1966. DOI : 10.1113/jphysiol.1966.sp008003.
- [165] K. NAKAYAMA et J. LOOMIS, « Optical velocity patterns, velocity-sensitive neurons, and space perception : a hypothesis », *Perception*, t. 3, n° 1, p. 63–80, 1974. DOI : 10.1068/p030063.
- [166] « Navigational mechanisms of migrating monarch butterflies », *Trends in Neurosciences*, t. 33, n° 9, p. 399–406, 2010, ISSN : 0166-2236. DOI : 10.1016/j.tins.2010.04.004.
- [167] G. M. NELSON, R. D. QUINN, R. J. BACHMANN, W. C. FLANNIGAN, R. E. RITZMANN et J. T. WATSON, « Design and simulation of a cockroach-like hexapod robot », in *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, t. 2, avr. 1997, 1106–1111 vol.2. DOI : 10.1109/ROBOT.1997.614284.
- [168] D. E. ORIN, « Supervisory control of a multilegged robot », *The International Journal of Robotics Research*, t. 1, n° 4, p. 79–91, 1982.
- [169] D. E. ORIN, R. MCGHEE, M. VUKOBRATOVIĆ et G. HARTOCH, « Kinematic and kinetic analysis of open-chain linkages utilizing newton-euler methods », *Mathematical Biosciences*, t. 43, n° 1-2, p. 107–130, 1979.
- [170] Y. OU, P. WU, C. TANG et H. WEI, « Analysis on the influence factors to atmospheric polarization navigation », in *China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2016 Proceedings : Volume II*, Springer, 2016, p. 583–593. DOI : 10.1007/978-981-10-0937-2_49.
- [171] PALIS, RUSIN, SCHUMUCKER, SCHNEIDER et ZAVGORODNIY, « Legged robot with articulated body in locomotion over complex terrain », in *Climbing and Walking Robots*, Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2005, p. 321–328, ISBN : 978-3-540-29461-0. DOI : 10.1007/3-540-29461-9_30.
- [172] G. PASSAULT, Q. ROUXEL, R. FABRE, S. N’GUYEN et O. LY, « Optimizing morphology and locomotion on a corpus of parametric legged robots », in *Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems*, Springer, 2016, p. 227–238. DOI : 10.1007/978-3-319-42417-0_21.

- [173] G. PASSAULT, Q. ROUXEL, F. PETIT et O. LY, « Metabot : a low-cost legged robotics platform for education », in *Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC), 2016 International Conference on*, IEEE, 2016, p. 283–287. DOI : 10.1109/ICARSC.2016.52.
- [174] U. PEGEL, K. PFEIFFER et U. HOMBERG, « Integration of celestial compass cues in the central complex of the locust brain », *Journal of Experimental Biology*, t. 221, n° 2, 2018, ISSN : 0022-0949. DOI : 10.1242/jeb.171207.
- [175] R. PERICET-CAMARA, M. K. DOBRZYNSKI, R. JUSTON, S. VIOLLET, R. LEITEL, H. A. MALLOT et D. FLOREANO, « An artificial elementary eye with optic flow detection and compositional properties », *Journal of The Royal Society Interface*, t. 12, n° 109, p. 20150414, 2015. DOI : 10.1098/rsif.2015.0414.
- [176] M. PETTERNELLA, S. SALINARI, N. delle RICERCHE et V. EUDOSSIANA, « Feasibility study on six-legged walking robots », in *Proceedings 4th ISIR Symposium*, 1974, p. 33.
- [177] S. E. PFEFFER et M. WITTLINGER, « Optic flow odometry operates independently of stride integration in carried ants », *Science*, t. 353, n° 6304, p. 1155–1157, 2016, ISSN : 0036-8075. DOI : 10.1126/science.aaf9754.
- [178] K. PFEIFFER, M. NEGRELLO et U. HOMBERG, « Conditional perception under stimulus ambiguity : polarization-and azimuth-sensitive neurons in the locust brain are inhibited by low degrees of polarization », *Journal of Neurophysiology*, t. 105, n° 1, p. 28–35, 2010. DOI : 10.1152/jn.00480.2010.
- [179] C. POSCH, T. SERRANO-GOTARREDONA, B. LINARES-BARRANCO et T. DELBRUCK, « Retinomorph event-based vision sensors : bioinspired cameras with spiking output », *Proceedings of the IEEE*, t. 102, n° 10, p. 1470–1484, 2014.
- [180] R. D. QUINN, G. M. NELSON, R. J. BACHMANN, D. A. KINGSLEY, J. T. OFFI, T. J. ALLEN et R. E. RITZMANN, « Parallel complementary strategies for implementing biological principles into mobile robots », *The International Journal of Robotics Research*, t. 22, n° 3-4, p. 169–186, 2003. DOI : 10.1177/0278364903022003003.
- [181] R. D. QUINN, G. M. NELSON, R. J. BACHMANN, D. A. KINGSLEY, J. OFFI et R. E. RITZMANN, « Insect designs for improved robot mobility », *Climbing and Walking Robots : From Biology to Industrial Applications*, p. 59, 2001.
- [182] R. D. QUINN, G. M. NELSON, R. J. BACHMANN et R. E. RITZMANN, « Toward mission capable legged robots through biological inspiration », *Autonomous robots*, t. 11, n° 3, p. 215–220, 2001. DOI : 10.1023/A:1012478704769.
- [183] R. D. QUINN et R. E. RITZMANN, « Construction of a hexapod robot with cockroach kinematics benefits both robotics and biology », *Connection Science*, t. 10, n° 3-4, p. 239–254, 1998. DOI : 10.1080/095400998116422.
- [184] F. RAUDIES, « Optic flow », *Scholarpedia*, t. 8, n° 7, p. 30724, 2013. DOI : 10.4249/scholarpedia.30724.
- [185] B. RENFRO, J. ROSENQUEST, A. TERRY et N. BOEKER, « 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.

- [186] S. M. REPERT, H. ZHU et R. H. WHITE, « Polarized light helps monarch butterflies navigate », *Current Biology*, t. 14, n° 2, p. 155–158, 2004. DOI : 10.1016/j.cub.2003.12.034.
- [187] R. E. RITZMANN, R. D. QUINN, J. T. WATSON et S. N. ZILL, « Insect walking and biorobotics : a relationship with mutual benefits », *BioScience*, t. 50, 2000. DOI : 10.1641/0006-3568(2000)050[0023:IWABAR]2.3.CO;2.
- [188] T. M. ROEHR, F. CORDES et F. KIRCHNER, « Reconfigurable integrated multirobot exploration system (rimres) : heterogeneous modular reconfigurable robots for space exploration », *Journal of Field Robotics*, t. 31, n° 1, p. 3–34, 2014. DOI : 10.1002/rob.21477.
- [189] A. ROENNAU, G. HEPPNER, M. NOWICKI et R. DILLMANN, « Lauron v : a versatile six-legged walking robot with advanced maneuverability », in *2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, juil. 2014, p. 82–87. DOI : 10.1109/AIM.2014.6878051.
- [190] A. ROENNAU, G. HEPPNER, L. PFOTZER et R. DILLMANN, « Lauron v : optimized leg configuration for the design of a bio-inspired walking robot », in *Nature-Inspired Mobile Robotics*, World Scientific, 2013, p. 563–570. DOI : 10.1142/9789814525534_0071.
- [191] A. ROENNAU, T. KERSCHER et R. DILLMANN, « Design and kinematics of a biologically-inspired leg for a six-legged walking machine », in *2010 3rd IEEE RAS EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, sept. 2010, p. 626–631. DOI : 10.1109/BIOROB.2010.5626328.
- [192] A. ROENNAU, T. KERSCHER, M. ZIEGENMEYER, J. ZOELLNER et R. DILLMANN, « Six-legged walking in rough terrain based on foot point planning », in *Mobile robotics : Solutions and challenges*, World Scientific, 2010, p. 591–598. DOI : 10.1142/9789814291279_0072.
- [193] A. ROENNAU, T. KERSCHER, M. ZIEGENMEYER, J. M. ZÖLLNER et R. DILLMANN, « Adaptation of a six-legged walking robot to its local environment », in *Robot Motion and Control 2009*, K. R. KOZŁOWSKI, éd., London : Springer London, 2009, p. 155–164, ISBN : 978-1-84882-985-5. DOI : 10.1007/978-1-84882-985-5_15.
- [194] D. ROLLINSON, Y. BILGEN, B. BROWN, F. ENNER, S. FORD, C. LAYTON, J. REMBISZ, M. SCHWERIN, A. WILLIG, P. VELAGAPUDI et H. CHOSET, « Design and architecture of a series elastic snake robot », in *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, sept. 2014, p. 4630–4636. DOI : 10.1109/IRoS.2014.6943219.
- [195] B. RONACHER, K. GALLIZZI, S. WOHLGEMUTH et R. WEHNER, « Lateral optic flow does not influence distance estimation in the desert ant *cataglyphis fortis* », *Journal of Experimental Biology*, t. 203, n° 7, p. 1113–1121, 2000, ISSN : 0022-0949.
- [196] B. RONACHER et R. WEHNER, « Desert ants *cataglyphis fortis* use self-induced optic flow to measure distances travelled », *Journal of Comparative Physiology A*, t. 177, n° 1, p. 21–27, juil. 1995, ISSN : 1432-1351. DOI : 10.1007/BF00243395.

- [197] F. L. ROUBIEU, F. EXPERT, M. BOYRON, B. FUSCHLOCK, S. VIOLLET et F. RUFFIER, « A novel 1-gram insect based device measuring visual motion along 5 optical directions », in *SENSORS, 2011 IEEE*, oct. 2011, p. 687–690. DOI : 10.1109/ICSENS.2011.6127157.
- [198] M. RUSSELL, « Odex i : the first functionoid », *Robotics Age*, t. 5, n° 5, p. 12–18, 1983.
- [199] F. SANTSCI, « Observations et remarques critiques sur le mécanisme de l'orientation chez les fourmis », *Revue Suisse de Zoologie*, t. 19, p. 303–338, 1911.
- [200] U. SARANLI, M. BUEHLER et D. E. KODITSCHKEK, « Rhex : a simple and highly mobile hexapod robot », *The International Journal of Robotics Research*, t. 20, n° 7, p. 616–631, 2001. DOI : 10.1177/02783640122067570.
- [201] M. SARKAR, D. S. S. BELLO, C. van HOOF et A. J. THEUWISSEN, « Biologically inspired cmos image sensor for fast motion and polarization detection », *IEEE Sensors Journal*, t. 13, n° 3, p. 1065–1073, 2013. DOI : 10.1109/JSEN.2012.2234101.
- [202] M. SARKAR, D. S. S. BELLO, C. VAN HOOF et A. THEUWISSEN, « Integrated polarization-analyzing cmos image sensor for detecting incoming light ray direction », in *Sensors Applications Symposium (SAS), 2010 IEEE*, IEEE, 2010, p. 194–199. DOI : 10.1109/TIM.2011.2130050.
- [203] Y. Y. SCHECHNER et N. KARPEL, « Clear underwater vision », in *Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2004. CVPR 2004.*, t. 1, juin 2004, p. I–I. DOI : 10.1109/CVPR.2004.1315078.
- [204] M. SCHILLING, T. HOINVILLE, J. SCHMITZ et H. CRUSE, « Walknet, a bio-inspired controller for hexapod walking », *Biological Cybernetics*, t. 107, n° 4, p. 397–419, août 2013, ISSN : 1432-0770. DOI : 10.1007/s00422-013-0563-5.
- [205] F. SCHMITT, S. M. STIEB, R. WEHNER et W. RÖSSLER, « 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*, t. 76, n° 4, p. 390–404, 2016. DOI : 10.1002/dneu.22322.
- [206] U. SCHMUCKER, A. SCHNEIDER et T. IHME, « Six-legged robot for service operations », in *Proceedings of the First Euromicro Workshop on Advanced Mobile Robots (EUROBOT '96)*, oct. 1996, p. 135–142. DOI : 10.1109/EURBOT.1996.551892.
- [207] U. SCHMUCKER, A. SCHNEIDER et V. RUSIN, « Interactive virtual simulator (ivs) of six-legged robot katharina », in *Proceedings of the IEEE International Conference on Climbing and Walking Robots, Catania, Italy*, 2003, p. 327–332.
- [208] A. SCHNEIDER, J. PASKARBEIT, M. SCHAEFFERSMANN et J. SCHMITZ, « Hector, a new hexapod robot platform with increased mobility-control approach, design and communication », in *Advances in Autonomous Mini Robots*, Springer, 2012, p. 249–264. DOI : 10.1007/978-3-642-27482-4_24.
- [209] R. T. SCHROER, M. J. BOGGESS, R. J. BACHMANN, R. D. QUINN et R. E. RITZMANN, « Comparing cockroach and whegs robot body motions », in *Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference on*, IEEE, t. 4, 2004, p. 3288–3293. DOI : 10.1109/ROBOT.2004.1308761.

- [210] S. SCHWARZ, A. NARENDRA et J. ZEIL, « The properties of the visual system in the australian desert ant *melophorus bagoti* », *Arthropod Structure & Development*, t. 40, n° 2, p. 128–134, 2011, ISSN : 1467-8039. DOI : 10.1016/j.asd.2010.10.003.
- [211] M. A. SEID, A. CASTILLO et W. T. WCISLO, « The allometry of brain miniaturization in ants », *Brain, behavior and evolution*, t. 77, n° 1, p. 5–13, 2011. DOI : 10.1159/000322530.
- [212] R. A. SEIDL, « Die sehfelder und ommatidien divergenzwinkel von arbeitlerin, königin und drohn der honigbiene (*apis mellifica*) », thèse de doct., 1982.
- [213] J. R. SERRES et F. RUFFIER, « Optic flow-based collision-free strategies : from insects to robots », *Arthropod Structure & Development*, t. 46, n° 5, p. 703–717, 2017, From Insects to Robots, ISSN : 1467-8039. DOI : 10.1016/j.asd.2017.06.003.
- [214] J. SERRES, S. VIOLLET et F. RUFFIER, « Microdrones bio-inspirés », *Les Techniques de l'Ingenieur*, S7717–V1, 2017.
- [215] T. B. SMITH, J. BARREIRO, D. E. SMITH, V. SUNSPIRAL et D. CHAVEZ-CLEMENTE, « Athlete's feet : multi-resolution planning for a hexapod robot », 2008.
- [216] U. SMOLA et P. MEFFERT, « A single-peaked uv-receptor in the eye of *calliphora erythrocephala* », *Journal of comparative physiology*, t. 103, n° 3, p. 353–357, jan. 1975, ISSN : 1432-1351. DOI : 10.1007/BF00612027.
- [217] S. SOMMER, C. von BEEREN et R. WEHNER, « Multiroute memories in desert ants », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, t. 105, n° 1, p. 317–322, 2008, ISSN : 0027-8424. DOI : 10.1073/pnas.0710157104.
- [218] Y. M. SONG, Y. XIE, V. MALYARCHUK, J. XIAO, I. JUNG, K.-J. CHOI, Z. LIU, H. PARK, C. LU, R.-H. KIM et al., « Digital cameras with designs inspired by the arthropod eye », *Nature*, t. 497, n° 7447, p. 95, 2013. DOI : 10.1038/nature12083.
- [219] M. V. SRINIVASAN, « Honeybees as a model for the study of visually guided flight, navigation, and biologically inspired robotics », *Physiological reviews*, t. 91, n° 2, p. 413–460, 2011. DOI : 10.1152/physrev.00005.2010.
- [220] M. V. SRINIVASAN, « Going with the flow : a brief history of the study of the honeybee's navigational 'odometer' », *Journal of Comparative Physiology A*, t. 200, n° 6, p. 563–573, juin 2014, ISSN : 1432-1351. DOI : 10.1007/s00359-014-0902-6.
- [221] —, « Where paths meet and cross : navigation by path integration in the desert ant and the honeybee », *Journal of Comparative Physiology A*, t. 201, n° 6, p. 533–546, juin 2015, ISSN : 1432-1351. DOI : 10.1007/s00359-015-1000-0.
- [222] G. G. STOKES, « On the composition and resolution of streams of polarized light from different sources », *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, t. 9, p. 399, 1851. DOI : 10.1017/CB09780511702266.010.
- [223] G. G. STOKES et al., « On the change of refrangibility of light », *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, t. 142, p. 463–562, 1852.
- [224] T. STONE, B. WEBB, A. ADDEN, N. B. WEDDIG, A. HONKANEN, R. TEMPLIN, W. WCISLO, L. SCIMECA, E. WARRANT et S. HEINZE, « An anatomically constrained model for path integration in the bee brain », *Current Biology*, t. 27, n° 20, 3069–3085.e11, 2017, ISSN : 0960-9822. DOI : 10.1016/j.cub.2017.08.052.

