

Décrypter le vol des abeilles en 3D



© E. KINSMAN/BSIP

Dans notre nouvelle aire, l'anthropocène, dérivant de la croissance démographique humaine et de son activité industrielle, les animaux vivent dans des écosystèmes modifiés, où ils doivent faire face à de nouvelles pressions de sélection. Ces pressions anthropiques directes (ex : traitements phytosanitaires) ou indirectes (ex : interactions biotiques avec des espèces invasives, altération des ressources) peuvent altérer le comportement des animaux. Après s'être intéressés aux impacts létaux de ces pressions anthropiques, les scientifiques s'interrogent aujourd'hui sur les potentielles nuisances comportementales qu'elles engendrent. Les théories d'écologie évolutive prédisent qu'en réponse à des pressions de sélection, les organismes adaptent leurs comportements. Cependant, certaines adaptations comportementales impliquent une cascade d'événements qui aboutissent *in fine* à la mort (1). L'étude de la réponse comportementale des animaux face aux pressions environnementales nécessite le recours à des technologies de pointe, adaptées à l'espèce visée. Les traceurs GPS, les balises Argos ou même les caméras à auto-déclenchement ont permis de faire de grandes avancées dans l'étude comportementale des mammifères, oiseaux et poissons. Mais ces supports technologiques ne peuvent être miniaturisés à l'échelle de l'insecte, des abeilles en particulier.

Défi technologique relevé : les trajectoires d'envol et d'atterrissage de milliers d'abeilles sont désormais décryptables en 3D. Grâce à l'utilisation de la stéréovision en apiculture, il est aujourd'hui possible d'étudier les troubles comportementaux des abeilles en vol dans un contexte de vidéosurveillance des colonies *in natura*.

ÉTUDIER LE COMPORTEMENT *IN NATURA*

Depuis plus de vingt ans, les apiculteurs tirent la sonnette d'alarme face aux surmortalités de colonies d'abeilles qu'ils subissent. Ce syndrome d'effondrement des populations d'abeilles mellifères*1, observé dans le monde entier, alarme les biologistes, car le rôle de ces insectes dans les écosystèmes est essentiel. En effet, le service de pollinisation qu'offrent les abeilles garantit une part non négligeable des rendements agricoles des cultures fruitières, oléagineuses et maraîchères, mais également la reproduction des plantes

*1 Au cours des dernières décennies en Union Européenne et aux États-Unis, de nombreuses exploitations apicoles ont subi une augmentation des pertes de colonies. Les pertes annuelles peuvent dépasser 30 % du cheptel d'un apiculteur, contre 5 % à 10 % avant l'apparition de ce syndrome d'effondrement des colonies (SEC). Les causes de ce SEC ne sont pas complètement identifiées à ce jour, mais deux syndromes distincts ont été observés : d'une part depuis les années 1990, une diminution de la survie des cheptels apicoles avec un doublement voire un quadruplement du taux de mortalité hivernale selon les régions et les pays ; d'autre part un syndrome, apparu plus récemment en 2006, nommé CCD pour *Colony collapse disorder*. Le CCD est caractérisé par une soudaine disparition des abeilles adultes de leur ruche, sans qu'aucune raison ne soit perceptible.

Les auteurs

Fabrice Requier^{1,2,3}, Guillaume Chiron⁴, Michel Ménard⁴

¹ Inra, UR 406 Abeilles et environnement, Site Agroparc, Avignon requierf@gmail.com

² Centre d'études biologiques de Chizé CNRS & Université de La Rochelle, UMR 7372, Beauvoir-sur-Niort

³ Inra, UE 1255 Entomologie, Surgères

⁴ Laboratoire L3i, Avenue Michel Crépeau Université de La Rochelle



◀ Abeille à miel domestique (*Apis mellifera*)

© J. MEUL/ARCOBSIP

à fleurs entomophiles, dépendante des insectes. Malgré l'ampleur économique et écologique du déclin des abeilles, ses causes restent incomprises. L'hypothèse la plus plausible est multifactorielle : de nombreuses pressions environnementales – pesticides, parasites, pathogènes, prédateurs, malnutrition – causeraient, seules ou en interaction, le déclin de ces insectes (2). Pour tenter d'élucider cette mystérieuse problématique, de récentes études recommandent d'explorer la réponse comportementale des abeilles face aux pressions environnementales, *in natura*, donc en conditions naturelles. Des scientifiques ont ainsi pu lever le voile sur l'impact des pesticides sur les abeilles (3) en ayant recours à une technologie de pointe, le RFID (*Radio Frequency Identification*) (4). Dans cette étude publiée en 2012 dans la revue *Science*, des butineuses ont été équipées de puces électroniques afin de retracer leur retour à la ruche. Les résultats sont sans appel. Les butineuses exposées aux pesticides perdent leurs aptitudes à rentrer à la ruche. Un trouble comportemental que les auteurs sont parvenus à mettre en avant avec le thiaméthoxame, nouvel insecticide de la famille des néonicotinoïdes, un neurotoxique connu pour dégrader les capacités d'orientation des abeilles en agissant sur leur système nerveux. Cette étude confirme, d'une part, que les troubles compor-

