

Ethologie et Physique : éclairages mutuels sur l'enfouissement d'insectes dans un milieu granulaire

Contexte

Alors que le comportement de locomotion des blattes est étudié depuis de nombreuses années¹⁻³, notamment comme source de bio-inspiration en robotique, leur aptitude à creuser et à s'enfouir demeure largement inexploré. Pourtant de nombreuses espèces creusent des galeries dans le bois mort et peuvent s'en nourrir (comme dans le genre *Cryptocercus*, le groupe-frère des termites eusociaux) ou bien s'enfouissent dans la terre ou le sable pour se protéger. L'étude des premières nous renseignerait sur l'évolution de la socialité chez les insectes⁴, alors que les secondes sont des ingénieures du sol dont le rôle essentiel pour les écosystèmes est reconnu⁵. Dans les deux cas, les pattes et le pronotum—1^{er} segment thoracique en forme de bouclier chez les blattes—jouent un rôle important même si celui-ci reste très imprécisément caractérisé⁶⁻⁷.

Nous avons initié l'étude des variations de forme du pronotum de différentes espèces de blattes en fonction de leur milieu de vie. Nous disposons ainsi de modèles 3D pour une 50^{aine} d'espèces de blattes (CT-scans et photogrammétrie) qui nous serviront pour étudier le lien entre habitat et morphologie de ces insectes (i.e. étude d'écomorphologie). Ici, nous proposons de nous focaliser sur un écomorphe particulier, les fouisseurs, en distinguant les espèces fouissant dans le sable ou dans la terre (soit deux sous-écomorphes). Mais, pour mieux comprendre les liens entre formes et comportements réalisés, il est indispensable de documenter précisément ces comportements et tenir compte des propriétés physiques du substrat. Les replacer dans un contexte phylogénétique, obtenu par ailleurs⁸, est aussi essentiel pour sortir des observations mono-spécifiques ignorant l'histoire phylogénétique des taxons. Ce projet vise donc à faire discuter physique des milieux dits granulaires et évolution de la morphologie chez un groupe d'insectes. Cet éclairage mutuel est primordial pour pouvoir répondre à des aspects fondamentaux sur la biologie et la physique du déplacement en milieu granulaire chez ces insectes fouisseurs dont les capacités à s'immiscer dans les moindres interstices sont reconnues mais sous-étudiées⁹.

Objectifs et complémentarité

Grâce à une approche comparative combinant des outils de l'éthologie et de la physique, nous allons caractériser et quantifier le comportement d'enfouissement des blattes. En retour, le modèle 'blatte' permettra de complexifier les expériences menées pour étudier la locomotion dans des milieux granulaires calibrés et apporter des informations fondamentales sur le lien forme/fonction.

Pour cela nous aurons recours à des plateformes de force, de la cinématique 3D, des impressions 3D et des expériences modèles en milieu granulaire. L'accès aux différents outils est assuré et disponible dans les établissements auxquels les porteurs sont affiliés. Ensemble, ces travaux nous permettront d'étudier et de préciser le lien entre morphologie et capacité d'enfouissement chez les blattes, tout en permettant d'approfondir nos connaissances sur la physique du déplacement en milieu granulaire.

Le projet repose donc sur la complémentarité des deux co-porteurs avec des compétences sur le comportement et l'histoire naturelle des blattes d'une part (FL – ISYEB) et sur la physique des milieux granulaires d'autre part (BDT – FAST). Les co-porteurs n'ont jamais eu l'occasion de travailler ensemble ; ce projet doctoral serait donc l'opportunité d'une nouvelle collaboration transdisciplinaire.

Objectifs spécifiques

- **Quantification des forces de poussée**

Pour plusieurs espèces, disponibles en élevage au laboratoire ou facilement accessibles auprès d'éleveurs avec lesquels nous avons déjà travaillé (FL), nous quantifierons la force déployée par les insectes lorsqu'ils sont soumis à un stimulus, ainsi que l'angle de poussée. Pour les espèces en élevage, des séries ontogénétiques seront utilisées pour évaluer comment ces deux paramètres (intensité et direction de la poussée) évoluent avec le développement des insectes. Des espèces fouisseuses et non-fouisseuses seront comparées et nous permettront de tester si les blattes fouisseuses sont celles déployant la plus grande force. Plus précisément, en contrastant espèces creusant dans le sable ou dans la terre, nous testerons si les deux sous-écomorphes déploient des forces équivalentes (en prenant en compte les

effets taille et phylogénétique). Nous relierons ces résultats aux propriétés granulométriques (composition, granulométrie, compacité, humidité) du substrat dans lequel ces espèces évoluent.