- [225] H. H. THOEN, M. J. HOW, T.-H. CHIOU et J. MARSHALL, « A different form of color vision in mantis shrimp », *Science*, t. 343, n° 6169, p. 411–413, 2014. DOI : 10.1126/science.1245824.
- [226] E. VANHOUTTE, « Microdrone with visual system inspired from honeybees », Theses, Aix Marseille Université, oct. 2018. adresse : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/tel-01910718>.
- [227] E. VANHOUTTE, S. MAFRICA, F. RUFFIER, R. J. BOOTSMA et J. SERRES, « Time-of-travel methods for measuring optical flow on board a micro flying robot », *Sensors*, t. 17, n° 3, 2017, ISSN : 1424-8220. DOI : 10.3390/s17030571.
- [228] A. VARDY et R. MOLLER, « Biologically plausible visual homing methods based on optical flow techniques », *Connection Science*, t. 17, n° 1-2, p. 47–89, 2005. DOI : 10.1080/09540090500140958.
- [229] A. R. VIDAL, H. REBECQ, T. HORSTSCHAEFER et D. SCARAMUZZA, « Ultimate slam? combining events, images, and imu for robust visual slam in hdr and high-speed scenarios », *IEEE Robotics and Automation Letters*, t. 3, n° 2, p. 994–1001, 2018. DOI : 10.1109/LRA.2018.2793357.
- [230] S. VIOLLET, S. GODIOT, R. LEITEL, W. BUSS, P. BREUGNON, M. MENOUNI, R. JUSTON, F. EXPERT, F. COLONNIER, G. L'EPLATTENIER, A. BRÜCKNER, F. KRAZE, H. MALLOT, N. FRANCESCHINI, R. PERICET-CAMARA, F. RUFFIER et D. FLOREANO, « Hardware architecture and cutting-edge assembly process of a tiny curved compound eye », *Sensors*, t. 14, n° 11, p. 21 702–21 721, 2014, ISSN : 1424-8220. DOI : 10.3390/s141121702.
- [231] M. WALTER et J. LEONARD, « An experimental investigation of cooperative slam », *IFAC Proceedings Volumes*, t. 37, n° 8, p. 880–885, 2004, IFAC/EURON Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, Lisbon, Portugal, 5-7 July 2004, ISSN : 1474-6670. DOI : 10.1016/S1474-6670(17)32091-8.
- [232] D. WANG, H. LIANG, H. ZHU et S. ZHANG, « A bionic camera-based polarization navigation sensor », *Sensors*, t. 14, n° 7, p. 13 006–13 023, 2014. DOI : 10.3390/s140713006.
- [233] Y. WANG, J. CHU, R. ZHANG, L. WANG et Z. WANG, « A novel autonomous real-time position method based on polarized light and geomagnetic field », *Scientific reports*, t. 5, p. 9725, 2015. DOI : 10.1038/srep09725.
- [234] Y. WANG, X. HU, L. ZHANG, J. LIAN et X. HE, « Polarized light compass-aided visual-inertial navigation under foliage environment », *IEEE Sensors Journal*, t. 17, n° 17, p. 5646–5653, 2017. DOI : 10.1109/JSEN.2017.2725938.
- [235] T. H. WATERMAN, « Polarization patterns in submarine illumination », *Science*, t. 120, n° 3127, p. 927–932, 1954. DOI : 10.2307/1682610.
- [236] —, « Reviving a neglected celestial underwater polarization compass for aquatic animals », *Biological Reviews*, t. 81, n° 1, p. 111–115, 2006. DOI : 10.1017/S1464793105006883.
- [237] B. WEBB, « What does robotics offer animal behaviour? », *Animal behaviour*, t. 60, n° 5, p. 545–558, 2000. DOI : 10.1006/anbe.2000.1514.
- [238] R. WEHNER, « The polarization-vision project-championing organismic biology », *Neural basis of behavioural adaptations*, p. 103–143, 1994.

- [239] R. WEHNER, « The ant's celestial compass system : spectral and polarization channels », in *Orientation and Communication in Arthropods*, M. LEHRER, éd. Basel : Birkhäuser Basel, 1997, p. 145–185, ISBN : 978-3-0348-8878-3. DOI : 10.1007/978-3-0348-8878-3_6.
- [240] —, « Desert ant navigation : how miniature brains solve complex tasks », *Journal of Comparative Physiology A*, t. 189, n° 8, p. 579–588, août 2003, ISSN : 1432-1351. DOI : 10.1007/s00359-003-0431-1.
- [241] R. WEHNER et M. MÜLLER, « How do ants acquire their celestial ephemeris function? », *Naturwissenschaften*, t. 80, n° 7, p. 331–333, juil. 1993, ISSN : 1432-1904. DOI : 10.1007/BF01141909.
- [242] R. WEHNER, « Celestial and terrestrial navigation : human strategies — insect strategies », in *Neuroethology and Behavioral Physiology*, F. HUBER et H. MARKL, édés., Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1983, p. 366–381, ISBN : 978-3-642-69271-0.
- [243] —, « Taxonomie, funktionsmorphologie und zoogeographie der saharischen wüstennameise *cataglyphis fortis* (forel 1902) stat. nov », *Senckenbergiana biol*, t. 64, p. 89–132, 1983.
- [244] —, « The desert ant's navigational toolkit : procedural rather than positional knowledge », *Navigation*, t. 55, n° 2, p. 101–114, 2008. DOI : 10.1002/j.2161-4296.2008.tb00421.x.
- [245] R. WEHNER, T. HOINVILLE, H. CRUSE et K. CHENG, « Steering intermediate courses : desert ants combine information from various navigational routines », *Journal of Comparative Physiology A*, t. 202, n° 7, p. 459–472, juil. 2016, ISSN : 1432-1351. DOI : 10.1007/s00359-016-1094-z.
- [246] R. WEHNER et F. RÄBER, « Visual spatial memory in desert ants, *cataglyphis bicolor* (hymenoptera : formicidae) », *Experientia*, t. 35, n° 12, p. 1569–1571, 1979. DOI : 10.1007/BF01953197.
- [247] R. WEHNER et M. V. SRINIVASAN, « Path integration in insects », in *The Neurobiology of Spatial Behaviour*, Oxford University Press, nov. 2003, p. 9–30. DOI : 10.1093/acprof:oso/9780198515241.003.0001.
- [248] R. WEHNER et S. WEHNER, « Insect navigation : use of maps or ariadne's thread? », *Ethology Ecology & Evolution*, t. 2, n° 1, p. 27–48, 1990. DOI : 10.1080/08927014.1990.9525492.
- [249] S. WEISS, D. SCARAMUZZA et R. SIEGWART, « Monocular-slam-based navigation for autonomous micro helicopters in gps-denied environments », *Journal of Field Robotics*, t. 28, n° 6, p. 854–874, 2011. DOI : 10.1002/rob.20412.
- [250] « 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*, t. 226, n° 4, p. 429–437, 2004, ISSN : 0022-5193. DOI : 10.1016/j.jtbi.2003.09.017.

- [251] B. H. WILCOX, T. LITWIN, J. BIESIADECKI, J. MATTHEWS, M. HEVERLY, J. MORRISON, J. TOWNSEND, N. AHMAD, A. SIROTA et B. COOPER, « Athlete : a cargo handling and manipulation robot for the moon », *Journal of Field Robotics*, t. 24, n° 5, p. 421–434, 2007. DOI : 10.1002/rob.20193.
- [252] M. WITTLINGER, R. WEHNER et H. WOLF, « The ant odometer : stepping on stilts and stumps », *Science*, t. 312, n° 5782, p. 1965–1967, 2006, ISSN : 0036-8075. DOI : 10.1126/science.1126912.
- [253] —, « The desert ant odometer : a stride integrator that accounts for stride length and walking speed », *Journal of Experimental Biology*, t. 210, n° 2, p. 198–207, 2007, ISSN : 0022-0949. DOI : 10.1242/jeb.02657.
- [254] S. WOHLGEMUTH, B. RONACHER et R. WEHNER, « Distance estimation in the third dimension in desert ants », *Journal of Comparative Physiology A*, t. 188, n° 4, p. 273–281, mai 2002, ISSN : 1432-1351. DOI : 10.1007/s00359-002-0301-2.
- [255] S. WOHLGEMUTH, B. RONACHER et R. WEHNER, « Ant odometry in the third dimension », *Nature*, t. 411, n° 6839, p. 795, 2001. DOI : 10.1038/35081069.
- [256] A. WYSTRACH, G. BEUGNON et K. CHENG, « Landmarks or panoramas : what do navigating ants attend to for guidance? », *Frontiers in Zoology*, t. 8, n° 1, p. 21, août 2011, ISSN : 1742-9994. DOI : 10.1186/1742-9994-8-21.
- [257] K. A. ZAGHLOUL et K. BOAHEN, « A silicon retina that reproduces signals in the optic nerve », *Journal of neural engineering*, t. 3, n° 4, p. 257, 2006.
- [258] J. ZEIL, M. I. HOFMANN et J. S. CHAHL, « Catchment areas of panoramic snapshots in outdoor scenes », *J. Opt. Soc. Am. A*, t. 20, n° 3, p. 450–469, mar. 2003. DOI : 10.1364/JOSAA.20.000450.
- [259] W. ZHANG, Y. CAO, X. ZHANG et Z. LIU, « Sky light polarization detection with linear polarizer triplet in light field camera inspired by insect vision », *Applied optics*, t. 54, n° 30, p. 8962–8970, 2015. DOI : 10.1364/AO.54.008962.
- [260] W. ZHANG, X. ZHANG, Y. CAO, H. LIU et Z. LIU, « Robust sky light polarization detection with an s-wave plate in a light field camera », *Applied optics*, t. 55, n° 13, p. 3518–3525, 2016. DOI : 10.1364/AO.55.003518.
- [261] Y. ZHAO, « Applying time-differenced carrier phase in nondifferential gps/imu tightly coupled navigation systems to improve the positioning performance », *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, t. 66, n° 2, p. 992–1003, fév. 2017, ISSN : 0018-9545. DOI : 10.1109/TVT.2016.2558206.
- [262] W. ZHI, J. CHU, J. LI et Y. WANG, « A novel attitude determination system aided by polarization sensor », *Sensors*, t. 18, n° 1, p. 158, 2018. DOI : 10.3390/s18010158.
- [263] C. ZOLLIKOFER, R. WEHNER et T. FUKUSHI, « Optical scaling in conspecific cataglyphis ants », *Journal of Experimental Biology*, t. 198, n° 8, p. 1637–1646, 1995, ISSN : 0022-0949.

ANNEXES

A Modèles géométrique et dynamique

Cette annexe se fixe pour objectif d'établir les modèles géométriques et dynamiques d'un robot hexapode à 18 degrés de liberté, et dont le châssis est à géométrie hexagonale régulière. Tandis que le modèle géométrique permet d'établir une relation mathématique entre les coordonnées articulaires q et opérationnelles x , et le modèle dynamique établit la relation existante entre les forces ou couples exercés par le ou les actionneurs, et le mouvement qui en découle dans l'espace opérationnel. Dans chaque cas, un modèle sera dit direct s'il permet une transformation de l'espace articulaire vers l'espace opérationnel, et inverse si cette transformation s'opère de l'opérationnel vers l'articulaire.

Dans notre étude, chaque degré de liberté représente une liaison pivot. Bien que l'ensemble du robot constitue une chaîne arborescente, on se focalisera ici avant tout sur les pattes qui, prises séparément, forment des chaînes ouvertes simples dont l'étude est plus aisée. Cette approche fait sens dans la mesure où chaque patte sera contrôlée individuellement selon un patron de locomotion spécifique au sein duquel chaque patte est soit en transfert, soit au repos (et donc au sol).

A.1 Modèle géométrique direct et inverse

A.1.1 Notations

On définit l'espace articulaire comme étant l'espace qui a pour référence le repère lié à la base de la patte du robot. On définit également l'espace opérationnel correspondant à l'espace ayant pour référence le repère lié à l'extrémité de la patte (appelée organe terminal). En conséquence, le modèle géométrique établit la relation mathématique permettant de passer d'un espace à l'autre, c'est-à-dire du repère cartésien (espace opérationnel) lié généralement à la base du robot, au repère de l'espace articulaire généralement fixé au centre de l'organe terminal, et réciproquement.

Soit x la configuration du robot dans l'espace opérationnel, regroupant la position cartésienne ${}^t(P_x, P_y, P_z)$ et l'orientation ${}^t(\alpha, \beta, \gamma)$ où α correspond à l'angle de lacet, β celui du tangage et γ celui du roulis. Par extension, nous appellerons x^i la configuration de la i -ème patte dans l'espace opérationnel, de position ${}^t(P_x^i, P_y^i, P_z^i)$ et d'orientation ${}^t(\alpha^i, \beta^i, \gamma^i)$. On définit également q la configuration du robot correspondante dans l'espace articulaire, regroupant les angles des 18 articulations $\theta_j^i, \forall (i, j) \in \{1, \dots, 6\} \times \{1, 2, 3\}$. Ainsi, q^i représente la configuration de la i -ème patte dans l'espace articulaire. Le modèle géométrique direct f de chacune des pattes est donné par la relation :

$$x^i = f(q^i) \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, 6\} \tag{A.20}$$

Le modèle géométrique direct est donc représenté par la fonction f définie sur l'espace articulaire et à valeurs dans l'espace opérationnel. Ainsi, sous certaines conditions, il existe un modèle inverse f^{-1} correspondant au modèle géométrique inverse d'une patte. Considérant le robot hexapode à symétrie hexagonale régulière présenté en Figure A.1A, chaque patte i est composée de trois liaisons pivot : la première est centrée en $O_{i,1}$ et d'axe \vec{z} , tandis que les deux autres sont centrées en $O_{i,j}$ et d'axes $\vec{z}_{i,j}$ où $i \in \{1, \dots, 6\}$ et $j \in \{2, 3\}$.

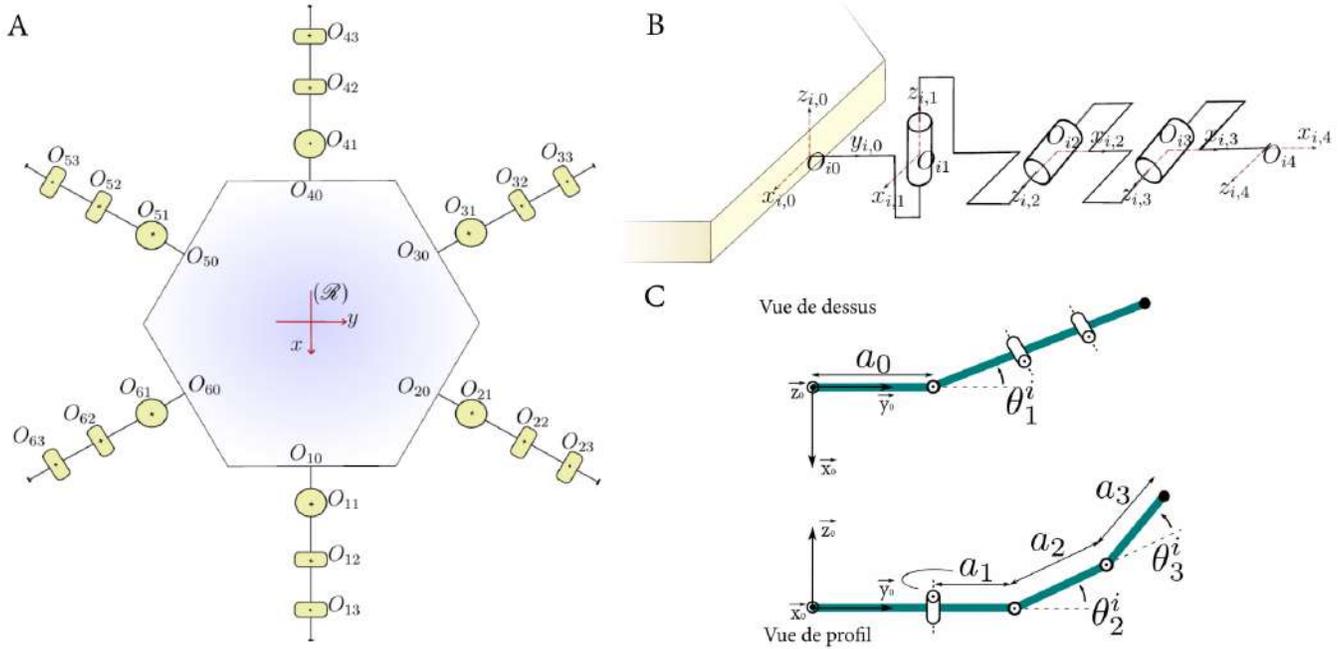


FIGURE A.1 – Modèle cinématique d'un robot hexapode à 18 degrés de liberté, organisé selon une structure hexagonale. **A** Vue de dessus d'un robot hexapode à 18 degrés de liberté. Le centre de la liaison j de la patte i est noté $O_{i,j}$. **B** Chaîne cinématique d'une patte du robot selon les règles de Denavit-Hartenberg. **C** Conventions retenues pour le modèle dynamique d'une patte à trois degrés de liberté.