tements peuvent conduire à la mort de l'animal, et d'autre part, que l'adaptation de nouvelles technologies à l'échelle de l'abeille est indispensable pour étudier le comportement *in natura*. Plusieurs types d'outils sont aujourd'hui disponibles.

LES BUTINEUSES SUIVIES À LA TRACE

L'abeille mellifère (*Apis mellifera*) est un insecte social, qui vit en colonie de plusieurs dizaines de milliers d'individus. Chaque jour, des milliers de butineuses sortent de la ruche pour collecter nectar et pollen sur les fleurs. Le butin rapporté permet, d'une part, d'alimenter la colonie composée de la reine, des larves, des mâles et des abeilles internes (abeilles adultes n'ayant pas l'âge de butiner) (4), et d'autre part, de constituer des réserves. Le miel en est l'ingrédient principal. Issu de la déshydratation du nectar, il est stocké dans la ruche pour garantir l'alimentation de la colonie lors de périodes ne permettant pas le butinage, comme les jours de pluie ou d'hiver. Les butineuses jouent ainsi un rôle clé dans la survie de la colonie. Elles sont directement exposées aux pressions environnementales, comme les pesticides ou les prédateurs, tel le frelon asiatique *Vespa velutina* (5). Suivre le comportement des butineuses est donc un objectif prioritaire, mais aussi un défi tech-

nologique, car très peu d'outils sont disponibles pour suivre les abeilles en conditions naturelles. Chaque colonie comprend plus de 10 000 butineuses, des individus de 12 mm et 100 mg qui prospectent dans un rayon moyen de 2 km autour de leur ruche (6).

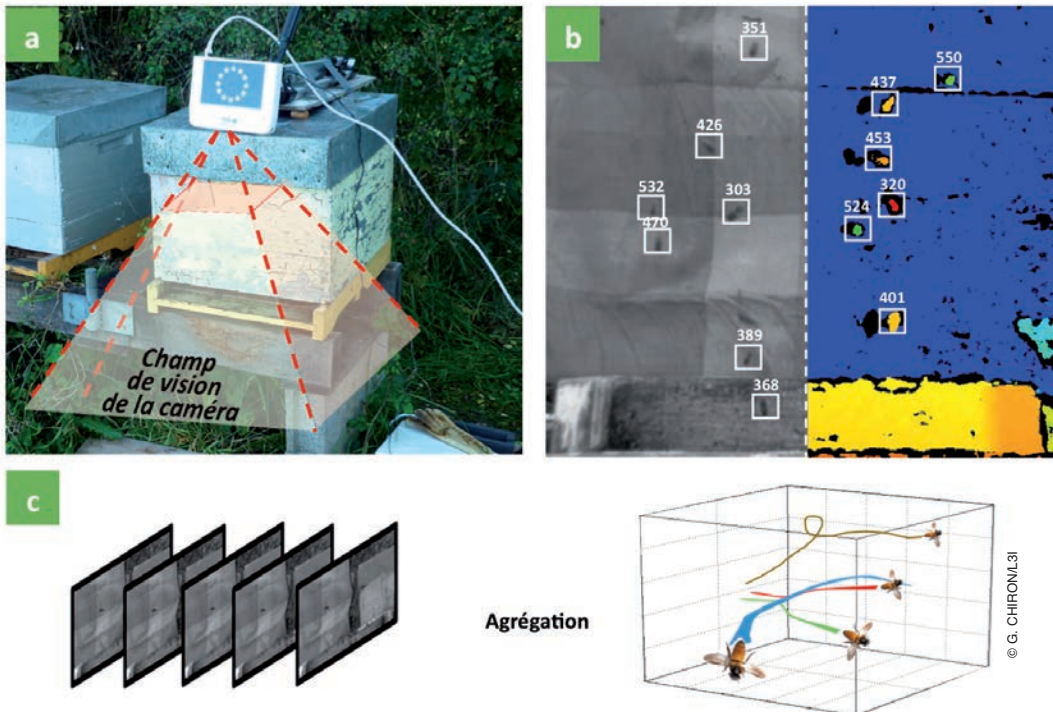
Les premières études comportementales (au début du XX^e siècle) se sont focalisées sur le décodage des danses des abeilles (7). Celles-ci communiquent en effet par différents moyens, dont la danse. Chaque début de journée, des exploratrices prospectent et rapportent à la ruche un échantillon de butin qu'elles font goûter à leurs congénères, tout en indiquant, par une danse, la localisation et la quantité de butin disponible. Ce comportement de communication a été longtemps étudié pour améliorer les connaissances sur la cognition des abeilles, et plus récemment envisagé pour comprendre leur adaptation aux pressions anthropiques (8). Cependant, l'étude de ces danses est aujourd'hui réservée à une poignée de spécialistes, car elle nécessite une lourde logistique^{*2}. En outre, cette étude des danses ne permet pas de retracer le mouvement des butineuses dans l'espace, c'est-à-dire le chemin parcouru depuis la ruche jusqu'aux lieux de butinage, et vice versa.

