HAL
open science

Le robot fourmi AntBot. Conception et réalisation d'un robot bio-inspiré

Stéphane Viollet, Julien Dupeyroux, Julien Serres

To cite this version:

Stéphane Viollet, Julien Dupeyroux, Julien Serres. Le robot fourmi AntBot. Conception et réalisation d'un robot bio-inspiré. Techniques et culture, 2020, 73, pp.128-141. 10.4000/tc.13557 . hal-02892659

HAL Id: hal-02892659

https://amu.hal.science/hal-02892659

Submitted on 8 Jul 2020

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

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

Conception et réalisation d'un robot bio-inspiré : le robot fourmi AntBot

Stéphane Viollet, Julien Dupeyroux, Julien Serres

Le but de cet article est une tentative de description de notre approche dite « robotique bio-inspirée » sous forme d'un processus technique qui doit aboutir à la réalisation d'un artefact à partir de fonctions que nous avons identifiées du vivant. Ces fonctions, que nous tentons de reproduire sous forme artificielle, sont au nombre de 3 : locomotion à pattes, intégrateur de chemin permettant au robot de revenir à son point de départ sans GPS et boussole céleste permettant au robot de mesurer son cap par rapport à la lumière polarisée du ciel. Il ne s'agit pas ici de reproduire fidèlement des structures biologiques : le robot est bien plus grand qu'une fourmi et n'a pas d'œil composé. Ici le robot AntBot a 6 pattes (cf. figure 1), c'est un robot hexapode dont la vision et la stratégie de navigation sont directement inspirées de la fourmi du désert Cataglyphis. La navigation sans GPS et le repérage dans l'espace sont au cœur des problématiques abordées dans cette étude. D'ailleurs le point de départ de notre démarche de bioroboticien est de constater que la nature a déjà résolu notre problème : la fourmi du désert Cataglyphis est une solution à ce problème. Cette fourmi est capable de se localiser par rapport à son nid (point de départ), d'explorer son environnement de manière aléatoire et de rentrer à la maison en ligne droite. Enfin, nous montrons que le robot AntBot une fois confronté à un environnement naturel est un moyen de valider notre compréhension de fonctions directement issues de celle de la fourmi mais aussi un moyen de concevoir une nouvelle technologie bio-inspirée.

Figure 1. Le robot hexapode AntBot inspiré de la fourmi du désert Cataglyphis. Copyright : Julien Dupeyroux.

Dans une première approche, la robotique bio-inspirée, appelée aussi Biorobotique, telle que nous la pratiquons à l'Institut des Sciences du Mouvement à Marseille, peut se représenter sous la forme d'une démarche circulaire telle qu'illustrée dans la figure 2. Notre point de départ est le vivant ou plus précisément la connaissance en biologie provenant d'articles ou parfois d'expériences directement menées au laboratoire. Pour aller vers la robotique, nous transposons cette connaissance issue du vivant sous forme d'équations mathématiques ou autres réalisations électroniques. Puis dans une démarche circulaire décrite dans la figure 1, nous souhaitons aussi revenir vers le vivant grâce aux hypothèses suggérées par le comportement du robot évoluant dans son environnement. Par exemple, la précision centimétrique du robot AntBot dans sa capacité à revenir à son point de départ

est une manière de sensibiliser les biologistes (éthologues) sur la précision d'une stratégie de navigation basée uniquement sur l'intégration de chemin.

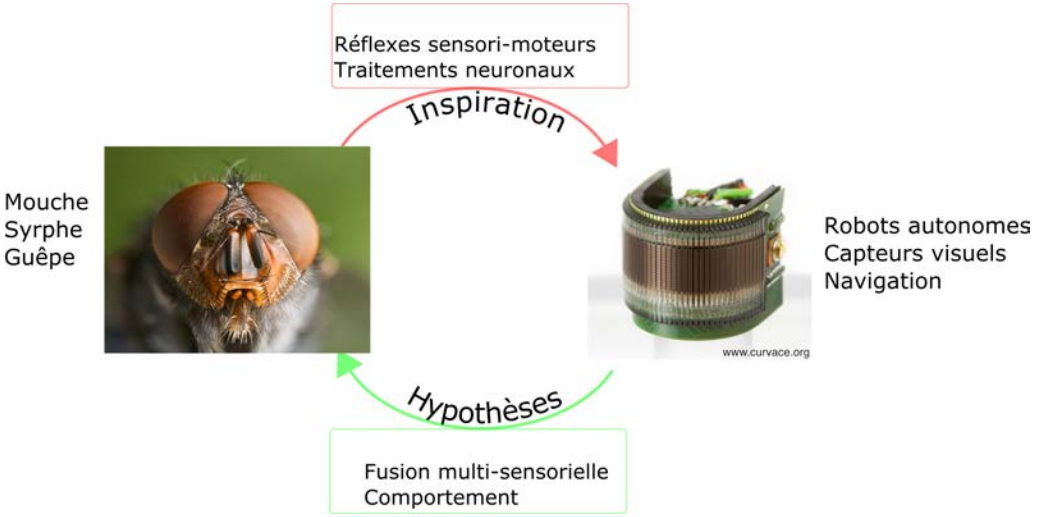

Figure 2. Démarche circulaire de la Biorobotique (contenu de cette figure sera changé par rapport à l'article)