A.1.2 Les règles de Denavit-Hartenberg

La convention de Denavit-Hartenberg (D-H) a été établie en 1955 par Jacques Denavit et Richard S. Hartenberg. Elle permet de définir la chaîne cinématique (notations et repères d'étude) nécessaire au calcul de la matrice de passage T^i , représentation matricielle du modèle géométrique direct. Afin d'obtenir une modélisation correcte de D-H, quatre règles doivent être observées :

- $O_{i,j+1}$ est le pied de la perpendiculaire commune aux liaisons L_j^i et L_{j+1}^i ;
- $\vec{x}_{i,j+1}$ est un vecteur directeur unitaire de cette perpendiculaire ;
- s'il y a une ambiguïté au sujet de la perpendiculaire, on retient la solution la plus simple et la plus symétrique ;
- $\vec{z}_{i,j+1}$ est un vecteur unitaire colinéaire à la liaison L_{j+1}^i .

La figure A.1B-C donne la chaîne cinématique (trois degrés de liberté) de la patte i du robot. Les paramètres de D-H sont alors donnés suivant les règles ci-après :

- P est le point d'intersection des axes de deux liaisons consécutives ;
- a_j^i est la distance algébrique de P à $O_{i,j+1}$;
- r_j^i est la distance algébrique de $O_{i,j}$ à P ;
- α_j^i est l'angle entre $\vec{z}_{i,j}$ et $\vec{z}_{i,j+1}$ relativement à $\vec{x}_{i,j+1}$;
- θ_j^i est l'angle entre $\vec{x}_{i,j}$ et la projection orthogonale de $\vec{x}_{i,j+1}$ relativement à $\vec{z}_{i,j}$;
- σ_j^i vaut 0 lorsque la liaison est de type rotoïde (pivot), et 1 si elle est prismatique (glissière) ;
- $(\mathcal{R}_j^i) = \{O_{i,j}, \vec{x}_{i,j}, \vec{y}_{i,j}, \vec{z}_{i,j}\}$.

A.1.3 Le modèle géométrique direct

D'après les règles de D-H, on peut définir les paramètres nécessaires à la construction du modèle géométrique direct (Table A.3).

Param. D-H	Articulation n°1	Articulation n°2	Articulation n°3
σ_j^i	0	0	0
a_j^i	a_1	a_2	a_3
r_j^i	0	0	0
α_j^i	$\frac{\pi}{2}$	0	0
θ_j^i	θ_1^i	θ_2^i	θ_3^i
$(q_j^i)_0$	$\frac{\pi}{2}$	0	0

TABLEAU A.3 – Paramètres de D-H d'une patte à 3 degrés de liberté

La matrice de passage $T_{j,j+1}^i$ de la liaison j à la liaison $j+1$ de la patte i , également appelée matrice de transformation homogène, s'écrit alors en fonction de $q_j^i \in \{\theta_j^i, \alpha_j^i\}$:

$$T_{j,j+1}^i(q_j^i) = \begin{pmatrix} c(\theta_j^i) & -s(\theta_j^i)c(\alpha_j^i) & s(\theta_j^i)c(\alpha_j^i) & a_j^i c(\theta_j^i) \\ s(\theta_j^i) & c(\theta_j^i)s(\alpha_j^i) & -c(\theta_j^i)s(\alpha_j^i) & a_j^i s(\theta_j^i) \\ 0 & s(\alpha_j^i) & c(\alpha_j^i) & r_j^i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.21})$$

On déduit alors de l'équation A.21 les trois matrices de passages suivantes :

$$T_{1,2}^i(\theta_1^i) = \begin{pmatrix} c(\theta_1^i) & 0 & s(\theta_1^i) & a_1 c(\theta_1^i) \\ s(\theta_1^i) & 0 & -c(\theta_1^i) & a_1 s(\theta_1^i) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.22})$$

$$T_{2,3}^i(\theta_2^i) = \begin{pmatrix} c(\theta_2^i) & -s(\theta_2^i) & 0 & a_2 c(\theta_2^i) \\ s(\theta_2^i) & c(\theta_2^i) & 0 & a_2 s(\theta_2^i) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.23})$$

$$T_{3,4}^i(\theta_3^i) = \begin{pmatrix} c(\theta_3^i) & -s(\theta_3^i) & 0 & a_3 c(\theta_3^i) \\ s(\theta_3^i) & c(\theta_3^i) & 0 & a_3 s(\theta_3^i) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.24})$$

Selon le formalisme de D-H, le modèle géométrique direct de la i -ème patte du robot est donné par la matrice de passage T^i :

$$T^i(q_1^i, q_2^i, q_3^i) = \prod_{j=1}^3 T_{j,j+1}^i(q_j^i) \quad (\text{A.25})$$

Ainsi, d'après les équations A.22, A.23 et A.24, on obtient la matrice de passage $T^i(\theta_1^i, \theta_2^i, \theta_3^i)$ de la patte i :

$$\begin{pmatrix} (c(\theta_2^i)c(\theta_3^i) - s(\theta_2^i)s(\theta_3^i))c(\theta_1^i) & -(c(\theta_2^i)s(\theta_3^i) - s(\theta_2^i)c(\theta_3^i))c(\theta_1^i) & s(\theta_1^i) & P_x^i \\ (c(\theta_2^i)c(\theta_3^i) - s(\theta_2^i)s(\theta_3^i))s(\theta_1^i) & -(c(\theta_2^i)s(\theta_3^i) - s(\theta_2^i)c(\theta_3^i))s(\theta_1^i) & -c(\theta_1^i) & P_y^i \\ c(\theta_2^i)s(\theta_3^i) - s(\theta_2^i)c(\theta_3^i) & c(\theta_2^i)c(\theta_3^i) - s(\theta_2^i)s(\theta_3^i) & 0 & P_z^i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.26})$$

où l'on détermine notamment la position cartésienne $P^i = {}^t(P_x^i, P_y^i, P_z^i)$:

$$\begin{cases} P_x^i = ((a_2 + a_3c(\theta_3^i))c(\theta_2^i) - a_3s(\theta_3^i)s(\theta_2^i) + a_1)c(\theta_1^i) \\ P_y^i = ((a_2 + a_3c(\theta_3^i))s(\theta_2^i) - a_3s(\theta_3^i)c(\theta_2^i) + a_1)s(\theta_1^i) \\ P_z^i = (a_2 + a_3c(\theta_3^i))s(\theta_2^i) + a_3s(\theta_3^i)c(\theta_2^i) \end{cases} \quad (\text{A.27})$$

L'orientation est quant à elle donnée par la matrice de rotation incluse dans la matrice de passage $T^i(\theta_1^i, \theta_2^i, \theta_3^i)$, correspondant aux trois premières lignes et colonnes.

A.1.4 Le modèle géométrique inverse

On considère à présent une situation opérationnelle x^i à atteindre. On note $T^{*,i}$ la matrice de passage désirée correspondante. Il s'agit alors d'inverser le modèle géométrique afin de trouver la configuration $\{\theta_1^i, \theta_2^i, \theta_3^i\}$ requise. On remarque qu'il existe *a fortiori* une infinité de solutions du fait des multiples configurations redondantes. On sait déjà que cette matrice peut s'écrire sous la forme :

$$T^{*,i} = \begin{pmatrix} s_x^i & n_x^i & a_x^i & P_x^i \\ s_y^i & n_y^i & a_y^i & P_y^i \\ s_z^i & n_z^i & a_z^i & P_z^i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.28})$$

où s^i , n^i et a^i forment la matrice de rotation induite par l'orientation de la situation opérationnelle x^i , et P^i correspond à la position de cette même situation. On calcule alors $\{\theta_1^i, \theta_2^i, \theta_3^i\}$ à l'aide des opérations décrites ci-après :

$$\begin{cases} T^{*,i} = T_{1,2}^i * T_{2,3}^i * T_{3,4}^i \\ T_{2,1}^i * T^{*,i} = T_{2,3}^i * T_{3,4}^i & \text{pour obtenir } \theta_1^i \\ T_{3,2}^i * T_{2,1}^i * T^{*,i} = T_{3,4}^i & \text{pour obtenir } \theta_2^i \text{ et } \theta_3^i \end{cases} \quad (\text{A.29})$$

Etant donné que les trois premières lignes et colonnes de la matrice homogène T^i définissent une matrice de rotation $R_{j-1,j}^i \in \mathbb{R}^3$, par définition orthogonale, on sait alors que $R_{j-1,j}^{i,-1} = {}^tR_{j-1,j}^i$, et donc on peut aisément définir la matrice de passage $T_{2,1}^i(\theta_1^i)$ inverse de $T_{1,2}^i(\theta_1^i)$:

$$T_{1,2}^i(\theta_1^i) = \begin{pmatrix} c(\theta_1^i) & 0 & s(\theta_1^i) & a_1c(\theta_1^i) \\ s(\theta_1^i) & 0 & -c(\theta_1^i) & a_1s(\theta_1^i) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow T_{2,1}^i(\theta_1^i) = \begin{pmatrix} c(\theta_1^i) & s(\theta_1^i) & 0 & \alpha \\ 0 & 0 & 1 & \beta \\ s(\theta_1^i) & -c(\theta_1^i) & 0 & \gamma \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.30})$$

On peut alors écrire :

$$T_{1,2}^i(\theta_1^i) * T_{2,1}^i(\theta_1^i) = I_4 \Rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \alpha c(\theta_1^i) + \gamma s(\theta_1^i) + a_1 c(\theta_1^i) \\ 0 & 1 & 0 & \alpha s(\theta_1^i) - \gamma c(\theta_1^i) + a_1 s(\theta_1^i) \\ 0 & 0 & 1 & \beta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = I_4 \quad (\text{A.31})$$

où I_4 est la matrice identité d'ordre 4. On peut alors en déduire que :

$$\begin{cases} \alpha c(\theta_1^i) + \gamma s(\theta_1^i) + a_1 c(\theta_1^i) = 0 & (l.1) \\ \alpha s(\theta_1^i) - \gamma c(\theta_1^i) + a_1 s(\theta_1^i) = 0 & (l.2) \\ \beta = 0 \end{cases} \quad (\text{A.32})$$

Une simple combinaison linéaire des lignes (l.1) et (l.2) permet alors de trouver les deux dernières inconnues :

$$c(\theta_1^i) * (l.1) + s(\theta_1^i) * (l.2) \Rightarrow \begin{cases} \alpha = -a_1 \\ \gamma = 0 \end{cases} \quad (\text{A.33})$$

Et finalement nous aboutissons à la matrice de passage inverse $T_{2,1}^i(\theta_1^i)$ ci-dessous :

$$T_{2,1}^i(\theta_1^i) = \begin{pmatrix} c(\theta_1^i) & s(\theta_1^i) & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ s(\theta_1^i) & -c(\theta_1^i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.34})$$

De la même manière on peut démontrer que :

$$T_{3,2}^i(\theta_2^i) = \begin{pmatrix} c(\theta_2^i) & s(\theta_2^i) & 0 & -a_2 \\ -s(\theta_2^i) & c(\theta_2^i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.35})$$

Alors, on obtient :

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} s_x^i c(\theta_1^i) + s_y^i s(\theta_1^i) & n_x^i c(\theta_1^i) + n_y^i s(\theta_1^i) & a_x^i c(\theta_1^i) + a_y^i s(\theta_1^i) & P_x^i c(\theta_1^i) + P_y^i s(\theta_1^i) - a_1 \\ & s_z^i & n_z^i & a_z^i \\ s_x^i s(\theta_1^i) - s_y^i c(\theta_1^i) & n_x^i s(\theta_1^i) - n_y^i c(\theta_1^i) & a_x^i s(\theta_1^i) - a_y^i c(\theta_1^i) & P_x^i s(\theta_1^i) - P_y^i c(\theta_1^i) \\ & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ = & \begin{pmatrix} c(\theta_2^i)c(\theta_3^i) - s(\theta_2^i)s(\theta_3^i) & -c(\theta_2^i)s(\theta_3^i) - s(\theta_2^i)c(\theta_3^i) & 0 & a_3(c(\theta_2^i)c(\theta_3^i) - s(\theta_2^i)s(\theta_3^i)) + a_2c(\theta_2^i) \\ s(\theta_2^i)c(\theta_3^i) + c(\theta_2^i)s(\theta_3^i) & c(\theta_2^i)c(\theta_3^i) - s(\theta_2^i)s(\theta_3^i) & 0 & a_3(s(\theta_2^i)c(\theta_3^i) + c(\theta_2^i)s(\theta_3^i)) + a_2s(\theta_2^i) \\ & 0 & 1 & 0 \\ & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (\text{A.36})$$

Ceci nous permet d'évaluer θ_1^i , sous réserve de non nullité de P_x^i :

$$\theta_1^i = \arctan\left(-\frac{P_y^i}{P_x^i}\right) \quad (\text{A.37})$$

En outre, si $P_x^i = 0$ alors $\theta_1^i = \pm 90^\circ$ selon le signe de P_y^i . De manière analogue, il est possible de déterminer θ_2^i et θ_3^i . On peut en effet écrire :

$$\begin{pmatrix} \xi_s^i c(\theta_2^i) + s_z^i s(\theta_2^i) & \xi_n^i c(\theta_2^i) + n_z^i s(\theta_2^i) & \xi_a^i c(\theta_2^i) + a_z^i s(\theta_2^i) & A^i c(\theta_2^i) + P_z^i s(\theta_2^i) - a_2 \\ -\xi_s^i s(\theta_2^i) + s_z^i c(\theta_2^i) & -\xi_n^i s(\theta_2^i) + n_z^i c(\theta_2^i) & -\xi_a^i s(\theta_2^i) + a_z^i c(\theta_2^i) & -A^i s(\theta_2^i) + P_z^i c(\theta_2^i) \\ s_x^i s(\theta_1^i) - s_y^i c(\theta_1^i) & n_x^i s(\theta_1^i) - n_y^i c(\theta_1^i) & a_x^i s(\theta_1^i) - a_y^i c(\theta_1^i) & P_x^i s(\theta_1^i) - P_y^i c(\theta_1^i) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c(\theta_3^i) & -s(\theta_3^i) & 0 & a_3 c(\theta_3^i) \\ s(\theta_3^i) & c(\theta_3^i) & 0 & a_3 s(\theta_3^i) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.38})$$

où l'on définit notamment :

$$\begin{cases} \xi_s^i = s_x^i c(\theta_1^i) + s_y^i s(\theta_1^i) \\ \xi_n^i = n_x^i c(\theta_1^i) + n_y^i s(\theta_1^i) \\ \xi_a^i = a_x^i c(\theta_1^i) + a_y^i s(\theta_1^i) \\ A^i = P_x^i c(\theta_1^i) + P_y^i s(\theta_1^i) - a_1 \end{cases} \quad (\text{A.39})$$

On remarque bien entendu la redondance des équations A.38 et A.36 concernant le calcul de θ_1^i . Afin de déterminer θ_2^i , on s'intéresse aux lignes 1 et 2 de la colonne 4 dans l'équation A.38 :

$$\begin{cases} a_3 c(\theta_3^i) = A^i c(\theta_2^i) + P_z^i s(\theta_2^i) - a_2 & (l.1) \\ a_3 c(\theta_3^i) = -A^i s(\theta_2^i) + P_z^i c(\theta_2^i) & (l.2) \end{cases} \quad (\text{A.40})$$

En effectuant le calcul suivant : $(l.1)^2 + (l.2)^2$, on obtient :

$$P_z^i s(\theta_2^i) + A^i c(\theta_2^i) = \frac{A^{i2} + P_z^{i2} - a_2^2}{2a_2} = K^i \in \mathbb{R} \quad (\text{A.41})$$

Pour déterminer une solution, on recourt aux formules de l'arc moitié en trigonométrie, faisant l'hypothèse que θ_2^i n'est jamais égal à $\frac{\pi}{2}$ en raison des contraintes géométriques et mécaniques du robot. On pose alors $t = \tan(\frac{\theta_2^i}{2})$ et ainsi l'équation A.41 devient :

$$\begin{cases} s(\theta_2^i) = \frac{2t}{1-t^2} \\ c(\theta_2^i) = \frac{1-t^2}{1+t^2} \end{cases} \Rightarrow P_z^i \frac{2t}{1-t^2} + A^i \frac{1-t^2}{1+t^2} = K^i \Rightarrow (A^i + K^i)t^2 - 2P_z^i t - (A^i + K^i) = 0 \quad (\text{A.42})$$

L'équation A.42 conduit alors trivialement aux solutions suivantes :

$$\theta_2^i = 2 \arctan\left(\frac{P_z^i \pm \sqrt{P_z^{i2} + (A^i + K^i)^2}}{A^i + K^i}\right) \quad (\text{A.43})$$

et

$$\theta_3^i = \arccos\left(\frac{A^i c(\theta_2^i) + P_z^i s(\theta_2^i) - a_1}{a_3}\right) \quad (\text{A.44})$$

A.2 Modèle dynamique du robot

A.2.1 Les hypothèses simplificatrices

On considère à nouveau la représentation schématique d'une patte donnée dans la figure A.1B-C. Pour la suite de l'étude, on suppose que :

- les corps qui composent la patte sont solides, c'est-à-dire non déformables ;
- chaque liaison est de type rotoïde ;
- chaque tronçon $k \in \{1, 2, 3\}$ de la patte est réduit à sa masse m_k , située à son extrémité.