Seule la technique du radar harmonique permet de retracer le parcours d'exploration et de butinage des abeilles (9, 10). Elle



*2 Les danses des abeilles se font le plus souvent à l'intérieur de la ruche, plus rarement à l'entrée de celle-ci. Leur étude nécessite d'observer l'intérieur de la ruche, sans toutefois perturber le comportement des abeilles. Une lourde logistique est donc mise en place : ruches vitrées couvertes par un voile occultant la lumière et abritant un expérimentateur; observation des danses à l'aide d'une lumière rouge, non perceptible par les abeilles.

Écologie



Collecter en 3D les trajectoires de vol devant la ruche via un dispositif de stéréovision

- Caméra stéréovision positionnée au dessus de l'entrée de la ruche;
- Couple RGB-D (intensité à gauche/profondeur à droite) et détections des abeilles mellifères en vol (chiffre indiquant la profondeur en mm);
- Inférence des trajectoires par calcul de la dynamique des cibles (agrégation séquentielle des positions).

consiste à les équiper avec une micro-antenne réflectrice, chargée de renvoyer le signal diffusé par un émetteur-récepteur au sol. Cet outil présente cependant de nombreuses limites, parmi lesquelles la dimension de l'antenne – aussi longue que les individus eux-mêmes et pesant plus de 15 % de leur masse corporelle –, la faible distance de détection – 900 mètres de portée uniquement en terrain plat – et surtout, l'impossibilité de produire des signaux distinctifs, obligeant les scientifiques à suivre un seul individu à la fois. Ces restrictions techniques expliquent qu'à ce jour, seule une poignée de scientifiques avertis utilise le radar harmonique, avec guère plus d'une dizaine d'individus suivis par étude en moyenne.

DES TECHNOLOGIES LIMITÉES

Face à ces limites quantitatives, la technologie RFID a été adaptée aux abeilles en 2003 (4,11). Ces dernières sont équipées de puces RFID miniaturisées (1x1,6 mm) contenant un identifiant unique détectable à faible distance par des lecteurs électroniques. Les puces pèsent 3 à 4 mg, ce qui ne représente que 3 à 4 % du poids des abeilles et reste bien inférieur aux 70 mg de nectar que peut trans-

porter le jabot des butineuses. Si la faible portée des lecteurs – quelques millimètres seulement – ne permet pas de localiser les abeilles à l'extérieur de la ruche, le dispositif rend possible, en revanche, leur identification lors de leurs entrées et sorties. Cette technologie permet également de retracer pour chaque abeille, à la seconde près, la chronologie de ses allées et venues.

Plus récemment, en 2012, des compteurs optiques ont été adaptés à l'abeille (12,13). Ici, les lecteurs RFID laissent place à une caméra chargée de surveiller 24h/24 l'entrée de la ruche. Des algorithmes intelligents dédiés au traitement des vidéos numériques (ex : détecteurs de mouvements) se chargent de comptabiliser le nombre d'abeilles marchant sous l'objectif de la caméra. Suivant la même logique que l'outil RFID, il est possible de suivre individuellement les butineuses à l'aide de marqueurs visuels adaptés (point coloré, numéro, etc.). Néanmoins, cette option met à mal le caractère non-intrusif de l'approche et s'avère techniquement contraignante. En outre, ces outils automatiques très performants ne permettent pas de retracer le mouvement des butineuses à l'extérieur de la ruche, et encore moins leurs comportements de vols.