La motivation première de la Biorobotique est double : s'assurer du caractère opérationnel des savoirs dégagés de l'observation du vivant en les mettant en œuvre à bord d'un artefact confronté lui-aussi au même environnement que son modèle vivant et concevoir un robot autonome dont le comportement devrait être similaire à celui de son modèle vivant. Cette démarche décrite par Barbara Webb (Webb 2000) qui consiste à construire un robot bio-inspiré pour le confronter à un environnement naturel a de multiples avantages : elle permet d'aller au delà de la simulation, c'est-à-dire confronter le robot à des aléas naturels (e.g., différence de luminosité, température, indice d'éclairage UV selon les saisons, ciel clair ou nuageux). La simulation ne peut rendre compte de tous les phénomènes d'un environnement naturel. La réalisation d'un robot permet d'étudier l'interaction de ce dernier et son environnement, de tester la robustesse de ses traitements de l'information (algorithmes) mis en œuvre et de le forcer à prendre ses décisions en temps réel.
Dans tout le répertoire des robots bio-inspirés, on peut mettre en lumière quelques pionniers dont les contributions ont été majeures pour un grand nombre de chercheurs bioroboticiens. Dès 1947, les tortues de Bristol conçues par le neurophysiologiste William Grey Walter. Les tortues Elmer et Elsie repéraient les sources de lumière de faible intensité dans les environs et tournaient autour d'elles. Elles pouvaient contourner les obstacles et éviter les sources de lumière plus vives qui avaient pour effet de les « brûler », mais lorsque leurs batteries commençaient à faiblir, elles étaient, au contraire, attirées par une source lumineuse pour y puiser leur énergie (Walter 1950).
En plus, ces tortues étaient dotées d'un système d'identification de la lumière avec le son de telle sorte que la reproduction simultanée de ces deux signaux à plusieurs reprises les entraînait à réagir au son seul, par association du son avec la lumière. C'était la reproduction du fonctionnement du réflexe conditionné de Pavlov. En 1984, Valentino Braitenberg, médecin psychiatre et un des co- fondateurs de l'Institut Max Planck en Neurocybernétique à Tubingen en Allemagne, a publié un livre appelé « Vehicules » (Braintenberg 1984). Ce livre décrit tout un répertoire de robots autonomes capables d'interagir avec leur environnement sur la base de ce qu'ils perçoivent. A la manière des tortues de Grey Walter, un véhicule de Braitenberg est donc un robot mobile

capable d'être par exemple attiré par une lumière ou au contraire repoussé, tout dépend des relations mathématiques (activation, inhibition) liant ses capteurs à ses actionneurs (moteurs). Un des enseignements majeurs de Braitenberg est que la synthèse est souvent plus simple que l'analyse, ce qui signifie que les lois de commande mises en œuvre au niveau du système nerveux sont souvent beaucoup plus simples (au sens minimaliste) que ce que l'on pense pour expliquer des comportements relativement complexes. C'est précisément cette ligne de pensée que nous avons suivie pour créer et réaliser le robot AntBot qui peut être considéré comme un véhicule de Braitenberg par son minimalisme au niveau des capteurs utilisés et de sa stratégie de navigation. Pour tenter de comprendre les différentes phases et séquences liées à au développement du robot AntBot, on peut s'appuyer sur la figure 2 qui décrit la démarche Biorobotique d'une autre manière que celle de la figure 1.

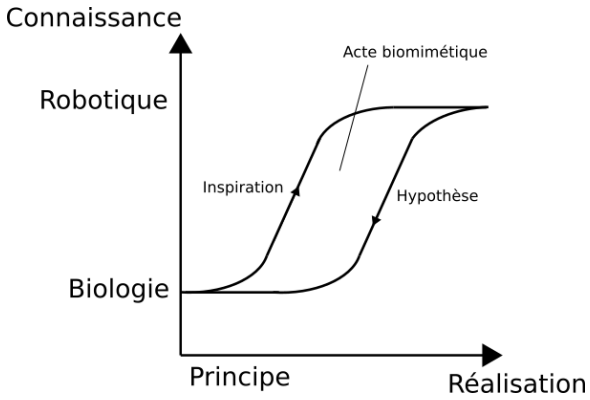

Figure 3. Représentation alternative de la démarche Biorobotique.

La figure 2 montre une autre représentation de notre démarche Biorobotique en tenant compte de notre niveau de connaissance. En effet, les chercheurs de l'équipe ont tous une formation initiale en ingénierie (mécanique, automatique, électronique, informatique). Nous partons donc souvent d'un niveau de connaissance plus faible en biologie qu'en robotique. Néanmoins, ce niveau peut être suffisant pour lancer de nouvelles idées de développements robotiques qui vont aboutir à une contribution forte en robotique : nouveaux robots, nouveaux capteurs et nouveaux principes de commande de robot. Le robot réalisé est donc une incarnation, c'est-à-dire une représentation artificielle de fonctions issues d'un modèle naturel (mouche, fourmi, abeille…) qui une fois confronté à son environnement réel plus moins naturel car évoluant souvent en conditions de laboratoire peut suggérer de nouvelles hypothèse aux biologistes pour mieux comprendre le vivant. Ainsi, le niveau de connaissance en biologie peut lui aussi évoluer et augmenter.