On définit alors les énergies cinétique Ec_k^i et potentielle Ep_k^i du k -ème tronçon de la patte i du robot :

$$\forall k \in \{1, 2, 3\}, \begin{cases} Ec_k^i = \frac{1}{2}m_k V_k^{i2} \\ Ep_k^i = m_k g z_k^i \end{cases} \quad (\text{A.45})$$

En conséquence, les énergies cinétique Ec^i et potentielle Ep^i de la patte i sont données par la relation :

$$\forall i \in \{1, \dots, 6\}, \forall k \in \{1, 2, 3\}, \begin{cases} Ec^i = Ec_1^i + Ec_2^i + Ec_3^i \\ Ep^i = Ep_1^i + Ep_2^i + Ep_3^i \end{cases} \quad (\text{A.46})$$

Calcul de la vitesse du tronçon 1 : $V_1^{i2} = \dot{x}_1^{i2} + \dot{y}_1^{i2} + \dot{z}_1^{i2}$:

$$\begin{cases} x_1^i = -a_1 s(\theta_1^i) \\ y_1^i = a_0 + a_1 c(\theta_1^i) \\ z_1^i = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_1^i = -a_1 \dot{\theta}_1^i c(\theta_1^i) \\ \dot{y}_1^i = -a_1 \dot{\theta}_1^i s(\theta_1^i) \\ \dot{z}_1^i = 0 \end{cases} \quad (\text{A.47})$$

$$V_1^{i2} = a_1^2 \dot{\theta}_1^{i2} \quad (\text{A.48})$$

Calcul de la vitesse du tronçon 2 : $V_2^{i2} = \dot{x}_2^{i2} + \dot{y}_2^{i2} + \dot{z}_2^{i2}$:

$$\begin{cases} x_2^i = -a_1 s(\theta_1^i) \\ y_2^i = a_0 + a_1 c(\theta_1^i) + a_2 c(\theta_2^i) \\ z_2^i = a_2 s(\theta_2^i) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_2^i = -a_1 \dot{\theta}_1^i c(\theta_1^i) \\ \dot{y}_2^i = -a_1 \dot{\theta}_1^i s(\theta_1^i) - a_2 \dot{\theta}_2^i s(\theta_2^i) \\ \dot{z}_2^i = a_2 \dot{\theta}_2^i c(\theta_2^i) \end{cases} \quad (\text{A.49})$$

$$V_2^{i2} = a_1^2 \dot{\theta}_1^{i2} + a_2^2 \dot{\theta}_2^{i2} + 2a_1 a_2 \dot{\theta}_1^i \dot{\theta}_2^i s(\theta_1^i) s(\theta_2^i) \quad (\text{A.50})$$

Calcul de la vitesse du tronçon 3 : $V_3^{i2} = \dot{x}_3^{i2} + \dot{y}_3^{i2} + \dot{z}_3^{i2}$:

$$\begin{cases} x_3^i = -a_1 s(\theta_1^i) \\ y_3^i = a_0 + a_1 c(\theta_1^i) + a_2 c(\theta_2^i) + a_3 c(\theta_3^i) \\ z_3^i = a_2 s(\theta_2^i) + a_3 s(\theta_3^i) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_3^i = -a_1 \dot{\theta}_1^i c(\theta_1^i) \\ \dot{y}_3^i = -a_1 \dot{\theta}_1^i s(\theta_1^i) - a_2 \dot{\theta}_2^i s(\theta_2^i) - a_3 \dot{\theta}_3^i s(\theta_3^i) \\ \dot{z}_3^i = a_2 \dot{\theta}_2^i c(\theta_2^i) + a_3 \dot{\theta}_3^i c(\theta_3^i) \end{cases} \quad (\text{A.51})$$

$$V_3^{i2} = a_1^2 \dot{\theta}_1^{i2} + a_2^2 \dot{\theta}_2^{i2} + a_3^2 \dot{\theta}_3^{i2} + 2a_2 a_3 \dot{\theta}_2^i \dot{\theta}_3^i c(\theta_2^i - \theta_3^i) + 2a_1 \dot{\theta}_3^i s(\theta_1^i) (a_2 \dot{\theta}_2^i s(\theta_2^i) + a_3 \dot{\theta}_3^i s(\theta_3^i)) \quad (\text{A.52})$$

On en déduit alors chaque énergie cinétique Ec_k^i :

$$\begin{cases} Ec_1^i = \frac{1}{2}m_1a_1^2\dot{\theta}_1^{i2} \\ Ec_2^i = \frac{1}{2}m_2(a_1^2\dot{\theta}_1^{i2} + a_2^2\dot{\theta}_2^{i2} + 2a_1a_2\dot{\theta}_1^i\dot{\theta}_2^is(\theta_1^i)s(\theta_2^i)) \\ Ec_3^i = \frac{1}{2}m_3(a_1^2\dot{\theta}_1^{i2} + a_2^2\dot{\theta}_2^{i2} + a_3^2\dot{\theta}_3^{i2} + 2a_2a_3\dot{\theta}_2^i\dot{\theta}_3^ic(\theta_2^i - \theta_3^i) + 2a_1\dot{\theta}_3^is(\theta_1^i)(a_2\dot{\theta}_2^is(\theta_2^i) + a_3\dot{\theta}_3^is(\theta_3^i))) \end{cases} \quad (\text{A.53})$$

Enfin, les énergies potentielles Ep_k^i s'écrivent :

$$\begin{cases} Ep_1^i = 0 \\ Ep_2^i = m_2ga_2s(\theta_2^i) \\ Ep_3^i = m_3g(a_2s(\theta_2^i) + a_3s(\theta_3^i)) \end{cases} \quad (\text{A.54})$$

Ainsi :

$$\begin{aligned} Ec^i &= \frac{1}{2}[(m_1 + m_2 + m_3)a_1^2\dot{\theta}_1^{i2} + (m_2 + m_3)a_2^2\dot{\theta}_2^{i2} + m_3a_3^2\dot{\theta}_3^{i2}] \\ &\quad + (m_2 + m_3)a_1a_2\dot{\theta}_1^i\dot{\theta}_2^is(\theta_1^i)s(\theta_2^i) + m_3a_2a_3\dot{\theta}_2^i\dot{\theta}_3^ic(\theta_2^i - \theta_3^i) \\ &\quad + m_3a_1a_3\dot{\theta}_1^i\dot{\theta}_3^is(\theta_1^i)s(\theta_3^i) \end{aligned} \quad (\text{A.55})$$

$$Ep^i = g((m_2 + m_3)a_2s(\theta_2^i) + m_3a_3s(\theta_3^i)) \quad (\text{A.56})$$

A.2.2 Le formalisme d'Euler-Lagrange

D'après le formalisme d'Euler-Lagrange, l'équation différentielle régissant le mouvement de la patte dans l'espace articulaire est :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}(q^i, \dot{q}^i)}{\partial \dot{q}^i} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}(q^i, \dot{q}^i)}{\partial q^i} = \tau^i \quad (\text{A.57})$$

où $\tau^i \in \mathbb{R}^3$ représente la résultante des forces non-conservatives et des couples liés aux coordonnées articulaires $q^i = {}^t(\theta_1^i, \theta_2^i, \theta_3^i) \in \mathbb{R}^3$. Le lagrangien $\mathcal{L}(q^i, \dot{q}^i)$ est défini comme étant égal à la différence entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle :

$$\mathcal{L}(q^i, \dot{q}^i) = Ec^i(q^i, \dot{q}^i) - Ep^i(q^i) \quad (\text{A.58})$$

En substituant la définition du lagrangien dans le système d'équations A.57, on peut écrire que les équations du mouvement d'une patte à trois degrés de liberté sont données par :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial Ec^i(q^i, \dot{q}^i)}{\partial \dot{q}^i} \right) - \frac{\partial Ec^i(q^i, \dot{q}^i)}{\partial q^i} + \frac{\partial Ep^i(q^i, \dot{q}^i)}{\partial q^i} = \tau^i \quad (\text{A.59})$$

A.2.3 Liens avec le formalisme d'Einstein

Une simplification de l'écriture du système différentiel A.59 peut être faite au moyen du formalisme d'Einstein :

$$M(q^i)\ddot{q}^i + {}^t\dot{q}^i B(q^i)\dot{q}^i + G(q^i) = \tau^i \quad (\text{A.60})$$

où $M(q^i)$ est la matrice d'inertie de la i -ème patte, $B(q^i)$ tenseur de Christoffel, et $G(q^i)$ est le vecteur de gravité. Le tenseur de Christoffel permet de regrouper les termes liés aux forces de coriolis et aux effets centrifuges. On peut alors en déduire :

$$M(q^i) = \begin{pmatrix} (m_1 + m_2 + m_3)a_1^2 & (m_2 + m_3)a_1a_2s(\theta_1^i)s(\theta_2^i) & m_3a_1a_3s(\theta_1^i)s(\theta_3^i) \\ (m_2 + m_3)a_1a_2s(\theta_1^i)s(\theta_2^i) & (m_2 + m_3)a_2^2 & m_3a_2a_3c(\theta_2^i - \theta_3^i) \\ m_3a_1a_3s(\theta_1^i)s(\theta_3^i) & m_3a_2a_3c(\theta_2^i - \theta_3^i) & m_3a_3^2 \end{pmatrix} \quad (\text{A.61})$$

$$B(q^i) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & (m_2 + m_3)a_1a_2s(\theta_1^i)c(\theta_2^i) & 0 \\ 0 & 0 & m_3a_1a_3s(\theta_1^i)c(\theta_3^i) \\ (m_2 + m_3)a_1a_2c(\theta_1^i)s(\theta_2^i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3a_2a_3s(\theta_2^i - \theta_3^i) \\ m_3a_1a_3c(\theta_1^i)s(\theta_3^i) & 0 & 0 \\ 0 & -m_3a_2a_3s(\theta_2^i - \theta_3^i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{A.62})$$

$$G(q^i) = \begin{pmatrix} 0 \\ g(m_2 + m_3)a_2c(\theta_2^i) \\ gm_3a_3c(\theta_3^i) \end{pmatrix} \quad (\text{A.63})$$

On peut alors observer que le système différentiel A.60, donnant les équations du mouvement d'une patte à trois liaisons rotoïdes, est linéaire en $\ddot{q} = \{\ddot{\theta}_1^i, \ddot{\theta}_2^i, \ddot{\theta}_3^i\}$, quadratique par rapport aux vitesses angulaires $\dot{q} = \{\dot{\theta}_1^i, \dot{\theta}_2^i, \dot{\theta}_3^i\}$, et non-linéaire par rapport à q .

B Vue CAO du robot Hexabot



FIGURE B.1 – Vue CAO du robot Hexabot.

C L'intégration de chemin à l'échelle neuronale

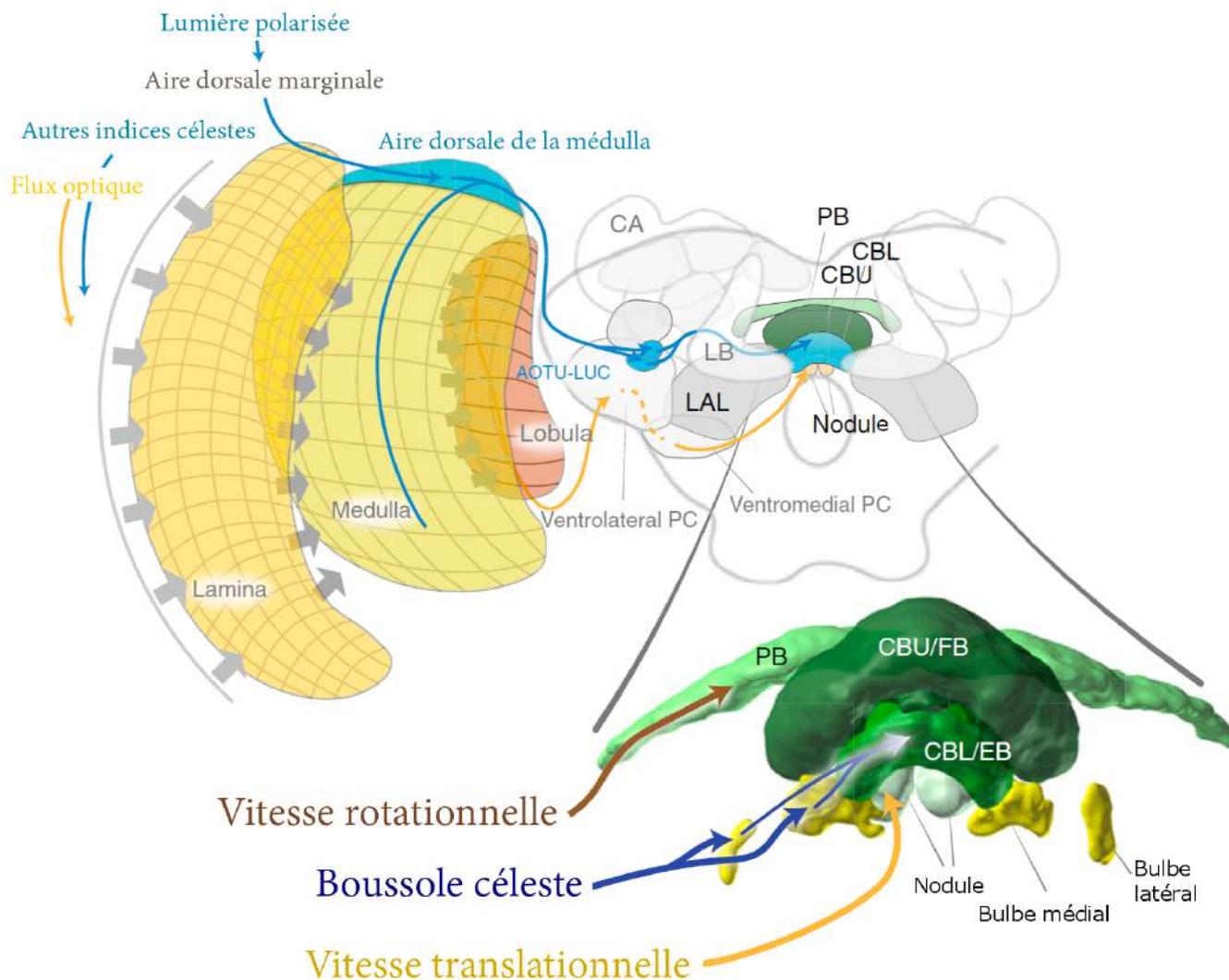


FIGURE C.1 – Traitement des informations de navigation dans le cerveau de l'insecte. La lumière polarisée est détectée par les ommatidies de la DRD de l'œil composé ; les indices célestes restants tels que la position du soleil et le gradient de couleur sont perçus par le reste de la rétine. L'ensemble de ces indices optiques convergent alors vers le corps central (CBL, *central body* ; itinéraire bleu). D'après des études menées chez l'abeille *Megalopta genalis*, le flux optique translationnel est envoyé vers le complexe central à travers la lobula (itinéraire orange) [224]. Enfin, il a été observé sur les drosophiles que les vitesses rotationnelles sont envoyées vers le pont protocérébral (PB). Adapté de [99].

D Implémentation électronique du compas céleste

En vue d'une intégration du capteur au robot, une carte électronique permettant de piloter le moteur pas-à-pas a été conçue par Marc Boyron, ingénieur CNRS en électronique, afin d'être connectée à la carte Raspberry Pi 2 qui contrôle l'ensemble du robot.

Alimentation

- Entrée : 12V DC max (tension du moteur pas-à-pas)
- Un convertisseur 5V assure l'alimentation pour la Raspberry Pi

Signaux de contrôle (moteur)

Ces signaux proviennent du connecteur 'Raspberry Pi'.