En ce qui concerne la collecte des trajectoires d'animaux et d'insectes à partir de vidéos (*tracking*), notons l'existence d'un panel de méthodes et d'outils assez génériques dédiés à l'écologie, comme ceux conçus et commercialisés par Noldus, un des acteurs historiques dans le domaine (14). Suivant une démarche plutôt académique, Microsoft Research a également mis à disposition l'outil « Zoo Tracker » (15). Les outils et méthodes de suivi d'insectes proposés jusqu'à récemment répondaient essentiellement à des problématiques de trajectométrie en 2D, telles que l'observation de fourmis dans une boîte de Pétri (16) ou l'analyse de la danse des abeilles à l'intérieur de la ruche (17). Mais depuis 2008, Intel Research se démarque en misant sur la vidéo pour compter non plus simplement les passages, mais aussi les vols d'abeilles entrantes et sortantes, à l'aide d'une caméra classique fixée à l'extérieur de la ruche (18). Cependant, l'absence d'information 3D est pénalisante, car elle ne permet pas d'étudier avec précision les mouvements de vol (accélération, vitesse, virages, collisions). Sans compter qu'en cas de forte affluence, il est difficile à partir d'images classiques 2D, même avec un algorithme de *tracking*, de maintenir dans le temps un suivi individualisé des abeilles, car les nombreux croisements et superpositions d'insectes sont source de confusion.

LES ABEILLES SOUS VIDEO-SURVEILLANCE 3D

Les trajectoires de vol des insectes n'ont été que très peu étudiées par les écologues jusqu'à aujourd'hui, faute de moyen pour les collecter. Les récentes caméras dites « stéréovision » permettent d'appréhender une scène en 3D en captant, à l'instar de la vision humaine, des informations de profondeur en plus de la couleur. L'accès simplifié à cette technologie offre de nouvelles possibilités pour le suivi des abeilles *in natura*, car elle lève un certain nombre de verrous scientifiques inhérents au suivi de si nombreuses cibles. L'activité de la ruche peut en effet promouvoir jusqu'à dix milles butineuses par

jour, engendrant un nombre élevé de cibles à suivre simultanément. Entre les vols d'entrée, de sortie et les simples vols de passage, l'entrée de la ruche est un théâtre mouvant où cohabitent des scènes d'entrelacement, de collision et parfois même de prédation.

En l'absence de marquage, l'apparence similaire des abeilles (forme, taille) complexifie leur suivi individualisé selon des critères visuels. Chacune d'elles ne mesure qu'une dizaine de millimètres, ce qui nécessite une caméra suffisamment précise en termes de définition, en particulier si l'on souhaite capter les individus les plus éloignés. En vol, les abeilles sont capables d'atteindre des vitesses de 8 m/sec, ce qui nécessite une fréquence élevée d'acquisition pour assurer le fonctionnement des algorithmes de *tracking*. Outre ces caractères biologiques intrinsèques à l'espèce, le suivi vidéo *in natura* doit composer avec des variations lumineuses qui dépendent de l'heure, de la météo et de la saison et qui modifient l'orientation et l'intensité de l'éclairage. Des mouvements soudains ou répétitifs peuvent également être source de confusion (visiteurs rampants, dépôts de feuilles mortes, herbes en mouvement, eau ruisselante, etc.)

UN CHOIX TECHNOLOGIQUE DÉTERMINANT

Ces contraintes biologiques et environnementales impliquent un choix rigoureux du modèle de

caméra, afin de trouver le meilleur compromis possible parmi les technologies existantes. Le modèle G3 Evo 3 de TYZX répond raisonnablement aux contraintes énoncées : stéréovision calculant la profondeur avec une précision de 3 mm, relative haute résolution de 740x468 pixels et fréquence d'acquisition élevée de 60 images par seconde. Ce modèle, une fois configuré avec des lentilles adaptées, peut visualiser l'ensemble des abeilles transitant par l'entrée de la ruche (figure p. 50 a) et ce, même lorsqu'il est positionné à une soixantaine de centimètres au-dessus de la planche d'envol. Cet agencement à l'avantage de limiter le caractère intrusif du dispositif, tout en assurant une visualisation suffisamment précise des abeilles, représentées en pratique par un minimum de 8 x 5 pixels à une distance de 80 cm de l'objectif. Au-delà de cette distance, la précision n'est plus assez bonne pour les détecter et les suivre correctement.