Phase 1 : acquérir la connaissance issue du vivant

Dans la démarche biorobotique, la première phase consiste a prendre connaissance de l'état des connaissances issues du vivant associées à l'objectif que l'on souhaite atteindre en phase 3 : concevoir un robot fourmi autonome. La connaissance biologique servant de point de départ est l'étude des capacités de navigation de la fourmi du désert Cataglyphis. Cette fourmi qui vit dans le désert tunisien est capable de sortir de son nid, d'explorer de manière aléatoire son environnement pour trouver de la nourriture et peut ensuite rentrer au nid en ligne droite. Il est impossible pour cette fourmi d'utiliser des phéromones car celle-ci s'évaporent très vite à cause de la chaleur du sol. Cette fourmi utilise donc d'autres modalités sensorielles (vision, proprioception) pour se localiser. Mais comment cette fourmi

peut-elle avoir une représentation de sa position relative à son nid sans GPS ni cartographie ? L'étude du comportement de cette fourmi ne date pas d'hier. De nombreuses générations de biologistes ont été intriguées par les capacités de cette fourmi Cataglyphis à retrouver son nid. Pieron (1904) a proposé que la fourmi pouvait retracer son chemin parcouru en employant sa proprioception au niveau de ses pattes qu'il appelait « sens musculaire » sur la base de la loi du contre pied proposée plus généralement par Reynaud (1898) : « L'instinct d'orientation lointaine est la faculté que possèdent à des degrés différents tous les animaux de reprendre le contre-pied d'un chemin parcouru ». Cependant, Cornetz (1910) réfuta la proposition de Pieron en remarquant que la fourmi ne passait pas par le même chemin mais semblait intégrer la distance parcourue (i.e., ajouter la longueur de chaque tronçon parcouru) . De nombreuses études ont ensuite suivi mais c'est probablement Von Frisch qui a été le plus éclairant par la suite vers le milieu du 20ème siècle en montrant que l'abeille utilisait la lumière polarisée du ciel pour mesurer son cap : l'abeille disposait donc d'un compas céleste. Depuis les premières études menées sur cette fourmi par Rudiger Wehner et collègues dans les années 1960, une littérature très riche incluant de nombreuses études expérimentales a été produite (Wehner 2003). Dans un environnement dépourvu de repères visuels tel que le désert de sel au Sahara, nous savons que la fourmi Cataglyphis fortis n'a pas d'autre choix que d'utiliser la distance parcourue et son cap pour rentrer à la maison en ligne droite. Sur la base de ces deux informations, elle peut alors mettre en œuvre une stratégie dite d'intégration de chemin (« path integrator ») et rentrer à la maison. L'intégration de chemin est une méthode utilisée par les animaux qui se rapprochent de la navigation à l'estime (« dead reckoning ») bien connue des pilotes et des navigateurs capables de naviguer en utilisant uniquement cap et de la vitesse entre une position courante et une position précédente (origine du terme discuté dans : Cecil 2018). L'intégrateur de chemin est souvent décrit comme le fil d'Ariane des fourmis du désert, il repose sur une odométrie (mesure de distance) basée sur le comptage des foulées lors de la locomotion (Wittlinger 2006) sur la mesure du flux optique, i.e., la vitesse du défilement du sol vue par la partie ventrale de l'oeil de l'insecte (Pfeffer 2016).

Phase 2 : modélisation mathématique de l'intégrateur de chemin de la fourmi du désert.

Il s'agit ici de ne plus seulement s'inspirer mais plus concrètement de traduire sous forme d'un langage mathématiques les principes biologiques pointés en phase 1. Comme l'on sait que la fourmi est un animal capable de mesurer sa distance parcourue et son cap, on peut alors proposer un algorithme qui lui permettrait de rentrer à la maison sur la base uniquement de ces deux mesures. Comme indiqué en phase 1, la stratégie d'intégration de chemin va se baser sur le formalisme mathématique de la navigation à l'estime (« dead reckoning »). Il ne s'agit pas de reproduire ou d'imiter une fourmi Cataglyphis sous forme d'un agent artificiel ou même d'un robot. La solution mathématique que nous décrivons n'est pas en relation directe avec les capacités de traitement de l'information des neurones du cerveau de la fourmi qui fonctionnent très différemment d'un micro-processeur. On peut considérer cette phase de modélisation et d'écriture d'algorithmes comme un éloignement vis à vis du vivant et des études menées chez la fourmi. Cet éloignement est assumé car nous choisissons à ce stade d'utiliser les outils de l'ingénieur dans le but de produire un robot autonome. Néanmoins, nous verrons que le comportement du robot nous servira en phase 4 à revenir vers le vivant.
La figure 3 illustre la stratégie de navigation à l'estime sans utiliser de repères visuels. Le principe relativement simple repose ici sur une mesure de cap γ et une mesure de vitesse de déplacement $\bar{v}$ dans un intervalle de temps Δt.