- DIR : sens de rotation du moteur
- STEP : vitesse de rotation du moteur (signal carré de fréquence variable)
- MS1 : sélection format "Microstep" (Tab. D.1)
- MS2 : sélection format "Microstep" (Tab. D.1)

MS1	MS2	Résolution
L (0)	L (0)	Pas entier
H (1)	L (0)	Demi pas
L (0)	H (1)	Quart de pas
H (1)	H (1)	Huitième de pas

TABLEAU D.1 – Table de vérité de la résolution des pas. *L* : état bas ; *H* : état haut.

Implantation des composants

Les photodiodes du compas céleste (SG01D18 - *SgLux*) n'ayant qu'une seule adresse I2C, il a été nécessaire d'utiliser un *switch* pour dialoguer alternativement avec l'une ou l'autre. Le composant repéré "U3" est un *switch* I2C à deux voies. Son adresse I2C est : b111 0000. Une écriture sur le registre de contrôle permet de sélectionner la voie active ([B0] et B1). Ainsi :

- B0 = 1 (B1 = 0) : la voie 0 est sélectionnée
- B1 = 1 (B0 = 0) : la voie 1 est sélectionnée

La carte électronique comporte 6 entrées/sorties en plus de l'interface avec la Raspberry Pi 2 (Fig. D.1 et D.2). Deux entrées I2C, nommées I2C_UV0 et I2C_UV1 sont connectées avec le *switch* U3. Deux autres entrées I2C, nommées I2C_1 et I2C_2, sont prévues pour des utilisations ultérieures. Le port UART a été initialement implanté en vue d'une communication avec le capteur de flux optique PX4Flow, lequel a finalement été abandonné au profit du M²APix dont la connection avec la raspberry se fait par port USB. Enfin, le connecteur du moteur pas-à-pas permet l'alimentation et le contrôle de celui-ci.

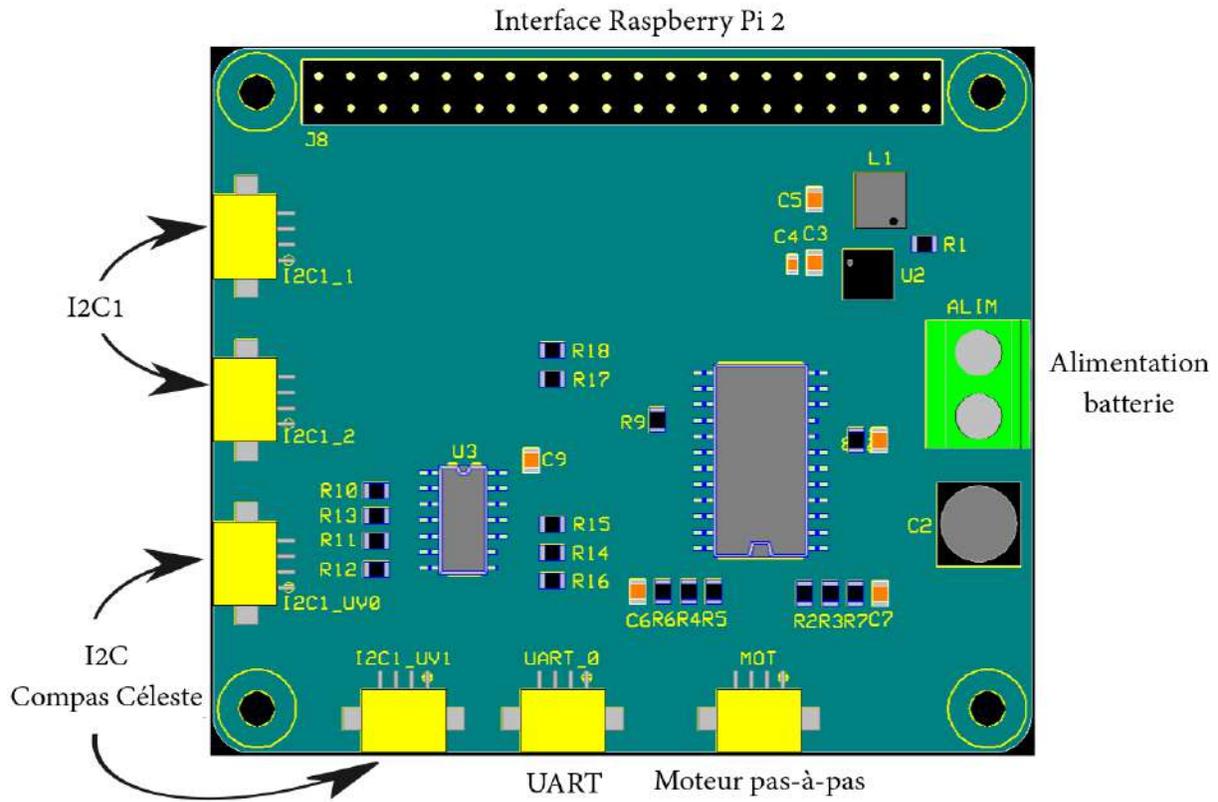


FIGURE D.1 – Implantation des composants du contrôleur du compas céleste.

<i>I2C1_1</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Bus I2C1	+5V	SCL	SDA	0V
<i>I2C1_2</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Bus I2C1	+5V	SCL	SDA	0V
<i>I2C1_UV0</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Bus I2C1 (Switch)	+5V	SDA	SCL	0V
<i>I2C1_UV1</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Bus I2C1 (Switch)	+5V	SDA	SCL	0V
<i>UART_0</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Bus UART0	+5V	TXD	RXD	0V
<i>MOT</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Moteur PaP	2B	2A	1A	2B

FIGURE D.2 – Connections externes du contrôleur du moteur pas-à-pas.

E Analyse de la marche du robot Hexabot

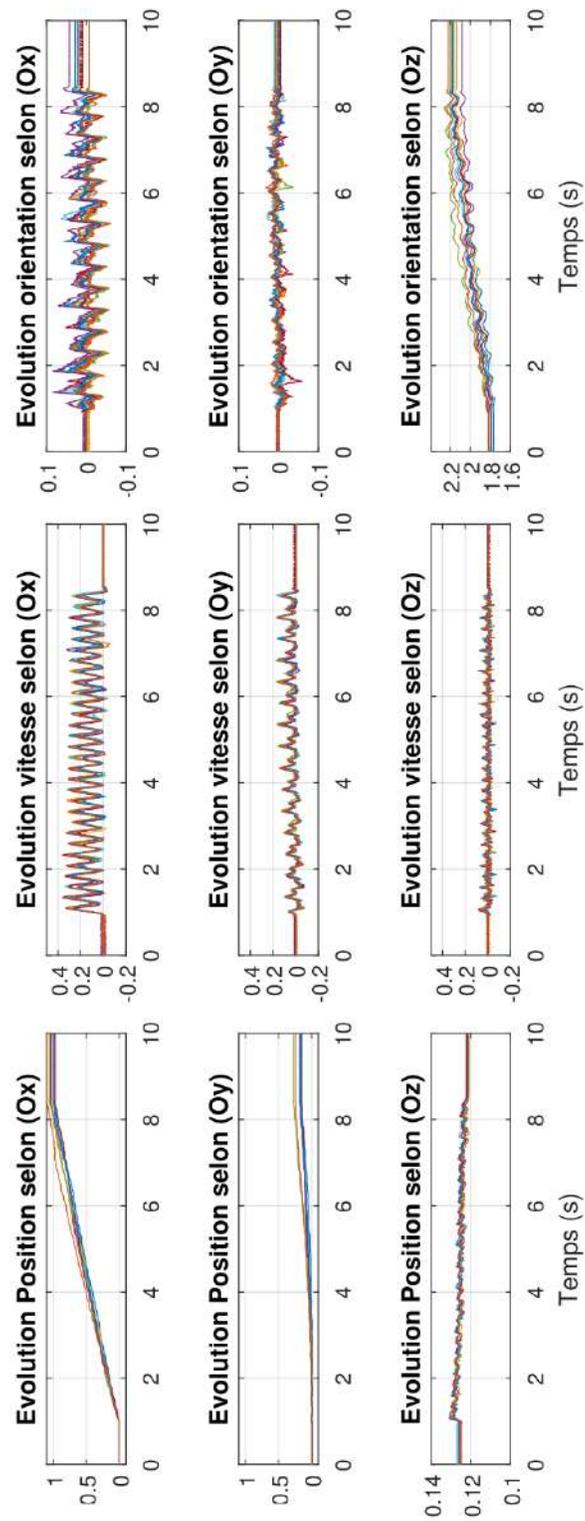


FIGURE E.1 – Analyse de la marche - $V = 13.6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ et $H = 80$ ($n = 9$). Les positions sont données en m ; les vitesses en $m \cdot \text{s}^{-1}$; les orientations ((Ox) : roulis, (Oy) : tangage, (Oz) : lacet) en rad . $FREQ = 2.0$.

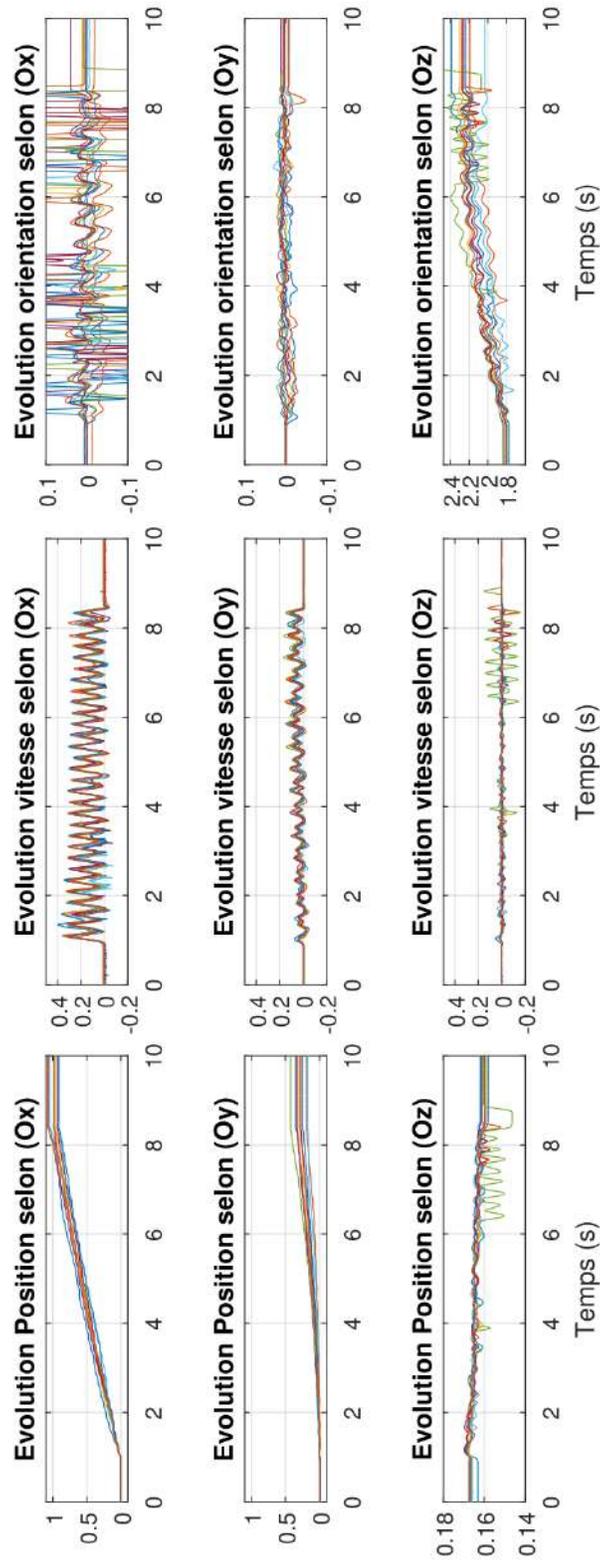


FIGURE E.2 – Analyse de la marche - $V = 13.2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ et $H = 120$ ($n = 9$). Les positions sont données en m ; les vitesses en $m \cdot \text{s}^{-1}$; les orientations ((Ox) : roulis, (Oy) : tangage, (Oz) : lacet) en rad . $FREQ = 2.0$.

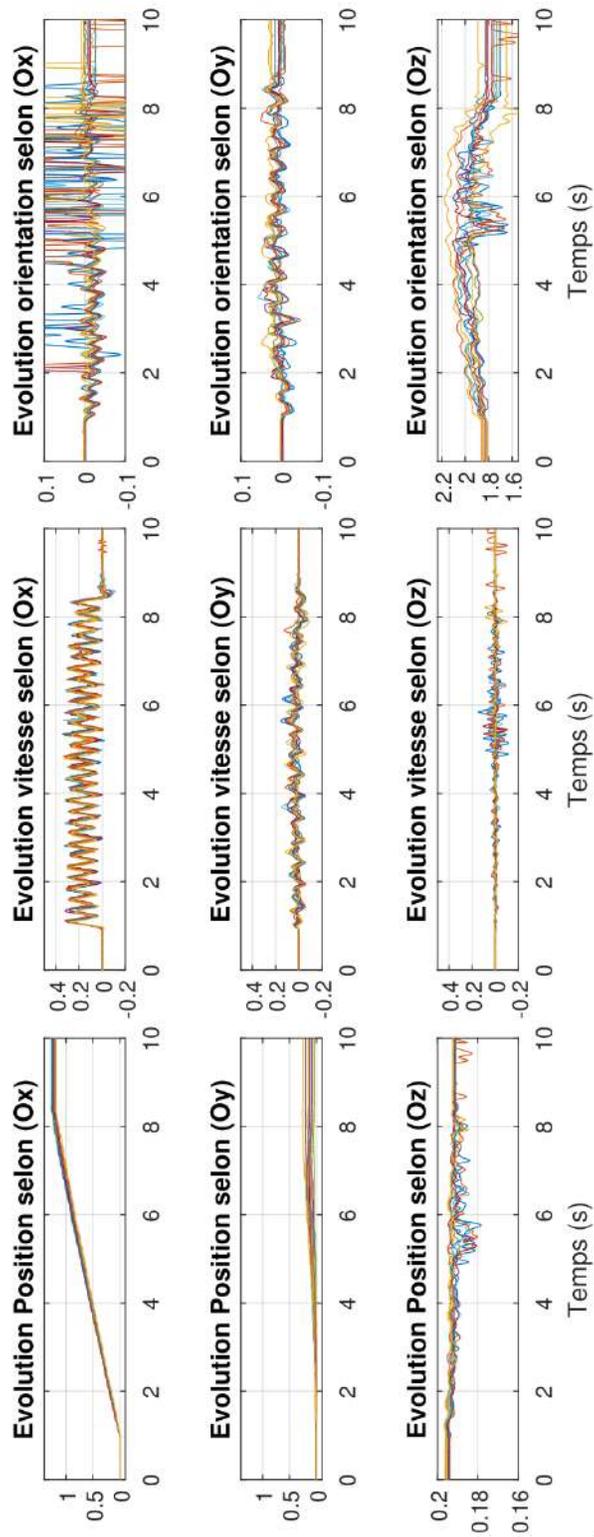


FIGURE E.3 – Analyse de la marche - $V = 16.9 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ et $H = 145$ ($n = 9$). Les positions sont données en m ; les vitesses en $m \cdot \text{s}^{-1}$; les orientations ((Ox) : roulis, (Oy) : tangage, (Oz) : lacet) en rad . $FREQ = 2.0$.