En aval de l'acquisition vidéo, des méthodes de traitement automatique sont utilisées pour calculer les trajectoires en 3D propres à chaque abeille. Ce calcul se déroule en deux phases distinctes. La première consiste à détecter et localiser en 3D chaque abeille à partir des informations d'intensité lumineuse et de profondeur fournies par la caméra stéréovision (figure p. 50 b). Les mouvements sont perçus grâce aux différences détectées entre les images successives. L'information de profondeur permet, dans un second temps, de lever les ambiguïtés

quant à l'origine du mouvement constaté (abeille, ombre portée, herbes hautes, autres insectes, etc.), mais aussi dans certains cas, de détecter les cibles statiques. Cette approche offre ainsi la possibilité de localiser en 3D la quasi-totalité des abeilles en vol (95 %) avec une précision supérieure à 90 %, sinon simplement en 2D dans certains cas extrêmes (trop forte affluence).

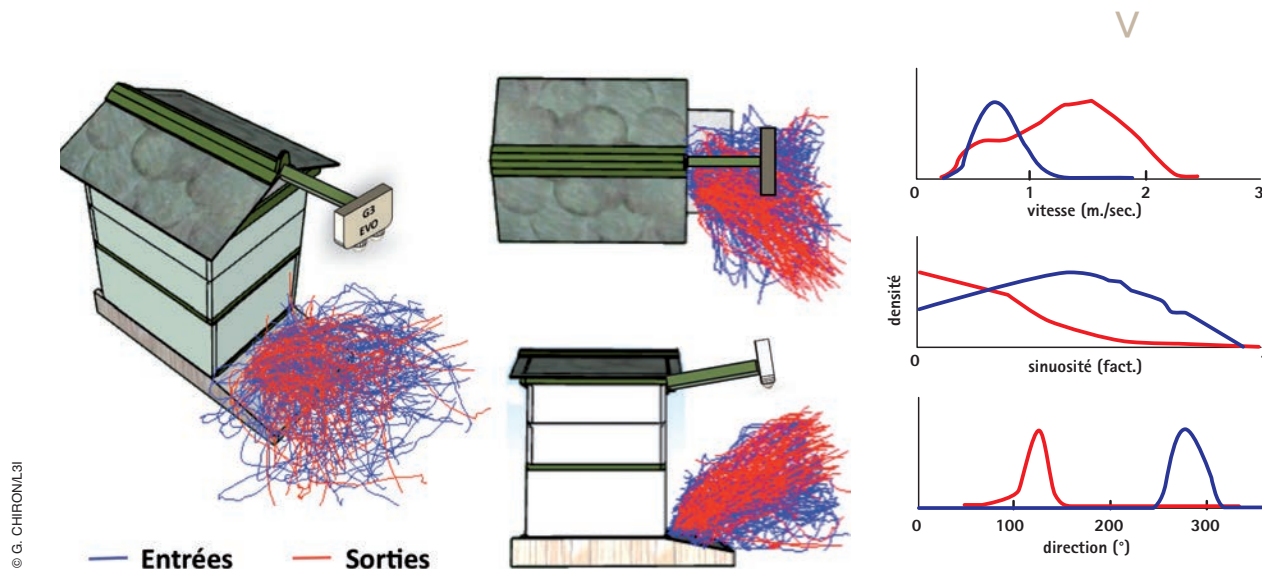
Pour obtenir des trajectoires proprement dites à partir d'une séquence d'images, il est ensuite nécessaire de comparer les positions détectées entre une image et sa suivante puis d'agrèger l'ensemble des données (figure p. 50 c). Plus le nombre de cibles à suivre est important, plus la problématique d'agrégation devient complexe. La puissance de calcul des ordinateurs modernes permet d'explorer et de trouver les combinaisons susceptibles de représenter au mieux les trajectoires réelles de chaque abeille. L'évaluation des hypothèses d'agrégation s'appuie sur un certain nombre de critères tels que la courbure, la vitesse, l'accélération, les possibilités d'apparition/disparition dans le champ de la caméra (19).



DES TRAJECTOIRES BIEN DIFFÉRENTES

Suite aux reconstructions des trajectoires de chaque abeille, il est désormais possible de distinguer les envols et les atterrissages, et plus finement encore, d'étudier le comportement de vol. Chaque

Reconstitution 3D et analyse des trajectoires d'entrées/sorties d'abeilles mellifères à partir des données de vol acquises *in natura* (Echantillon de la journée du 16 octobre 2015)



trajectoire peut être caractérisée par sa vitesse (en m/s), par un facteur de sinuosité et par sa direction globale (en degrés). Parmi un demi-million de trajectoires suivies devant une même ruche expérimentée, on distingue deux directions notables (figure p. 51). L'une autour du cap 115° correspondant aux sorties (environ 25 % des trajectoires captées) et l'autre autour du cap des 289° correspondant aux entrées (environ 18 % des trajectoires captées). Le comportement d'envol des abeilles se distingue très nettement du comportement d'atterrissage (figure p. 51). En effet, les abeilles qui décollent volent en moyenne 1,9 fois plus vite que les abeilles qui atterrissent. Les vols de sortie sont aussi globalement plus directs (moins de sinuosité) que les vols d'entrée.