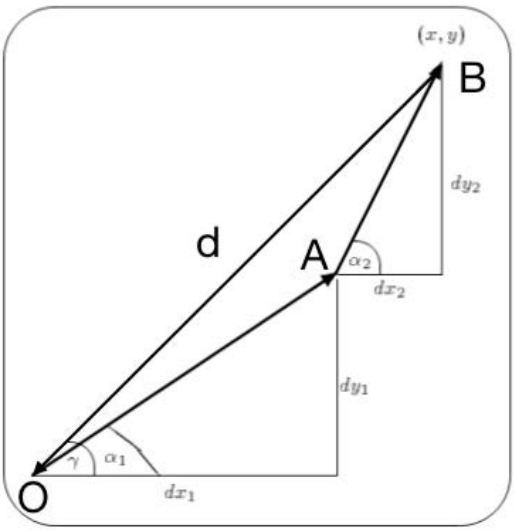

Figure 4. Illustration de la stratégie de navigation à l'estime. Trajectoire d'exploration composée de 3 points : O,A,B. En partant du point O vers la direction A puis B, il est possible de revenir au point O depuis le point B en suivant le cap estimé γ et les distance au point de retour notée *d*. Pour revenir au point O, il faut mesurer les caps notés α_1 et α_2 ainsi que la vitesse de déplacement entre chaque point. (Adapté de Nehmzow 1993).

A partir de la figure 3, on peut écrire les équations suivantes qui permettent de calculer la position courante relative au point O :

$dx_i = cos(\alpha_i) \cdot \bar{v} \cdot \Delta t$ et $dy_i = sin(\alpha_i) \cdot \bar{v} \cdot \Delta t$

$x(t+1) = x(t) + dx_i$ et $y(t+1) = y(t) + dy_i$

Il est possible alors de calculer à tout moment le cap γ de retour à suivre pour retourner au point d'origine O ainsi que la distance à parcourir *d* de la manière suivante :

$tan(\gamma) = \frac{y}{x}$ et $d = \sqrt{x^2 + y^2}$

L'originalité de l'algorithme de navigation du robot AntBot entièrement développé par Julien Dupeyroux dans le cadre de sa thèse est qu'il combine une navigation à l'estime et des modalités sensorielles similaires à la fourmi Cataglyphis, à savoir : une mesure de cap par boussole céleste, une mesure optique de la vitesse de déplacement par la partie ventrale de l'oeil composé de la fourmi regardant en direction du sol et une mesure de foulée rendue possible par la locomotion à pattes. L'algorithme du robot AntBot fait donc la fusion entre deux moyens de mesurer la distance parcourue (optique et foulée) et utilise le cap relatif fourni par la boussole céleste.

Phase 3 : conception et réalisation du robot AntBot

C'est donc sur la base de cet algorithme mathématique que le robot Antbot peut rentrer à la maison de manière autonome en ayant à chaque instant une estimation de la distance et de l'orientation qui le sépare du point de départ. Le robot devient donc ici une machine

capable de réaliser un algorithme traitant deux modalités sensorielles (distance et cap) de manière à commander les 6 pattes lui permettant de s'orienter et de se déplacer. Cependant, l'inspiration biologique ne s'arrête pas là et vient s'insérer de nouveau dans le processus de conception du robot lui-même.

Opération 1 : réalisation de la plateforme robotique hexapode

Le robot AntBot (Dupeyroux 2019), présenté en figure 4, a été développé entre 2017 et 2019 afin de succéder à Hexabot (Dupeyroux 2017). AntBot possède une masse de 2,3 kg en incluant les capteurs, l'électronique et la batterie. Son envergure est de 45 cm. Il est doté de six pattes, chacune comprenant un total de trois actionneurs (liaisons pivots) opérés par des servomoteurs du commerce. Le micro-logiciel en charge de locomotion d'AntBot permet à celui-ci de marcher en mode tripode à la manière de la fourmi et d'assurer un compromis entre la vitesse du robot, sa consommation énergétique et sa stabilité lors de la marche.

Tout d'abord, la conception d'un robot hexapode (6 pattes) 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. 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.

Par ailleurs, notre choix d'utiliser un robot hexapode, et non doté de quatre ou huit pattes, voire de concevoir un robot bipède, se justifie également d'un point de vue de l'efficacité. En effet, les robots quadrupèdes consomment moins d'énergie mais leur locomotion est 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.

Opération 2 : conception et réalisation d'une boussole céleste

D'un point de vue physique, il est bien connu depuis Rayleigh et ses travaux sur la propagation de la lumière dans l'atmosphère terrestre qu'il existe des interactions entre les photons et les molécules de notre atmosphère qui entraînent une polarisation linéaire de la lumière du ciel selon un motif régulier et symétrique par rapport au méridien solaire et dont l'organisation spatiale dépend de la position du soleil dans le ciel. Nous avons donc d'un côté un phénomène physique bien connu et modélisé et d'un autre un principe biologique exploitant ce phénomène physique pour la mesure du cap.

Pour naviguer, nous savons notamment que les fourmis du désert, grillons et papillons monarques (Reppert 2004) utilisent la lumière polarisée du ciel pour estimer leur cap, composante essentielle de la navigation.

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 5A. Sur cette

photographie du ciel, nous ne percevons que le gradient de couleur dû à la position du soleil, ici proche de l'horizon. En revanche, si l'on observe le ciel à travers un filtre polarisé linéairement, on constate la présence d'un contraste net (ligne sombre) dans le ciel (Fig. 5B,C).