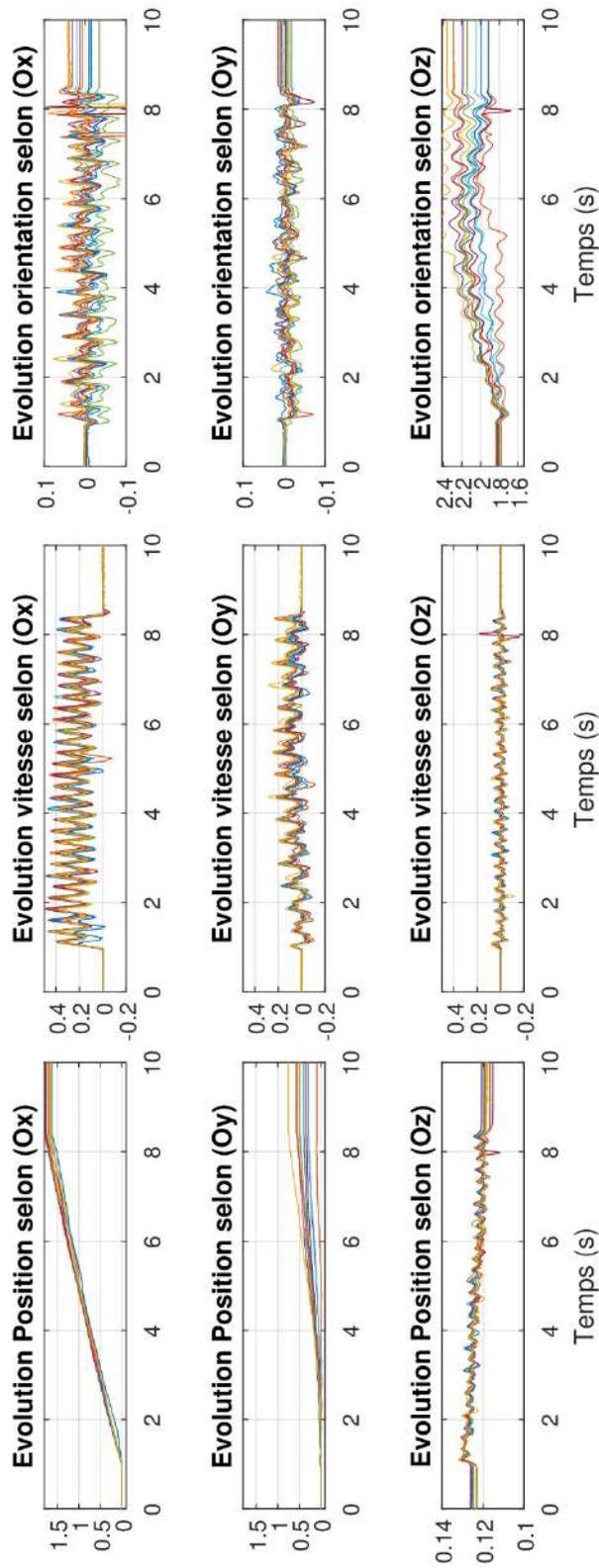


FIGURE E.4 – Analyse de la marche - $V = 23.1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ et $H = 80$ ($n = 10$). Les positions sont données en m ; les vitesses en $m \cdot \text{s}^{-1}$; les orientations ((Ox) : roulis, (Oy) : tangate, (Oz) : lacet) en rad . $FREQ = 2.0$.

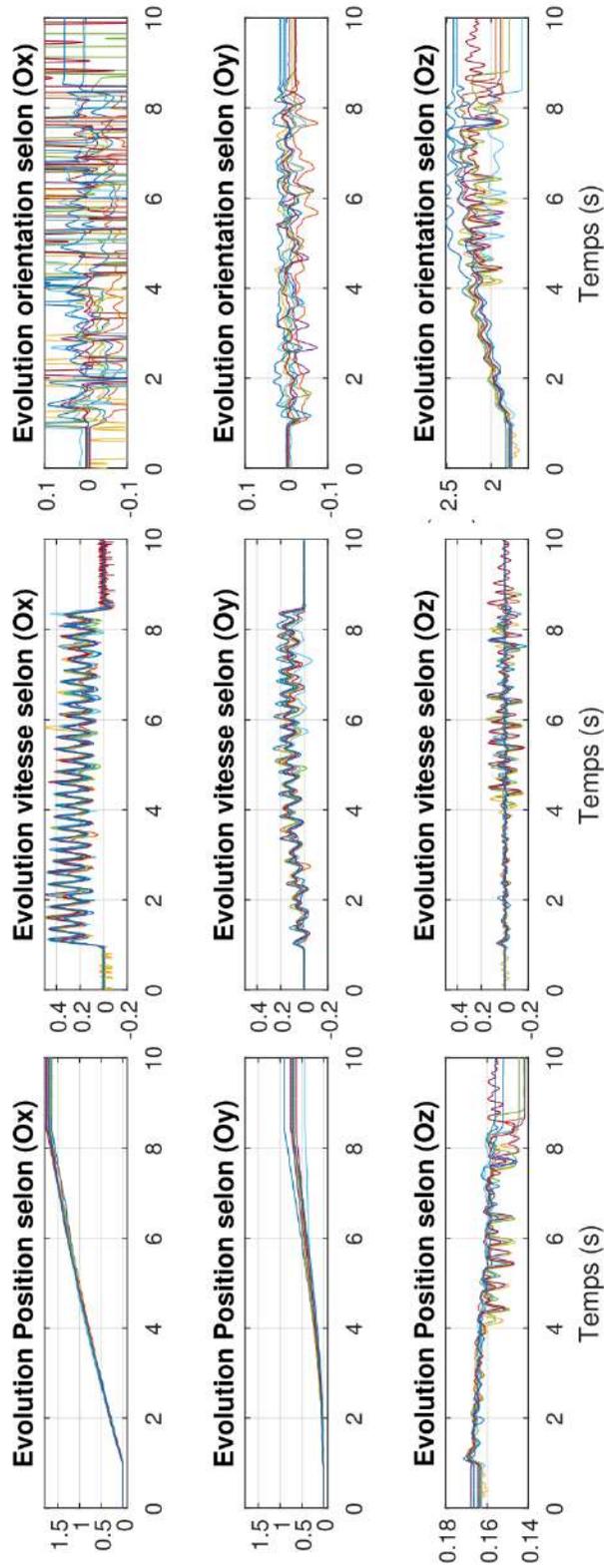


FIGURE E.5 – Analyse de la marche - $V = 23.1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ et $H = 120$ ($n = 9$). Les positions sont données en m ; les vitesses en $m \cdot \text{s}^{-1}$; les orientations ((Ox) : roulis, (Oy) : tangate, (Oz) : lacet) en rad . $FREQ = 2.0$.

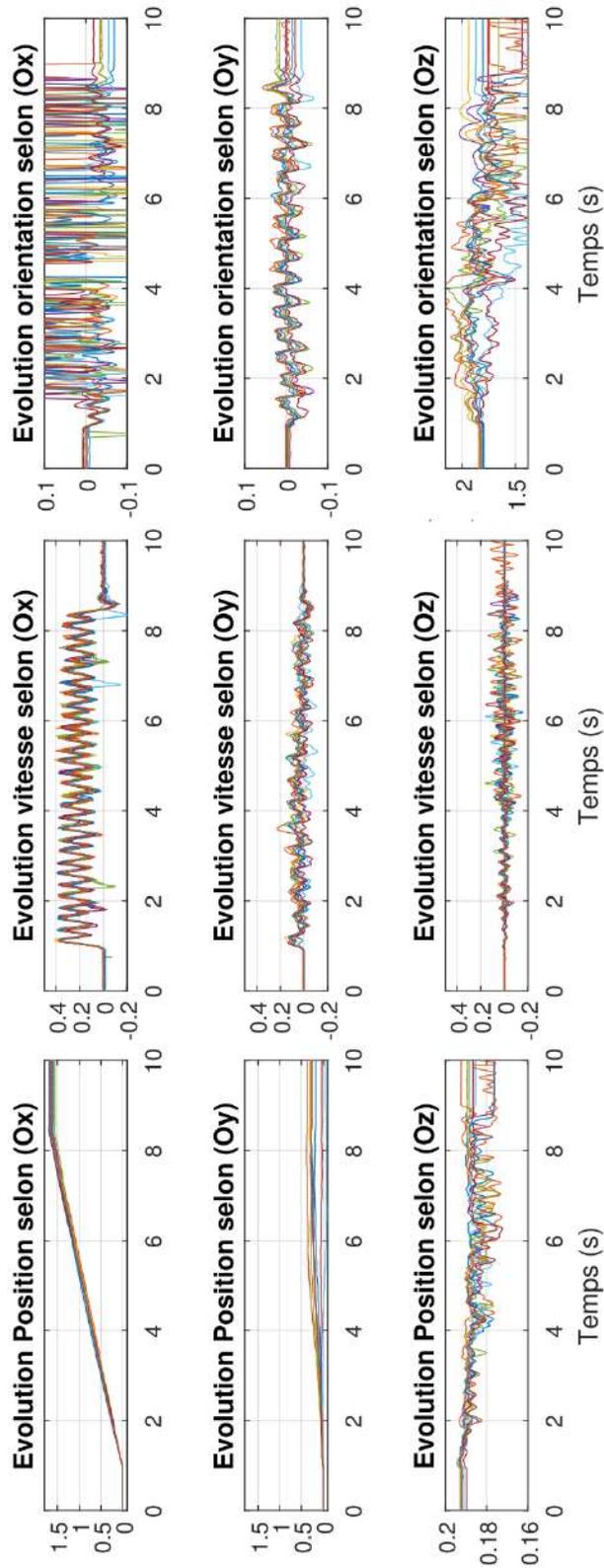


FIGURE E.6 – Analyse de la marche - $V = 21.8 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ et $H = 145$ ($n = 8$). Les positions sont données en m ; les vitesses en $m \cdot \text{s}^{-1}$; les orientations ((Ox) : roulis, (Oy) : tangate, (Oz) : lacet) en rad . $FREQ = 2.0$.

F Démonstration de la formule de calcul de l'angle de polarisation

Il s'agit ici de démontrer la formule donnant la valeur de l'angle de polarisation $\psi \in [0^\circ; 180^\circ[$ à partir de la fonction P :

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

En prenant pour référence le minimum local de P situé sur $[0^\circ; 180^\circ[$ (i.e. sur $\llbracket 1..N/2 \rrbracket$), on peut écrire que :

$$\Delta\psi \cdot \arg \min_{i \in [1..N/2]} P_i = \psi \quad (\text{F.2})$$

Entraînant alors :

$$\Delta\psi \cdot \arg \min_{i \in [N/2+1..N]} P_i = \psi + 180^\circ \quad (\text{F.3})$$

Il est alors possible de définir les deux autres parties de l'équation F.1 en fonction de la position du maximum de P sur $[0^\circ; 180^\circ[$ par rapport à ψ . En particulier :

$$\Delta\psi \cdot \arg \max_{i \in [1..N/2]} P_i = \begin{cases} \psi + 90^\circ & \text{si le maximum est localisé **avant** } \psi \\ \psi - 90^\circ & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{F.4})$$

En conséquence, on a :

$$\Delta\psi \cdot \arg \max_{i \in [N/2+1..N]} P_i = \begin{cases} \psi + 90^\circ + 180^\circ = \psi + 270^\circ & \text{si le maximum est localisé **avant** } \psi \\ \psi - 90^\circ + 180^\circ = \psi + 90^\circ & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{F.5})$$

Enfin, on constate que quelle que soit la position du maximum local par rapport au minimum local sur l'intervalle $[0^\circ; 180^\circ[$, on obtient :

$$\Delta\psi \cdot \left(\arg \min_{i \in [1..N/2]} P_i + \arg \min_{i \in [N/2+1..N]} P_i + \arg \max_{i \in [1..N/2]} P_i + \arg \max_{i \in [N/2+1..N]} P_i \right) = 4 \cdot \psi + 180^\circ \quad (\text{F.6})$$

D'où l'équation F.1.

G Panneaux texturés utilisés pour la génération du flux optique

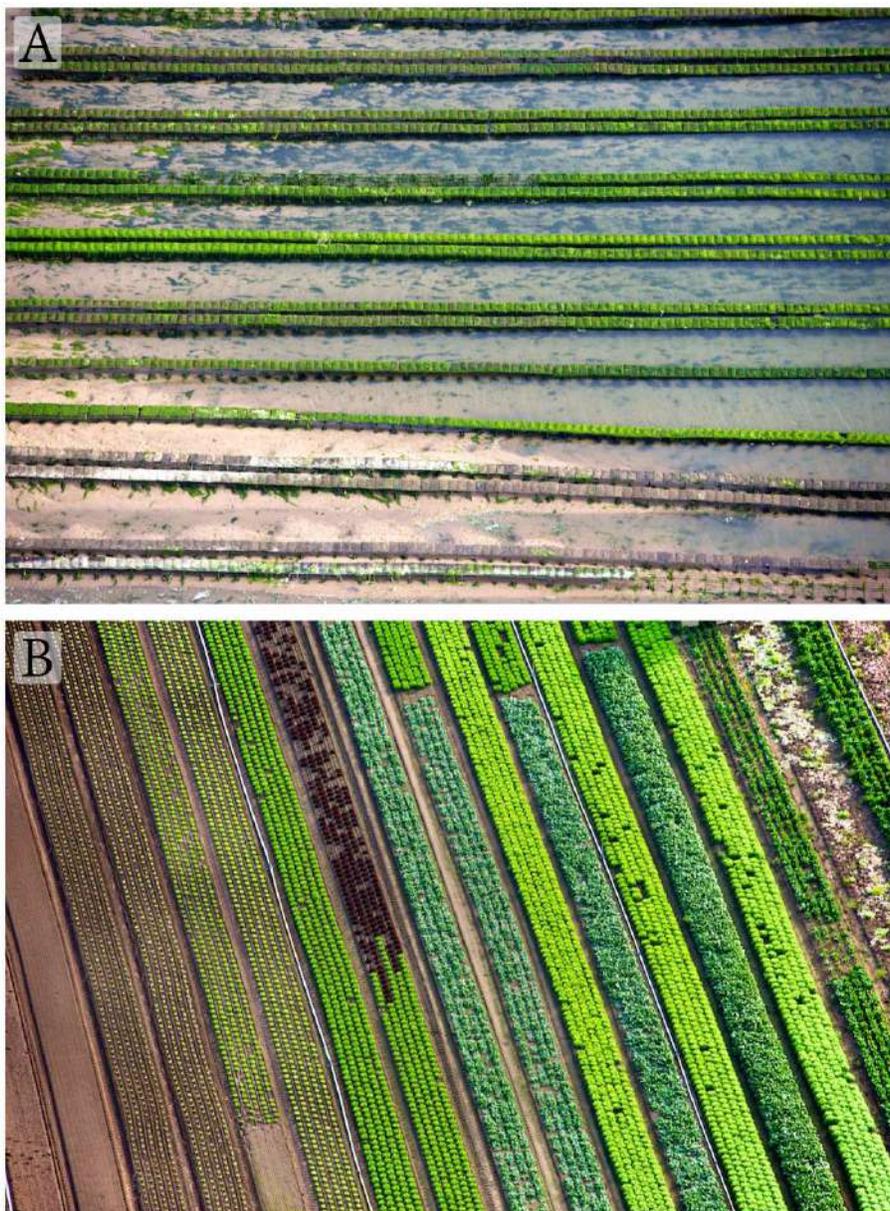


FIGURE G.1 – Photographie des panneaux texturés. Ces panneaux ont été utilisés pour générer du flux optique lors des expériences en intérieur et en extérieur, et ainsi permettre une comparaison quantitative fiable et non biaisée des modes de navigation. Chaque panneau mesure $3\text{ m} \times 2\text{ m}$. **A** Vue du ciel d'un parc à huîtres. **B** Vue du ciel d'un champs de légumes (salades).

H Résultats obtenus avec le mode PI-ST

Day and time	UV	Weather	G.T. Homing error	Robot's Homing error	G.T. Homing distance	Robot's Homing distance	Homing Success
First 20 experiments (on the same trajectory)							
01/05	-	-	27.7	0.1	176.8	190.2	No
01/05	-	-	38.1	0.1	208.5	190.2	No
01/05	-	-	26.5	0.1	196.4	190.2	No
01/05	-	-	42.2	0.1	202.4	190.2	No
01/05	-	-	44.5	0.1	204.9	190.2	No
01/05	-	-	51.7	0.1	174.5	190.2	No
01/05	-	-	40.1	0.1	182.8	190.2	No
01/05	-	-	41.1	0.1	189.5	190.2	No
01/05	-	-	53.8	0.1	192.8	190.2	No
01/05	-	-	58.5	0.1	176.5	190.2	No
01/06	-	-	68.0	0.1	162.3	190.2	No
01/06	-	-	51.4	0.1	171.8	190.2	No
01/06	-	-	51.3	0.1	174.8	190.2	No
01/06	-	-	48.4	0.1	177.7	190.2	No
01/06	-	-	51.2	0.1	178.5	190.2	No
01/06	-	-	55.6	0.1	166.9	190.2	No
01/06	-	-	65.7	0.1	156.7	190.2	No
01/06	-	-	44.2	0.1	160.1	190.2	No
01/06	-	-	48.8	0.1	171.8	190.2	No
01/06	-	-	51.8	0.1	169.5	190.2	No
5 random trajectories							
01/20	-	-	73.6	4.0	283.5	260.1	No
01/20	-	-	37.9	5.6	101.9	93.6	No
01/20	-	-	132.0	4.5	450.4	446.8	No
01/20	-	-	108.2	2.3	272.5	256.4	No
01/20	-	-	27.8	5.3	44.0	29.8	No
10-checkpoint trajectory							
02/15	-	-	171.1	4.2	265.2	234.3	No
Results							
Homing error: RMSE robot vs. G.T.			Homing distance: RMSE robot vs. G.T.			Homing success rate	
65.0cm			18.0cm			0%	

FIGURE H.1 – Ce mode de navigation a été testé en estimant l'angle de cap et la distance parcourue uniquement à partir de l'intégration des foulées. Les performances sont données ici en termes de distance de retour (distance à parcourir pour rejoindre la cible – *Homing Distance*), d'erreur finale de positionnement (*Homing Error*), et de succès retour (si le centre de gravité du robot se trouve à moins de 22.5 cm de la cible – *Homing Success*). Les initiales G.T. (*Ground Truth*) font référence à la vérité terrain (VICON). L'erreur (moindres carrés) entre la réalité terrain et le mode de navigation sont également donnés en bas du tableau. Toutes les distances sont données en centimètres.