Ces différences comportementales peuvent s'expliquer par plusieurs mécanismes. D'une part, à l'atterrissage, comme pour les avions, les aérosystèmes doivent réduire leur vitesse avant de toucher le sol. Pour cela, les abeilles effectuent des virages. De plus, l'entrée de la ruche peut être perçue comme un entonnoir où toutes les trajectoires convergent (figure p. 51). Afin d'augmenter leur vigilance, les abeilles peuvent effectuer des virages pour définir un point d'atterrissage tout en évitant les collisions. Enfin, les abeilles rentrant à la ruche sont fréquemment des butineuses qui

rapportent leur butin (pollen et/ou nectar). Leur poids peut être deux fois supérieur à celui d'une butineuse sans butin, ce qui a des conséquences sur leur comportement de vol.

VERS DES SUIVIS INDIVIDUALISÉS

Face aux pressions environnementales, les abeilles sont susceptibles de modifier leur comportement de vol, lequel à son tour peut avoir une influence sur leur probabilité de survie. Par exemple, l'exposition aux pesticides altère les capacités d'orientation des butineuses, les empêchant de retrouver leur ruche. Autre exemple, le frelon asiatique perturbe leur activité de vol devant la ruche, terrain de chasse de ce prédateur d'abeilles. L'impact de ces pressions environnementales peut être observé sur les trajectoires d'envol et d'atterrissage des abeilles. Imaginons deux lots d'individus dont l'un serait soumis à une pression environnementale (pesticides) et l'autre non. Ces deux lots d'abeilles seraient introduits dans la même ruche et distingués par l'adjonction d'un point coloré sur le thorax des individus exposés. Comme évoqué précédemment, il existe des méthodes permettant d'identifier la présence de marques sur les abeilles à partir d'un système de vidéosurveillance (12,13). Elles s'avèrent très performantes lorsqu'on filme à très courte dis-

tance et en 2D, mais sont trop restrictives pour être appliquées *in natura*, en raison notamment de l'impossibilité d'obtenir une image suffisamment détaillée du thorax sous certaines conditions d'éclairage, d'angle et d'observation (tangage et roulis^{*3}).

Dans ce contexte, les caméras 3D présentent un avantage notable. Durant son suivi dans le champ de la caméra, l'abeille est observée sous différents angles et conditions d'éclairage. Cette diversité de situations d'observation maximise les chances de capturer au moins une image satisfaisante de l'abeille (figure ci-dessous a). Cependant, dans bon nombre de cas, aucune image individuelle ne permet de statuer sur la présence ou non d'une marque. Des méthodes de traitement d'images interviennent alors pour extraire les détails nécessaires (marquage, position de l'abdomen, tête) à partir d'une séquence d'images de mauvaises qualité (floues, mal centrées, abeilles superposées). L'abeille étant longiligne, son orientation (lacet^{*3}) est facilement détectable. Sa tête est visuellement la partie la plus stable et demeure en toutes circonstances très foncée. Ces deux critères permettent de fixer des points de repère, rendant possible

*3 Système d'axes utilisé en aéronautique.