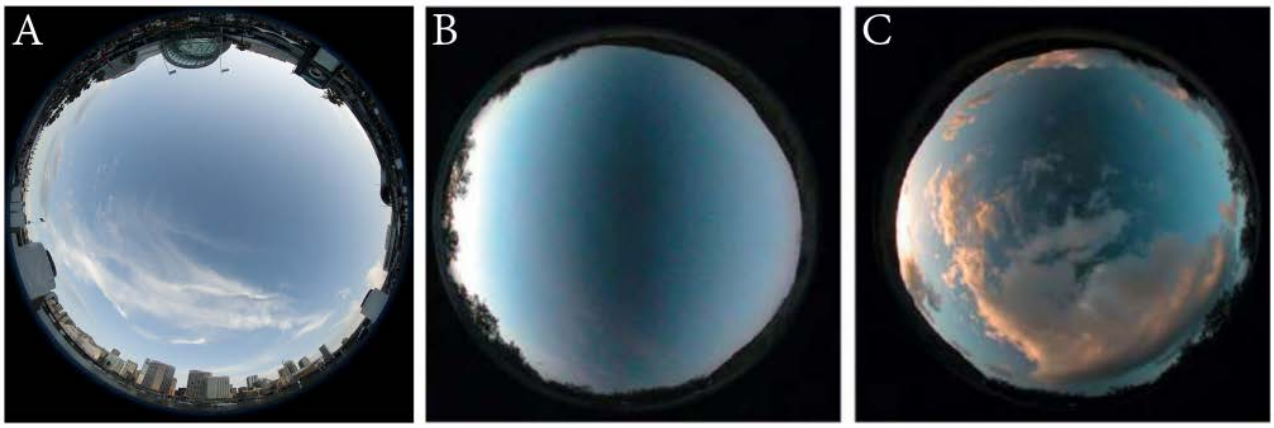

Figure 5. Vues grand angle du ciel. A Photographie prise sans filtre polarisant linéaire. (Crédits : Nigel Howe, CC-BY). B,C Photographies prises avec un filtre polarisant linéaire sous un ciel dégagé et nuageux. Dans les deux cas, le filtre est orienté selon le méridien solaire. Source : https://aibolita.com/ eye-diseases/38640-polarized-light-in-nature.html.

En pratique, l'orientation de cette barre plus sombre dépend de l'orientation du filtre polarisant. Si le filtre polarisant et l'axe du méridien solaire (i.e., le demi-cercle passant par le soleil et le zénith sont colinéaires, alors la ligne sombre sera perpendiculaire au méridien. En revanche, si l'on oriente le filtre perpendiculairement au méridien, alors la ligne sombre sera parallèle au méridien solaire. La figure 6 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.

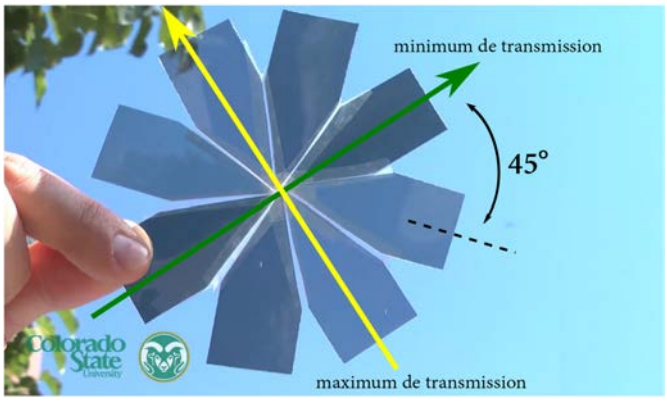

Figure 6. Photographie montrant l'absorption plus ou moins importante de la lumière du ciel lorsque celle-ci traverse un filtre polarisant linéaire. En fonction de l'orientation de ce dernier, la lumière est plus ou moins transmise : le maximum de transmission est obtenu selon l'orientation décrite par la flèche jaune; le minimum est atteint dans l'orientation perpendiculaire (flèche verte). Extrait et adapté de : https://www.youtube.com/watch?v=TP5JOfrPguQ (Crédits : Colorado State University).

Il existe chez certains insectes une zone particulière l'oeil composé appelée aire dorsale marginale (Dorsal Rim Area, DRA), qui est composée d'ommatidies (petits yeux à facette élémentaire) sensibles à la lumière polarisée (Labhart 1999). Chaque ommatidie se compose de deux groupes perpendiculaires de microvillosités, sortes de petits cils guidant la lumière. L'absorption des photons est maximale lorsque l'angle de polarisation (AdP) de la lumière coïncide avec l'orientation des microvillosités. La sensibilité spectrale des ommatidies varie entre les insectes. Les fourmis du désert, les abeilles, le bousier ou encore les drosophiles sont sensibles aux rayonnements UV (Labhart1999), tandis que, par exemple, le grillon présente une sensibilité maximale dans le bleu (433 nm) (Herzmann 1989). Cette prévalence d'une sensibilité aux UV que l'on rencontre chez de nombreux arthropodes (invertébrés ayant un exosquelette : insectes, crabes….) pourrait s'expliquer par le fait que le degré de polarisation (DPL) reste suffisant pour permettre la transmission de l'onde polarisée au travers des nuages et des canopées.

Au niveau neuronal, nous savons qu'il existe dans le lobe optique du cerveau du grillon des neurones appelés POL dont la réponse en impulsion par seconde est modulée par l'orientation de la lumière polarisée qui vient stimuler la DRA. Ce neurone réalise la différence logarithmique des deux microvillosités orientées perpendiculairement dans chaque ommatidie de la DRA (cf. figure 6) (Labhart 1988). La fonction logarithmique permet d'assurer une mesure de l'orientation de la lumière polarisée dans une grande gamme de variation du degré de polarisation (amplitude de polarisation) tel que rencontrée dans un environnement naturel.