- **Cinématique 3D : mouvement des pattes et du pronotum**

Pour un nombre plus restreint d'espèces de blattes, nous caractériserons le comportement d'enfouissement en capturant la cinématique du mouvement en 3D combinant rayons X et caméra haute vitesse. En plus de la description fine des comportements, nous évaluerons si les blattes fouissant dans le sable et la terre utilisent leurs pattes et leurs pronotums de façon analogue. L'information phylogénétique, par ailleurs disponible⁸, sera là encore prise en considération.

- **Force de traînée et de portance en milieu granulaire**

Alors que les mouvements d'individus dans des milieux aqueux ou aériens sont bien étudiés, ceux réalisés dans le sol ou autres milieux granulaires le sont nettement moins. Les milieux granulaires ont des lois de comportement complexes qui expliquent que les physiciens ont étudié le comportement de ces milieux dans des configurations très simplifiées, éloignées de la réalité biologique.

Ici, nous réaliserons des expériences modèles dans des milieux granulaires calibrés (billes de verres de granulométrie contrôlée). Ceci nous permettra d'étudier de manière indépendante le rôle des pattes et du pronotum des blattes vis-à-vis de leur capacité d'enfouissement et de développer une description physique du problème (Figure 1). Pour le pronotum, plus spécifiquement, nous imprimerons les modèles 3D existants des différentes espèces et mesurerons les forces de traînée et de portance qu'ils subissent dans ces milieux granulaires modèles. Ces observations permettront d'envisager l'étude du lien entre la forme du pronotum et les capacités d'enfouissement des différentes espèces de blattes.

- **Mouvement des pattes en milieu granulaire**

En s'appuyant sur les mouvements des pattes caractérisés par cinématique 3D, nous réaliserons des expériences avec des pattes robotisées mises en mouvement dans des milieux granulaires modèles. Les mouvements reproduiront ceux observés chez les blattes aux rayons X et les pattes seront instrumentées afin de mesurer les forces qu'elles développent au cours de leur mouvement dans ces milieux. Les expériences seront réalisées en agrandissant les échelles de taille (tout en conservant le rapport entre la taille des blattes et la taille des grains) permettant d'accéder aux forces exercées sur les pattes ce qui est difficile d'un point de vue expérimental avec les blattes.

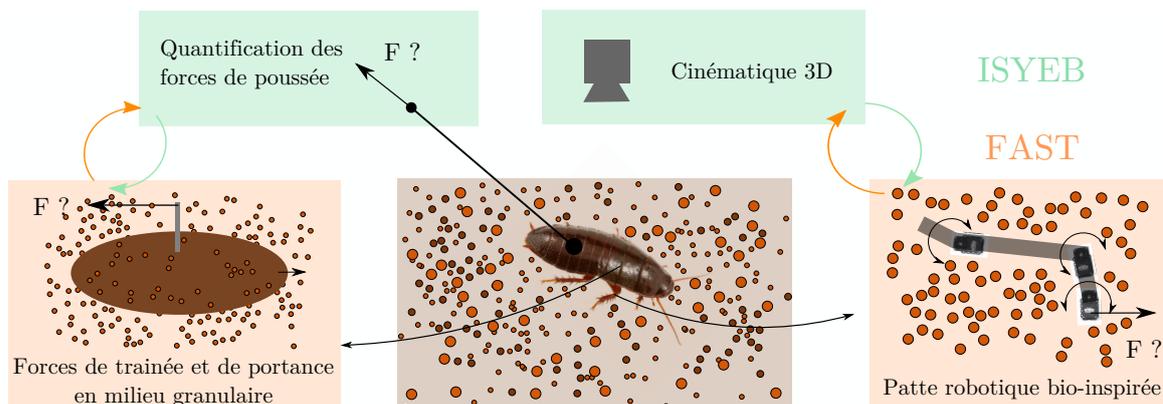


Figure 1. Schéma résumant les quatre objectifs spécifiques, la localisation des expériences et les interactions entre objectifs et partenaires.