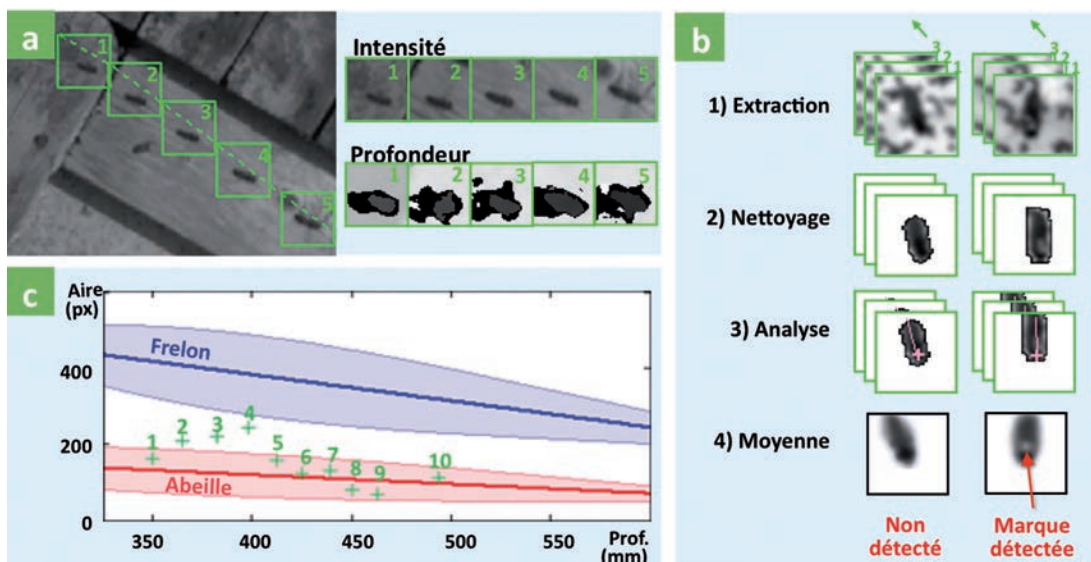
Le tangage, le roulis et le lacet sont respectivement des mouvements de rotation autour des axes longitudinal, transversal et vertical.

Distinction des cibles (abeilles mellifères/frelons asiatiques) marquées ou non en fonction de leur morphologie, de leur couleur et de leur taille

a. Extraction des imagerie (intensité/profondeur) à partir d'une trajectoire ;

b. Méthode de détection de marque par seuillage sur l'apparence moyenne.

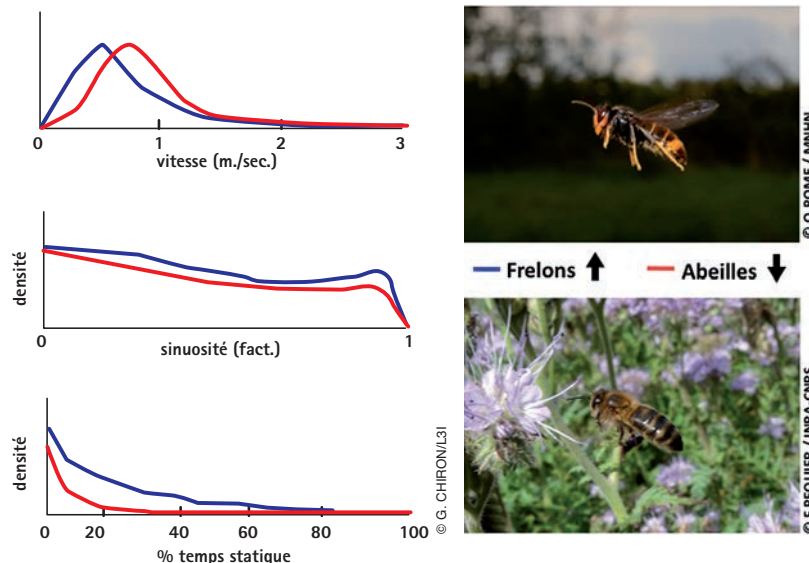
c. Projection des rapports aire/profondeur des imagerie d'une trajectoire d'abeille et affectation de l'appartenance à l'espèce abeille ou frelon (abeille ici).



un recadrage et une superposition d'images d'un même individu. Il est alors possible de calculer une seule image représentant une apparence moyenne de l'insecte (figure p. 52 b). Dans le cas d'une marque d'apparence uniforme (marquage contrôlé par l'expérimentateur), cette approche est particulièrement intéressante, car les zones saillantes sont bien amplifiées par la technique de moyennage. Pour statuer sur la présence ou non d'une marque, il suffit de comparer la zone de marquage (habituellement située sur le thorax) à une teinte de référence. La différence de teinte entre la tête et le thorax peut être utilisée, entre autres, pour fixer les seuils de tolérance utilisés lors des comparaisons. En revanche, dans le cas de marques visuellement moins homogènes (ex : puce RFID d'apparence non contrôlée), cette approche peut s'avérer inefficace. Dans ce cas, une seconde méthode offre de meilleurs résultats. Elle consiste à identifier sur chacune des images individuelles, mêmes floues, la zone qui ressemble le plus à une marque supposée. En cas de marquage avéré, on constate une relative stabilité au niveau des zones identifiées (au travers de critères de teintes, d'angles et de tailles). Une non-stabilité de ces critères au sein de la séquence d'images témoigne alors de la non-présence de marquage sur l'individu suivi. La détection des marques et qui plus est l'identification de celles-ci permettent d'associer une étiquette aux trajectoires d'abeilles. Dès lors, cela rend possible des applications telles que l'estimation de l'impact du pesticide sur le comportement de vol.