Pour concevoir une boussole céleste inspirée de la fourmi, nous avons donc trois caractéristiques majeures à mettre en œuvre qui sont des sortes de lignes directrices pour la conception de la boussole :

- deuxfiltres polarisants linéaires de direction orthogonale reproduisant les microvillosités des ommatidies
- une différence logarithmique entre les sorties de deux photorécepteurs d'une ommatidie
- une sensibilité spectrale dans l'UV pour voir à travers les nuages

Nous avons choisi ces 3 points car il nous paraissait intéressant de voir à travers les nuages et surtout de nous différencier d'études précédentes qui n'avaient jamais utilisé de photo-capteurs sensibles à la lumière UV. Ainsi d'une manière très opportuniste, nous avons

exploité une fonction de la vision de la fourmi, la sensibilité aux UV, qui nous a permis de voir à travers les nuages. Donc finalement, la fourmi et par la même occasion le robot AntBot font d'une pierre deux coups en étant sensibles aux UV : une sensibilité maximale à la lumière polarisée et une vision possible de cette lumière polarisée à travers les nuages et la canopée. La sensibilité spectrale du compas s'étend de 270 nm à 375 nm, tandis que les fourmis Cataglyphis ont un pic de sensibilité dans la lumière UV situé autour de 350 nm.

Nous savons aussi que dans la DRA, les filtres polarisants de chaque ommatidie sont distribués selon de nombreuses direction de manière à échantillonner spatialement le motif de lumière polarisée du ciel. Mais au lieu de mettre en œuvre un rétine compose de plusieurs centaines de photorécepteurs et d'autant de direction de polarisation, suite à une discussion entre nous trois, nous avons proposé une astuce consistant à faire tourner mécaniquement un filtre polarisant placé au-dessus d'une photodiode sensible aux UV. Cette astuce, relevant purement de l'ingénierie mécatronique, a permis de simplifier grandement la conception du capteur et aussi de réduire considérablement son coût.
Finalement en s'appuyant sur notre connaissance de la structure de la boussole optique des insectes, c'est-à-dire de leur aire dorsale marginale, nous avons conçu une boussole céleste composé de 2 photocapteurs sensibles aux UV surmontées de filtres polarisants linéaires dont les directions de polarisation sont orthogonales. Ces filtres sont fixés sur deux engrenages entraînés par un moteur pas-à-pas, lui-même placé entre ces deux engrenages, au centre du compas (cf. figure 7). Afin de reproduire l'ensemble de l'aire dorsale marginale de la fourmi (DRA), les filtres ont été mis en rotation. En combinant cette paire de photodiodes avec des filtres polarisants linéaires mis en rotation, le compas céleste est équivalent à deux rangées de 374 photocapteurs (pixels).

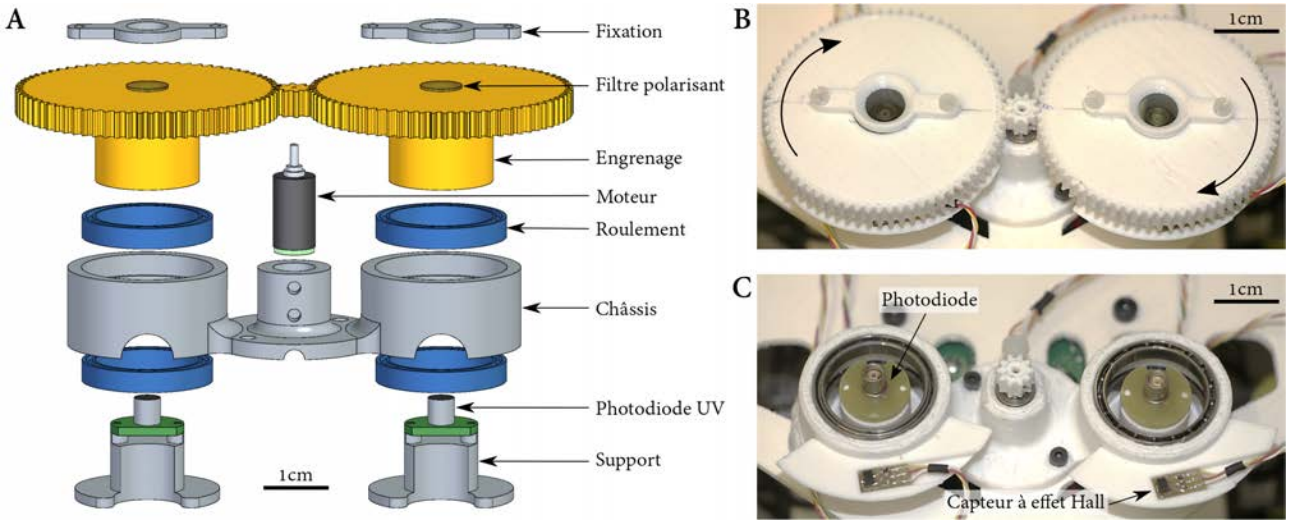

Figure 7. A Vue en éclaté du compas céleste. B Photographie du compas. C Photographie du compas sans les engrenages. On distingue notamment les capteurs à effet Hall, permettant de donner une position angulaire de référence dans la rotation des engrenages. D'après (citer).