Plan de travail

1. Quantification des forces de poussée pour une 20aine d'espèces et cinématique 3D sur une 10aine d'espèces (ISYEB). Sept espèces sont disponibles en élevage (taille de 1 à 5 cm) et seront partiellement étudiées au printemps 2023 lors de la mise en place et du test du dispositif expérimental de force de poussée (ajustement du dispositif déjà existant pour les blattes). Pour la cinématique 3D, le dispositif couplant rayons X et caméra à haute vitesse est également disponible et la pose de marqueurs sur le pronotum et la base des pattes est réalisable. Un financement de

- quelques centaines d'euros (support ISYEB) sera nécessaire pour obtenir les espèces auprès d'éleveurs.
2. Caractérisation des forces de traînée et de portance sur les modèles de pronotum imprimés en 3D (atelier de fabrication numérique du FAST) à partir des scans effectués à l'ISYEB. Ces expériences seront réalisées sur un banc de test granulaire qui intègre des capteurs de forces. On étudiera l'influence de la profondeur et de l'orientation du pronotum sur les forces dans le milieu granulaire ainsi que l'effet du rapport d'aspect entre la dimension de cet objet et celle des grains qui composent le milieu. Ces résultats seront mis en regard des mesures effectuées sur les blattes à l'ISYEB.
 3. Développement d'une patte robotique bio-inspirée par le mouvement des pattes de blattes observé aux rayons X. Le laboratoire FAST dispose de servomoteurs (Dynamixel AX-12) et de microcontrôleurs permettant de reproduire des mouvements complexes comme ceux observés dans le monde vivant. Caractérisation des forces développées par cette patte robotique sur le banc de test granulaire. Une modélisation physique de ce problème sera développée et utilisée pour interpréter les observations réalisées sur l'enfouissement des blattes dans le sable et la terre (FAST et ISYEB).

Faisabilité, risques

Notre approche combine des outils complémentaires qui seront appliqués sur une gamme d'espèces plus ou moins large en fonction des questions. Les observations comportementales viendront nourrir les expériences réalisées en milieu granulaire et les connaissances de la physique des milieux granulaires viendront éclairer les interprétations éco-évolutives. Ces échanges limitent le risque qu'un seul des deux aspects (éthologie et physique) ne soit approfondi au cours du projet doctoral. Par ailleurs, l'emboîtement d'échelle taxonomique assure la faisabilité du projet, en facilitant les éventuelles réorientations nécessaires.

Ce projet vise à mieux comprendre la dynamique d'un comportement important pour les insectes (i.e. s'enfouir pour s'abriter, se nourrir, fuir des prédateurs, élever ses jeunes, etc.) en se focalisant sur deux parties clés de l'anatomie de ces insectes : les pattes et le pronotum. Les pattes des blattes sont très étudiées, notamment à des fins de robotique ou bio-inspiration, alors que le pronotum est impliqué dans des fonctions diverses (locomotion, défense, choix de partenaire sexuel) et donc soumis à des contraintes sexuelles et environnementales multiples. Notre projet contribuera à caractériser les propriétés de la cuticule des insectes, un matériau d'inspiration biologique.

Références citées

- ¹Kaliyamoorthy, Zill, Quinn, Ritzmann & Choi. 2001. Finite element analysis of strains in a *Blaberus* cockroach leg during climbing. In Proc. IEEE/RSJ Internat. Conf. on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the Next Millennium (Vol. 2, pp. 833-838). IEEE.
- ²Weihmann, Brun & Pycroft. 2017. Speed dependent phase shifts and gait changes in cockroaches running on substrates of different slipperiness. *Front. in Zool.* 14(1), 1-15.
- ³Proctor & Holmes. 2018. The effects of feedback on stability and maneuverability of a phase-reduced model for cockroach locomotion. *Biol. cybernetics* 112, 387-401.
- ⁴Nalepa. 1984. Colony composition, protozoan transfer and some life history characteristics of the woodroach *Cryptocercus punctulatus* Scudder (Dictyoptera: Cryptocercidae). *Behav. Ecol. Sociobiol.* 14, 273-279.
- ⁵Bétard. 2021. Insects as zoogeomorphic agents: an extended review. *Earth Surf. Proc. and Landforms* 46(1), 89-109.
- ⁶Hawke & Farley. 1973. Ecology and behavior of the desert burrowing cockroach, *Arenivaga* sp. (Dictyoptera, Polyphagidae). *Oecologia* 11, 263-279.
- ⁷Xu, Snelling & Seymour. 2014. Burrowing energetics of the Giant Burrowing Cockroach *Macropanesthia rhinoceros*: an allometric study. *J. Insect Physiol.* 70, 81-87.
- ⁸Legendre, Nel, Svenson, Robillard, Pellens & Grandcolas. 2015. Phylogeny of Dictyoptera: dating the origin of cockroaches, praying mantises and termites with molecular data and controlled fossil evidence. *Plos one* 10(7), e0130127.
- ⁹Bell, Roth & Nalepa. 2007. *Cockroaches: ecology, behavior, and natural history*. JHU Press.