I Résultats obtenus avec le mode PI-OF-ST

Day and time	UV	Weather	G.T. Homing error	Robot's Homing error	G.T. Homing distance	Robot's Homing distance	Homing Success
First 20 experiments (on the same trajectory)							
01/07	-	-	41,1	6,2	211,9	217,0	No
01/07	-	-	38,7	1,0	194,3	192,6	No
01/07	-	-	30,4	5,3	181,8	196,1	No
01/07	-	-	38,8	3,2	198,4	183,2	No
01/07	-	-	39,9	8,2	201,3	205,7	No
01/07	-	-	13,9	1,9	192,6	207,6	Yes
01/07	-	-	22,3	2,0	192,8	206,8	Yes
01/07	-	-	32,4	6,9	185,6	202,2	No
01/07	-	-	29,0	1,8	187,8	210,8	No
01/07	-	-	44,8	3,9	201,6	184,1	No
01/08	-	-	49,3	2,5	205,1	188,2	No
01/08	-	-	34,4	6,9	204,5	203,8	No
01/08	-	-	14,6	7,8	195,2	229,3	Yes
01/08	-	-	28,8	5,1	198,7	200,3	No
01/08	-	-	3,4	1,9	186,4	184,2	Yes
01/08	-	-	39,9	2,9	204,8	192,7	No
01/08	-	-	46,3	4,8	205,0	184,3	No
01/08	-	-	18,3	6,7	188,3	198,4	Yes
01/08	-	-	40,9	3,1	176,6	195,0	No
01/08	-	-	34,6	2,8	183,7	195,7	No
5 random trajectories							
01/20	-	-	63,8	2,9	265,0	237,6	No
01/20	-	-	65,1	7,3	130,6	113,2	No
01/20	-	-	156,5	4,8	438,7	428,8	No
01/20	-	-	116,5	2,4	274,0	239,6	No
01/20	-	-	19,5	1,0	42,1	35,7	Yes
10-checkpoint trajectory							
02/15	-	-	18,9	6,8	218,5	232,4	Yes
Results							
Homing error: RMSE robot vs. G.T.			Homing distance: RMSE robot vs. G.T.			Homing success rate	
48.8cm			16.6cm			26.9%	

FIGURE I.1 – Ce mode de navigation a été testé en estimant l’angle de cap à partir de l’intégration des foulées, et la distance parcourue à partir du flux optique. Les performances sont données ici en termes de distance de retour (distance à parcourir pour rejoindre la cible – *Homing Distance*), d’erreur finale de positionnement (*Homing Error*), et de succès retour (si le centre de gravité du robot se trouve à moins de 22.5 cm de la cible – *Homing Success*). Les initiales G.T. (*Ground Truth*) font référence à la vérité terrain (VICON). L’erreur (moindres carrés) entre la réalité terrain et le mode de navigation sont également donnés en bas du tableau. Toutes les distances sont données en centimètres.

J Résultats obtenus avec le mode PI-ST-Fuse

Day and time	UV	Weather	G.T. Homing error	Robot's Homing error	G.T. Homing distance	Robot's Homing distance	Homing Success
First 20 experiments (on the same trajectory)							
01/09	-	-	47,3	2,6	201,2	183,6	No
01/09	-	-	36,7	3,9	198,0	191,3	No
01/09	-	-	33,9	3,9	208,3	198,0	No
01/09	-	-	33,3	4,9	197,1	197,4	No
01/09	-	-	30,0	5,0	184,6	192,2	No
01/09	-	-	39,5	5,5	205,0	191,8	No
01/09	-	-	44,0	5,0	208,1	198,1	No
01/09	-	-	31,0	6,4	203,6	204,4	No
01/09	-	-	43,0	5,9	192,3	190,2	No
01/09	-	-	31,1	8,1	189,2	194,8	No
01/10	-	-	47,7	2,5	196,3	182,8	No
01/10	-	-	21,6	5,6	178,2	187,4	Yes
01/10	-	-	37,4	2,2	201,7	194,8	No
01/10	-	-	48,7	4,7	201,6	183,4	No
01/10	-	-	46,6	7,4	203,6	188,1	No
01/10	-	-	44,2	7,9	196,0	196,4	No
01/10	-	-	44,0	7,4	190,1	201,3	No
01/10	-	-	49,5	7,5	192,9	188,1	No
01/10	-	-	29,1	2,9	173,0	196,3	No
01/10	-	-	41,9	5,4	181,8	193,4	No
5 random trajectories							
01/20	-	-	53,8	2,9	260,4	270,0	No
01/20	-	-	27,3	2,4	91,3	94,4	No
01/20	-	-	148,0	4,2	440,3	456,0	No
01/20	-	-	132,2	7,7	277,1	265,1	No
01/20	-	-	10,2	3,5	38,5	35,4	Yes
10-checkpoint trajectory							
02/15	-	-	46,4	2,8	240,1	227,4	No
Results							
Homing error: RMSE robot vs. G.T.			Homing distance: RMSE robot vs. G.T.			Homing success rate	
50.1cm			11.1cm			7.7%	

FIGURE J.1 – Ce mode de navigation a été testé en estimant l'angle de cap à partir de l'intégration des foulées, et la distance parcourue à partir des foulées et du flux optique. Les performances sont données ici en termes de distance de retour (distance à parcourir pour rejoindre la cible – *Homing Distance*), d'erreur finale de positionnement (*Homing Error*), et de succès retour (si le centre de gravité du robot se trouve à moins de 22.5 cm de la cible – *Homing Success*). Les initiales G.T. (*Ground Truth*) font référence à la réalité terrain (VICON). L'erreur (moindres carrés) entre la vérité terrain et le mode de navigation sont également donnés en bas du tableau. Toutes les distances sont données en centimètres.

K Résultats obtenus avec le mode PI-POL-ST

Day and time	UV	Weather	G.T. Homing error	Robot's Homing error	G.T. Homing distance	Robot's Homing distance	Homing Success
First 20 experiments (on the same trajectory)							
01/12 9:45am	1.0	Clear	14,7	7,9	177,7	150,8	Yes
01/12 10:10am	1.0	Clear	7,6	6,5	171,4	167,6	Yes
01/12 10:35am	1.0	Clear	27,2	2,8	163,3	172,9	No
01/17 11:00am	1.3	Clear	17,7	7,1	160,9	153,4	Yes
01/17 11:35am	1.3	Clear	31,9	0,6	151,8	139,1	No
01/17 11:55am	1.3	Clear	23,1	2,1	131,7	160,7	No
01/11 2:00pm	1.0	Clear	28,8	4,5	173,2	154,2	No
01/18 9:15am	1.4	Clear	17,5	2,8	164,2	148,4	Yes
01/18 9:40am	1.4	Clear	8,8	2,7	164,2	156,3	Yes
01/18 10:05am	1.4	Clear	18,2	4,4	153,6	142,4	Yes
01/18 10:25am	1.4	Clear	27,6	2,8	144,7	132,6	No
01/18 11:00am	1.4	Clear	19,8	3,9	155,5	149,9	Yes
01/18 1:50pm	1.4	Clear	11,9	4,9	158,7	159,6	Yes
01/18 2:35pm	1.4	Clear	16,6	6,3	155,0	148,6	Yes
01/18 2:55pm	1.4	Clear	15,2	5,0	147,5	142,9	Yes
01/18 3:15pm	1.4	Clear	21,7	7,7	154,8	144,7	Yes
01/18 3:35pm	1.4	Clear	24,0	5,2	160,6	149,6	No
01/18 3:50pm	1.4	Clear	26,5	3,9	141,3	133,7	No
01/18 4:10pm	1.4	Clear	25,0	7,1	160,6	149,1	No
01/19 2:05pm	1.4	Clear	12,8	0,7	167,6	160,9	Yes
5 random trajectories							
02/09 2:15pm	1.6	Clear	19,2	2,7	291,3	271,5	Yes
02/09 2:45pm	1.6	Clear	30,9	7,9	139,7	125,1	No
02/09 3:10pm	1.6	Clear	13,7	1,8	413,5	434,0	Yes
02/09 3:35pm	1.6	Clear	33,7	3,6	299,0	268,8	No
02/13 2:30pm	1.5	Cloudy	20,6	3,8	99,6	92,7	Yes
10-checkpoint trajectory							
02/14 10:35am	1.5	Clear	53,6	1,6	322,8	296,8	No
Results							
Homing error: RMSE robot vs. G.T.			Homing distance: RMSE robot vs. G.T.			Homing success rate	
20.3cm			15.3cm			57.7%	

FIGURE K.1 – Ce mode de navigation a été testé en estimant l'angle de cap à partir du compas céleste, et la distance parcourue à partir des foulées. Les performances sont données ici en termes de distance de retour (distance à parcourir pour rejoindre la cible – *Homing Distance*), d'erreur finale de positionnement (*Homing Error*), et de succès retour (si le centre de gravité du robot se trouve à moins de 22.5 cm de la cible – *Homing Success*). Les initiales G.T. (*Ground Truth*) font référence à la vérité terrain (suivi vidéo). L'erreur (moindres carrés) entre la réalité terrain et le mode de navigation sont également donnés en bas du tableau. Toutes les distances sont données en centimètres.

L Résultats obtenus avec le mode PI-Full

Day and time	UV	Weather	G.T. Homing error	Robot's Homing error	G.T. Homing distance	Robot's Homing distance	Homing Success
First 20 experiments (on the same trajectory)							
01/31 11:40am	1.6	Clear – 8300Lux	12.2	3.0	168.4	162.3	Yes
01/31 12:00am	1.6	Clear – 8700Lux	7.4	1.4	157.9	148.8	Yes
02/07 9:50am	1.5	Clear – 7100Lux	4.9	1.7	185.5	167.8	Yes
02/04 4:00pm	1.5	Clear – 9000Lux	8.0	2.6	141.0	139.1	Yes
01/22 2:50pm	1.4	Cloudy – 6500Lux	10.1	5.7	166.0	159.8	Yes
02/07 10:15am	1.5	Clear – 8000Lux	2.5	7.1	121.9	123.2	Yes
02/07 2:00pm	1.5	Clear – 147000Lux	4.7	5.3	186.6	171.5	Yes
01/23 2:30pm	1.3	Clear – 9450Lux	10.6	1.6	181.8	190.3	Yes
02/07 14:55pm	1.5	Clear – 127000Lux	5.3	6.8	187.4	183.3	Yes
01/23 3:15pm	1.3	Clear – 8050Lux	9.6	5.1	176.4	182.6	Yes
02/08 13:30pm	1.5	Clear – 135000Lux	6.4	7.2	167.2	175.0	Yes
01/23 3:55pm	1.3	Clear – 6100Lux	5.5	7.0	183.1	188.0	Yes
02/08 3:00pm	1.5	Clear – 116000Lux	4.6	2.9	160.6	139.1	Yes
01/24 3:05pm	1.4	Cloudy – 8000Lux	7.7	2.4	146.2	155.9	Yes
01/24 3:35pm	1.4	Cloudy – 5500Lux	8.9	4.5	174.0	167.1	Yes
01/28 2:40pm	1.4	Clear – 7700Lux	13.6	3.3	183.6	192.6	Yes
02/08 3:25pm	1.5	Clear – 110000Lux	6.9	3.7	176.5	163.3	Yes
01/31 10:30am	1.6	Clear – 7500Lux	3.0	4.3	172.7	171.2	Yes
01/31 11:00am	1.6	Clear – 7800Lux	1.2	7.7	173.9	167.5	Yes
01/31 11:20am	1.6	Clear – 8000Lux	7.1	5.4	172.4	165.2	Yes
5 random trajectories							
02/14 2:50pm	1.5	Cloudy – 82000Lux	4.1	6.9	303.6	311.5	Yes
02/14 3:15pm	1.5	Cloudy – 76000Lux	5.4	0.7	120.3	115.4	Yes
02/14 3:45pm	1.5	Cloudy – 23000Lux	7.8	8.0	444.0	435.6	Yes
02/16 2:55pm	1.6	Cloudy – 54000Lux	8.0	8.2	263.8	265.6	Yes
02/16 3:30pm	1.6	Cloudy – 32000Lux	1.3	2.6	46.2	42.1	Yes
10-checkpoint trajectory							
02/14 11:35am	1.5	Clear – 114500Lux	6.5	4.6	305.8	324.4	Yes
Results							
Homing error: RMSE robot vs. G.T.			Homing distance: RMSE robot vs. G.T.			Homing success rate	
4.6cm			9.6cm			100%	

FIGURE L.1 – Ce mode de navigation a été testé en estimant l’angle de cap à partir du compas céleste, et la distance parcourue à partir des foulées et du flux optique. Les performances sont données ici en termes de distance de retour (distance à parcourir pour rejoindre la cible – *Homing Distance*), d’erreur finale de positionnement (*Homing Error*), et de succès retour (si le centre de gravité du robot se trouve à moins de 22.5 cm de la cible – *Homing Success*). Les initiales G.T. (*Ground Truth*) font référence à la vérité terrain (suivi vidéo). L’erreur (moindres carrés) entre la réalité terrain et le mode de navigation sont également donnés en bas du tableau. Toutes les distances sont données en centimètres.

M Vision panoramique

M.1 Le capteur

La vision panoramique est un élément important de l'automatisation de la navigation en extérieur à double titre en ce sens qu'elle permet de naviguer par reconnaissance de scènes plus ou moins complexes d'une part, mais également de détecter et d'éviter des obstacles fixes ou mobiles. Nous avons équipé les robots Hexabot et AntBot d'une caméra Raspberry Pi NoIR à 8 mégapixels et pouvant fonctionner jusqu'à 120 images par seconde (Fig. M.1). Nous avons ensuite fixé un miroir panoramique GoPano offrant un champ de vision de $360^\circ \times 80^\circ$. De manière à coïncider avec l'acuité visuelle de la fourmi du désert (entre 5° et 10° selon la région de l'œil), nous avons introduit un flou analogique en espaçant la caméra et le miroir. Dans tout ce qui suit, les images sont acquises en niveaux de gris et avec une résolution de 640×480 pixels.



FIGURE M.1 – La vision panoramique embarquée. **A** Miroir panoramique GoPano monté sur la caméra Pi NoIR. **B** Hexabot équipé de la caméra panoramique. **C** AntBot équipé de la caméra panoramique.

Deux solutions dans le traitement des images panoramiques sont envisageables. En effet, l'image brute acquise par la caméra panoramique est circulaire (Fig. M.2A).

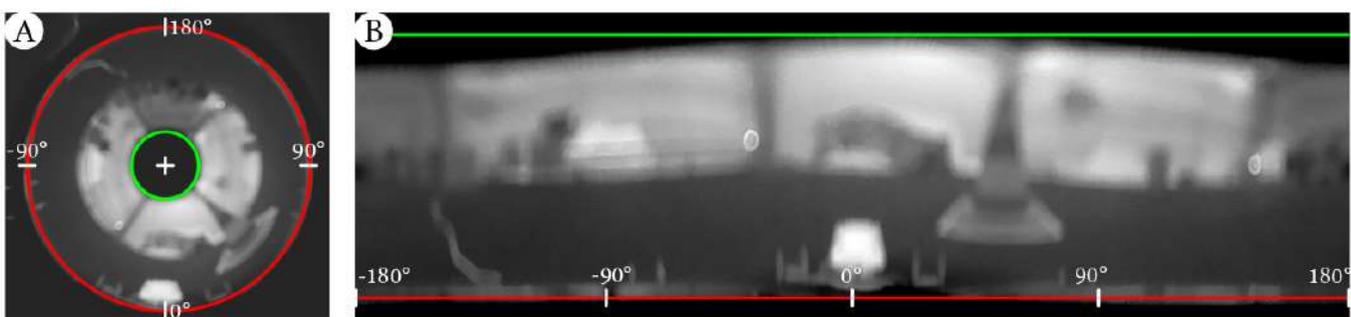


FIGURE M.2 – Représentations polaire et cartésienne de l'image panoramique. **A** Image brute avec détection des cercles limites (détection par la transformée de Hough). **B** Image rectangulaire correspondante.