Il ne nous restait plus qu'à mettre en œuvre un algorithme de traitement des signaux délivrés par chaque photocapteur de la boussole en fonction de la rotation de leur filtre polarisant. C'est donc le troisième principe inspiré de la fourmi que nous avons appliqué, à savoir la différence logarithmique qui peut aussi se calculer par la fonction P comme le

logarithme du quotient entre le signal du photocapteur 1 noté UV1 et le signal du photocapteur 2 noté UV2:

$P = \log(UV_1(\psi)) - \log(UV_2(\psi))$ avec ψ l'orientation des filtres polarisants

A partir de la fonction P, on peut montrer que le cap peut se calculer de la manière suivante :

$$Cap = \frac{1}{4}\left(argmin(P) + argmax(P)\right)$$

Ce qui revient à prendre toutes les valeurs minimales et maximales de la fonction P après une rotation complète des filtres polarisants, d'ajouter ces valeurs et de les diviser par 4. Le cap ainsi calculé est défini entre 0° et 180°. La détermination du cap à l'aide du compas céleste en bande UV a permis d'aboutir à une précision médiane inférieure à la résolution angulaire du capteur de 0, 96° (citer), et ce quelles que soient les conditions météorologiques testées (ciel dégagé à totalement couvert, indice UV compris entre 1 et 8).

Opération 3 : mesure de la distance parcourue

Pour la mesure de la distance parcourue, deux possibilités s'offraient à nous : la mesure par le comptage des foulées et la mesure optique de la vitesse de défilement du sol lors de la marche. Nous avons choisi de combiner ces deux principes (moyenne des 2 distances estimées par les 2 méthodes) pour permettre à AntBot de mesurer sa distance parcourue.
Nous disposions au laboratoire d'un capteur optique appelé M2APix (Mafrica 2015) composé de 12 pixels capables de mesurer le flux optique dans une grande gamme d'éclairage ambiant (du clair de lune au plein soleil). C'est donc naturellement ce capteur optique que nous avons mis en oeuvre à bord du robot AntBot.

Mathématiquement, le flux optique de translation ω (en rad/s), dans le cas où l'axe optique du capteur est perpendiculaire au sol (ce qui est le cas du robot AntBot où son capteur de flux optique est orienté à l'aplomb vers le sol) , est défini comme suit :

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta T}$$

Δϕ est l'angle entre deux axes optiques de deux pixels adjacents sur une même ligne. Cet angle est imposé par construction en plaçant une lentille devant les pixels à une distance nous permettant d'obtenir l'angle Δϕ voulu (ici 3,6°) et ΔT est le délai temporel séparant la détection d'un même contraste par deux pixels adjacents. Calculer le flux optique ω revient donc à déterminer ce délaiT, ce qui peut se faire classiquement par une fonction de corrélation entre deux signaux de deux pixels adjacents. En connaissant la hauteur au sol H du capteur M2APix, on peut ainsi déterminer la vitesse $\bar{v}$ d'avance du robot :

$$\bar{v} = H \cdot \omega$$

Enfin, on peut estimer la distance parcourue par le robot en utilisant le temps de marche t durant une séquence de marche. Ainsi, la distance parcourue *d* est donnée par la relation :

$$d = \bar{v} \cdot \Delta t$$

Opération 4 : caractérisation du comportement robotique

Les performances du robot AntBot sont largement décrites dans notre publication de Science Robotics (citer) et sont à la hauteur de ce que l'on pouvait espérer en s'inspirant de ce formidable navigateur qu'est la fourmi du désert. Nous avons obtenu grâce à notre intégrateur de chemin bio-inspiré une erreur moyenne de trajectoire égale à 4,67 cm±1, 88 cm, c'est-à-dire l'erreur entre le point de départ et le point de retour lorsque le robot rentre à la maison de manière autonome. La comparaison avec la fourmi ne serait cependant pas juste sans parler des performances de cette dernière. La fourmi du désert marche à 1m/s (AntBot seulement 10cm/s). Une trajectoire
typique de Cataglyphis fortis peut être de 730m comparer à sa taille qui n'est que de 1cm. La précision de la fourmi pour retrouver son nid est aussi centimétrique même après avoir parcouru plusieurs centaines de mètres, ce qui est remarquable. Si AntBot devait maintenir le même rapport entre sa taille (45cm) et sa distance parcourue, il faudrait qu'il parcourt une distance d'environ 32km, ce qui est loin d'être le cas (15 mètres). Force est de constater que les robots bio-inspirés sont souvent en deçà des performances de leurs modèles biologiques en termes de précision, capacité de locomotion, comportement et taille. Tout reste encore à faire en termes de développement de capteurs et actionneurs bio-inspirés dont les performances seraient à la hauteur de leurs modèles vivants. Il faut donc avouer que l'on est loin d'une imitation du vivant mais néanmoins, le gain en termes de connaissance et de conception de technologies en rupture est immense.

Phase 4 : retour vers la biologie

Enfin, l'analyse du comportement du robot est un élément essentiel qui nous permet de revenir vers le vivant sous forme d'hypothèses de travail. Les performances du robot AntBot évoluant dans un lieu naturel à l'extérieur sont à elles seules un questionnement pour les biologistes. Lors de discussions fructueuses avec nos collègue éthologues travaillant sur des fourmis ayant le même comportement que Cataglyphis, il s'avère très déstabilisant de constater qu'une stratégie telle que l'intégrateur de chemin ne demandant aucune cartographie, ni aucun repère visuel permet d'atteindre une précision centimétrique. Lors d'une discussion personnelle avec le professeur Jochen Zeil (Biologiste éthologue, Australian National University, Canberra), ce dernier nous a confié son étonnement face à la précision du robot. Il réalisait, par robot interposé, à quel point cette stratégie d'intégration de chemin utilisée par la fourmi pouvait être efficace et précise. Néanmoins, nous savons que lorsque la fourmi a le choix (Heinze 2018), la fourmi préfère utiliser une stratégie de retour à la maison basée sur des indices visuels que sur son intégrateur de chemin. Nous avons suggéré dans notre travail sur le robot AntBot que ce dernier pouvait aussi estimer son orientation grâce à ses foulées (estimation très imprécise). Il n'y a cependant pas de preuve que les fourmis peuvent le faire aussi ou pas. Cette question reste ouverte pour de futures expériences côté vivant. Finalement, le robot AntBot qui est une forme de réduction de la fourmi permet de montrer les limites et performances des fonctions du vivant dont il est issu. Dans ce sens, le robot devient donc un étalon (référence) pour le vivant.
Le projet de non-fleur proposé par le designer Thomas Pausz (Grania 2019) avait pour but de créer un fleur sans forme capable de leurrer des mouches syrphes pour mieux comprendre comment ces animaux perçoivent le monde. Dans la lignée de ce projet, le robot AntBot peut être aussi considéré comme un artifice mettant en lumière l'efficacité de la nature. Le robot AntBot nous aide à mieux comprendre comment la fourmi du désert perçoit le monde et quels sont les pré-requis en termes de perception visuelle pour atteindre un tel niveau de précision. En aucun cas, le robot AntBot est un exemple de domestication du vivant car on se rend bien compte lorsqu'on le compare directement à une fourmi que ses performances sont loin d'être à la hauteur de son modèle biologique.

Rappelons ici les motivations premières du bioroboticien : une meilleure compréhension du vivant et une réponse à un problème précis de robotique déjà résolu par la nature.

Bibliographie

Walter W. G. (1950) An imitation of life, Scientific American 182(5):42—45

Braitenberg, V. (1984). Vehicles: Experiments in synthetic psychology. Cambridge, MA: MIT Press.

Webb B. (2000) What does robotics offer animal behaviour?. Animal behaviour 60 (5), 545-558.

Pieron H. (1904) Du rôle du sens musculaire dans l'orientation des fourmis. Bull Inst Gen Psychol Paris 4:168–186

Reynaud G. (1898) Les lois de l'orientation chez les animaux. Rev Mondes 148:380–402

Cornetz V. (1910) Trajets de Fourmis et Retours au Nid. Paris: Institut Ge´ ne´ ral Psychologique

Cecil A. (2018) "Is "dead reckoning" short for "deduced reckoning"?". straightdope.com. Retrieved 2018-02-02.

Wehner R. (2003) Desert ant navigation: how miniature brains solve complex tasks. J Comp Physiol A 189(8):579-88.

J. Dupeyroux, J. Serres and S. Viollet (2019), AntBot: A six-legged walking robot able to home like desert ants in outdoor environments, Science Robotics, 4, vol. 27, eaau0307.

J. Dupeyroux, G. Passault, F. Ruffier, S. Viollet and J. Serres (2017), Hexabot: a small 3D-printed six-legged walking robot designed for desert ant-like navigation tasks, IFAC Conference, Toulouse, France.

REPPERT (S.M.), ZHU (H.) et WHITE (R.H.). (2004) – Polarized light helps monarch butterflies na- vigate. Current Biology. 14(2) : 155-158.

LABHART (T.) et Meyer (E.P.). (1999) – Detectors for polarized skylight in insects : a survey of ommatidial specializations in the dorsal rim area of the compound eye Microscopy Research and Technique. 47(6) : 368-379

HERZMANN (D.) et LABHART (T.). (1989) – Spectral sensitivity and absolute threshold of polarization vision in crickets : a behavioral study. Journal of Comparative Physiology A. 165(3) : 315-319,
LABHART (T.). – Polarization-opponent inter-neurons in the insect visual system. Nature. 331(6155) : 435 (1988).

S. Mafrica, S. Godiot, M. Menouni, M. Boyron, F. Expert, R. Juston, N. Marchand, F. Ruffier and S. Viollet (2015) A bio-inspired analog silicon retina with Michaelis-Menten auto-adaptive pixels sensitive to small and large changes in light, Optics Express, OSA, vol. 23, No. 5, open access.

Heinze S, Narendra A, Cheung A. (2018) Principles of Insect Path Integration, Current Biology. 28(17):R1043– R1058

Granja C (2019) Des fleurs de labo pour leurrer les abeilles, Usbek et Rica, (28) 102-103

U. Nehmzow and B. McGonigle (1993) Robot Navigation by Light European, Conference on Articial Life ECAL, Brussels.

WITTLINGER (M.), WEHNER (R.) et WOLF (H.). – The Ant Odometer : Stepping on Stilts and Stumps. Science. 312(5782) : 1965-1967 (2006).

PFEFFER (S.E.) et WITTLINGER (M.). – Optic flow odometry operates independently of stride integration in carried ants. Science. 353(6304) : 1155-1157 (2016).