Le calcul du flux optique ainsi que toute autre forme de traitement peuvent être envisagées dans l'espace polaire afin d'augmenter la rapidité du temps de calcul. Toutefois, l'image circulaire peut être transformée en rectangle afin de faciliter l'intelligibilité de l'information (Fig. M.2B). Un moyen simple d'effectuer cette transformation repose sur la méthode

du rayon vecteur : après avoir détecté les bords circulaires de l'image (par la méthode de la transformée de Hough [111]), on reconstruit l'image rectangulaire en copiant l'ensemble des pixels croisés par un rayon vecteur que l'on fait tourner de 360° . Malheureusement, cette étape est assez calculatoire et induit deux formes de distorsions : une sur-représentation de la zone proche du centre du cercle (i.e. le bas de l'image), et un sous-échantillonnage de la zone périphérique (i.e. la partie haute). Dans le cadre applicatif ici concerné, nous nous abstrayons de ce problème en supprimant les bords afin de nous concentrer sur l'horizon.

M.2 Détection d'obstacles

L'évitement d'obstacles en robotique mobile est un domaine de développement et d'innovation en constante mutation, et ce phénomène tend à s'accroître de nos jours avec les multiples projets de véhicules autonomes. Parmi les solutions technologiques privilégiées, on retrouve l'écholocalisation (ultrasons, infrarouges) et la vision par ordinateur. La première méthode est aujourd'hui souvent utilisée dans l'industrie automobile avec les systèmes d'assistance au parking du véhicule. Que l'on utilise les ultrasons ou les infrarouges, chaque approche possède son lot d'avantages et d'inconvénients. Les ultrasons par exemple offrent une portée de plusieurs mètres mais sont très évasifs. Les infrarouges en revanche sont plus directs mais leur portée est aussi plus faible (inférieure à 1 m). L'emploi de la vision est quant à lui très important dans le domaine robotique car il offre une multitude d'opportunités telles que la reconnaissance de lieu ou de personnes [52], la navigation [228], l'évitement d'obstacles [14, 148] ou encore le suivi de cibles [38].

Compte tenu de notre approche inspirée des modalités sensorielles des fourmis du désert, nous avons choisi de nous concentrer sur la vision et d'utiliser la caméra panoramique pour déceler la présence d'obstacles sur le trajet du robot. Nous avons donc monté la caméra sur le robot AntBot et fait marcher ce dernier dans un environnement contenant des obstacles (i.e. des cylindres) de taille variable (Fig. M.3). Les obstacles ont été détectés par flux optique en utilisant la célèbre méthode de Horn et Schunk [109]. Une illustration des résultats obtenus est présentée en figure M.4.

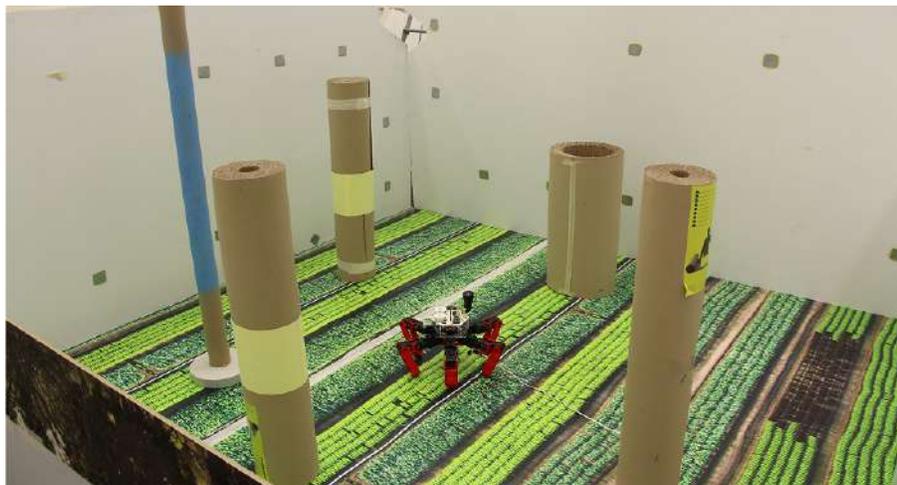


FIGURE M.3 – Contexte expérimental : détection d'obstacle par flux optique panoramique. Le robot évolue dans une scène de $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ entourée de panneaux blancs. Des cylindres de tailles différentes ont été positionnés afin de représenter des obstacles.

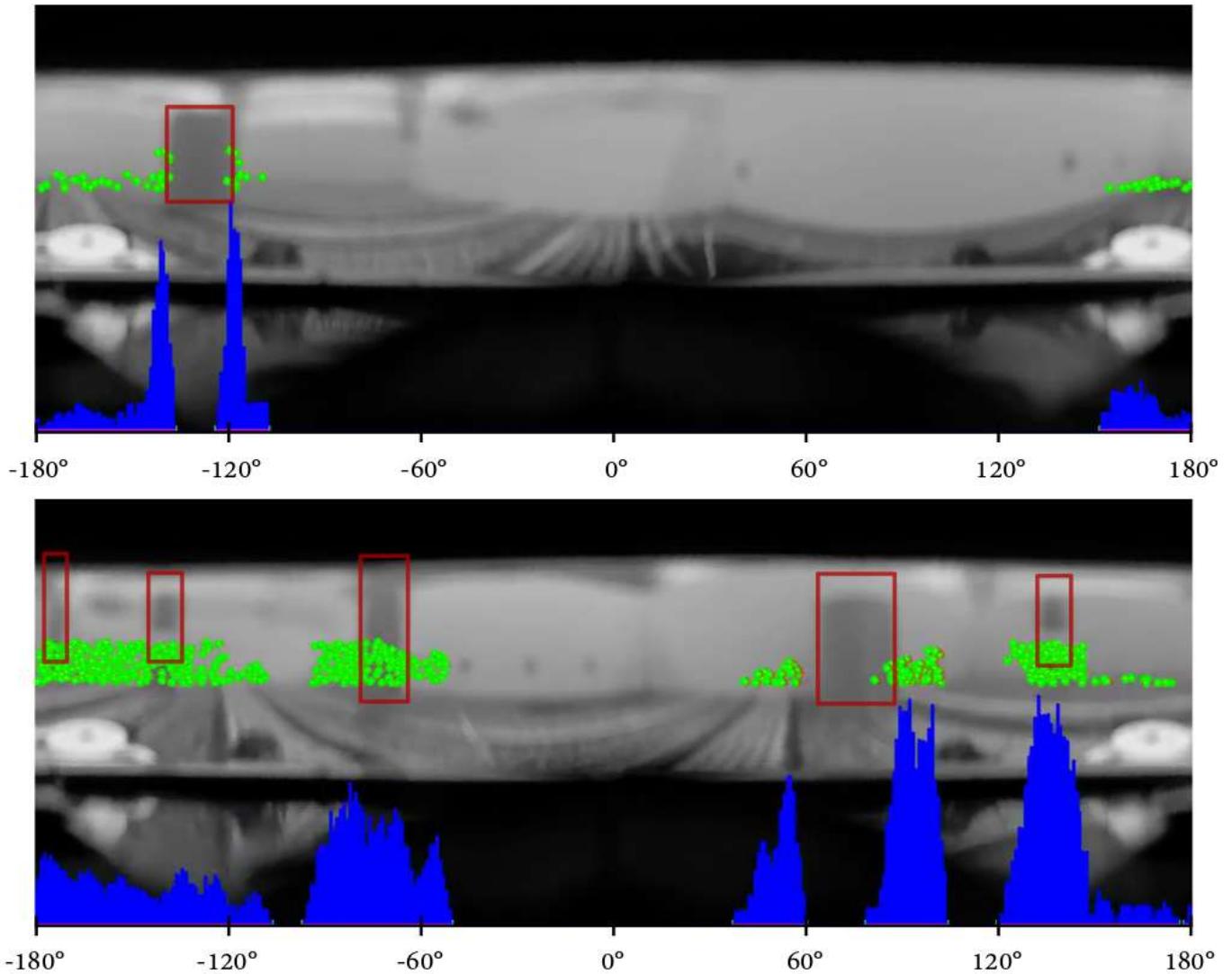


FIGURE M.4 – Deux exemples de détection d’obstacles obtenus avec AntBot en utilisant le calcul de flux optique en temps réel par la méthode de Horn & Schunk. Les obstacles sont délimités par les rectangles rouges pour une meilleure visibilité. Les points verts sont les points d’intérêts utilisés pour le flux optique. Le flux optique est donné en bleu en fonction de l’orientation. Résultats obtenus dans le cadre du stage de Sean Lapalus (ISMIN - Campus de Gardanne), co-encadré avec Julien Serres.

L’idée de cette implémentation préliminaire était de vérifier la détectabilité des obstacles lorsque le robot marche, et ce en dépit de : (i) la faible résolution optique obtenue avec le flou analogique, et (ii) les perturbations visuelles générées par la dynamique saccadée de la marche. La zone de détection des obstacles est concentrée sur une bande de 20° centrée sur l’horizon afin de diminuer l’impact des distorsions.

En termes de biomimétisme, l’approche algorithmique retenue ici n’est *a priori* pas en adéquation avec les capacités calculatoires du système nerveux de l’insecte, lequel est constitué de seulement 250 000 neurones. Le département de Biorobotique est fort d’une importante histoire dans le développement de capteurs et d’algorithmes de détection du flux optique inspirés des yeux des insectes tels que les mouches [74] ou les abeilles [71, 213, 214]. Le minimalisme et l’efficacité de ces solutions sont très pertinentes dans le cadre du projet AntBot et pourront inspirer les prochains développements en matière d’évitement d’obstacles.

M.3 Navigation

Dans cette ultime partie, nous aborderons des pistes de développement en navigation visuelle. Outre l'intégrateur de chemin, on sait que les fourmis du désert, au même titre que la grande majorité des insectes, sont dotées d'une mémoire des lieux qu'elles peuvent exploiter afin de se repérer et de s'orienter [33, 244]. Un certain nombre de stratégies bio-inspirées ont été développées et utilisent une méthode de localisation par descente de gradient : en comparant l'image courante avec une banque d'images enregistrées et associées à des coordonnées, il est possible de calculer l'erreur en pixels (diverses méthodes existent) et ainsi déterminer de manière plus ou moins fiable où l'on se trouve [228, 258].

Nous avons embarqué la caméra panoramique sur le robot Hexabot et avons testé la capacité du robot à estimer sa position par rapport à un maillage de prises de vues précédemment établi. Plusieurs obstacles ont été placés dans l'arène de vol, et un maillage photographique a été réalisé en amont de l'expérience (Fig. M.5). Nous avons ensuite fait naviguer le robot et calculé déterminé les photographies activées par cette comparaison d'images en utilisant la même approche que celle de Zeil et al. dans [258], laquelle repose sur le calcul de l'erreur au sens des moindres carrés, en pixels, calculée à partir de l'image en mémoire et de l'image courante. On observe alors que le nœud de la maille activé est systématiquement celui qui correspond à la distance au robot la plus faible. L'orientation du robot n'influe pas sur la différence d'images dans la mesure où l'erreur en pixels était calculée pour chaque point de la maille selon diverses rotations de l'image panoramique circulaire.

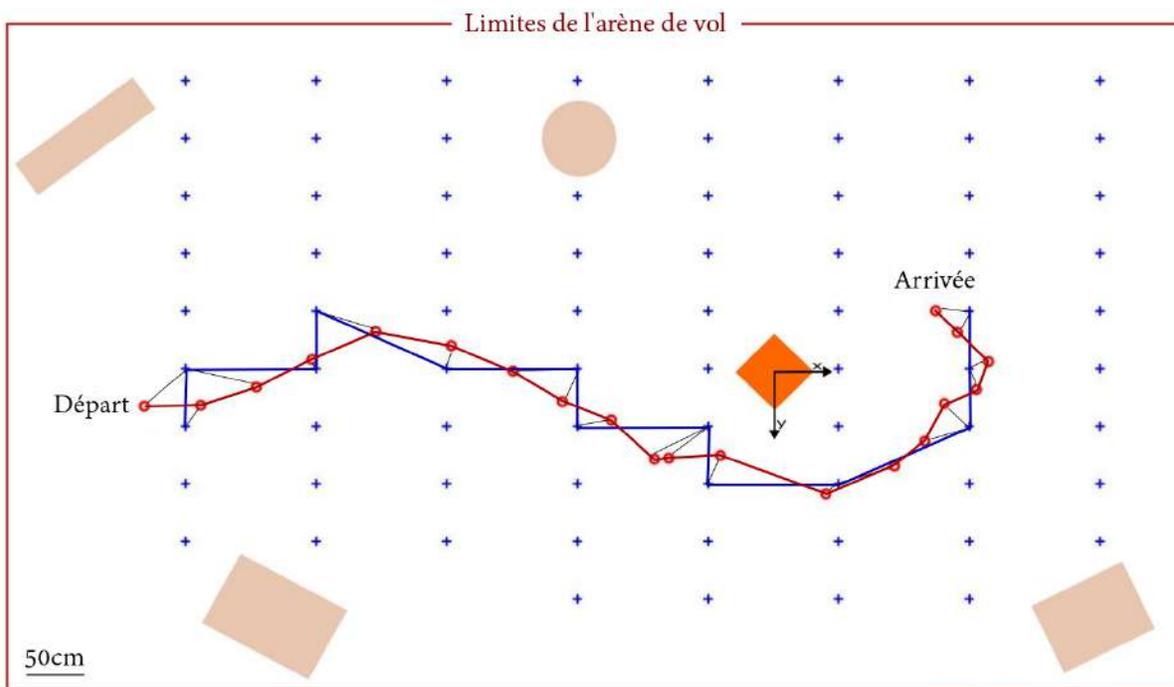


FIGURE M.5 – Exemple de navigation visuelle appliquée sur le robot Hexabot. Marqueurs bleus : photographies appartenant au maillage. Marqueurs rouges : photographies réalisées durant la navigation (robot à l'arrêt). La courbe rouge donne la trajectoire 2D déterminée par le système VICON de l'arène de vol ; la courbe bleue correspond à la trajectoire que le robot a fait d'après le maillage.

En outre, nous avons mesuré cette différence d'image en pixels lors d'une phase de marche en ligne droite du robot de part et d'autre d'un nœud du maillage. Une photographie panora-

mique était prise régulièrement et comparée à l'image de référence. Le gradient obtenu sous deux conditions d'éclairage différentes (1200 Lux et 120 Lux.) est présenté en figure M.6. Il confirme les résultats statiques présentés dans [258], et ouvre la voie à de futures applications et développement tels que la résilience aux variations de luminosité ou encore le déclenchement de la mémorisation d'une prise de vue par comparaison de l'erreur en pixels (avec la précédente photographie) avec un seuil pouvant être adaptatif.

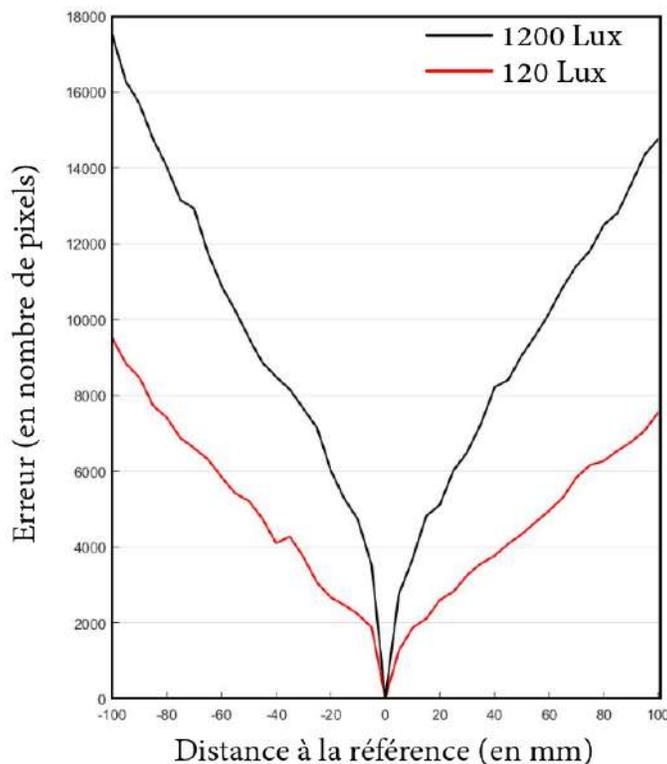


FIGURE M.6 – Gradient d'erreur obtenu en comparant l'image courante à l'image de référence pour deux conditions de luminosité ambiante : 1200 Lux et 120 Lux.