ABEILLES CONTRE FRELONS

Le problème, c'est qu'on ne trouve plus uniquement des abeilles devant les ruches. Les frelons asiatiques s'y sont invités depuis 2003. Espèce introduite accidentellement en France dans la région des Landes, le frelon asiatique a vite colonisé une grande partie de l'hexagone et des pays voisins (20), prenant en chasse, entre autres, les abeilles devant l'entrée de leur ruche. Le dispositif de vidéosurveillance 3D,



Comparaison des comportements de vol entre abeilles mellifères et frelons asiatiques devant la ruche

présenté ici, est capable d'enregistrer les trajectoires des abeilles et celles des frelons. De même qu'il est possible de détecter la présence de marques sur les abeilles, il est également possible de distinguer numériquement les frelons des abeilles. Avec une longueur d'environ 3 cm pour les frelons asiatiques contre 1,2 cm environ pour l'abeille mellifère, la taille est un critère différenciant essentiel. La distinction entre les deux espèces peut ainsi s'effectuer à partir des images, grâce au rapport taille/profondeur. Les millions de positions 3D détectées (abeilles et frelons confondus) et les tailles des images correspondantes montrent clairement une séparation entre les deux espèces (figure p. 52 c). Sur le plan numérique, cette approche constitue une référence pour la distinction automatique entre ces deux espèces. Il suffit en effet de confronter à ce modèle l'ensemble des couples taille/profondeur associés à une trajectoire pour estimer la probabilité que celle-ci ait été engendrée par l'une ou l'autre des deux espèces (figure p. 52 c).

De même qu'il est possible de comparer les trajectoires d'abeilles en entrées/sorties (figure p. 50), il est possible de comparer les trajectoires d'abeilles et de frelons (figure ci-dessus). Parallèlement au demi-million d'abeilles suivies, plus de 5000 trajectoires de frelons ont en effet été captées à proximité de la ruche. Les indicateurs sur la vitesse moyenne et le temps passé en vol statique montrent des différences notables de compor-

tement entre les deux espèces. En moyenne, les abeilles volent sensiblement plus vite que les frelons, à quelques dixièmes de mètre par seconde près, et passent globalement beaucoup moins de temps en vol statique que leurs prédateurs. Il est en revanche difficile d'observer une différence comportementale sur les courbures de vol des deux espèces.

L'utilisation de la stéréovision permet désormais d'étudier le comportement d'envol et d'atterrissage de milliers d'abeilles en 3D. Cette avancée technologique offre de nombreuses opportunités aux scientifiques pour étudier l'adaptation comportementale des abeilles face aux pressions environnementales. L'innovation dans le domaine des statistiques permettra à l'avenir de tirer le meilleur parti de cette multitude de données comportementales collectées, dont l'exploration ne fait que commencer (21). ■

Remerciements

Les travaux présentés ont été financés par la région Poitou-Charentes, les Fonds Européen Agricole de GAranti (FEAGA), la Fédération de Recherche en Environnement pour le Développement Durable (FREDD), France AGRIMER, et le Réseau National des Systèmes Complexes (RSNC), dans le cadre de différents projets de recherches (DynApis, EPERAS, POLINOV, et RISQAPI). Un remerciement tout particulier est adressé à Bruno Lescahier, Olivier Chappe, Pierrick Aupinel, Jean-François Odoux, Vincent Bretagnolle, Quentin Rome, Claire Villemant et Mickaël Henry pour leur contribution dans le cadre dans cette étude.

- (1) Stearns SC (1992) *The Evolution of Life Histories*, Oxford University Press, Oxford, UK
- (2) Goulson D et al. (2015) *Science* 347, 1255-957
- (3) Henry M et al. (2012) *Science* 336, 348-50
- (4) Requier F et al. (2014) *Biofutur* 46-51
- (5) Thiéry D, Monceau K (2015) *Biofutur* 365, 48-55
- (6) Steffan-Dewenter I, Kuhn A (2003) *Proc Roy Soc Lond B* 270, 569-75
- (7) Von Frisch K (1965) *Tanzsprache und Orientierung der Bienen*, Berlin, Springer Verlag
- (8) Härtel S, Steffan-Dewenter I (2014) *Curr Biol* 24, R524-6
- (9) Riley JR et al. (1996) *Nature* 379, 29-30
- (10) Capaldi EA et al. (2000) *Nature* 403, 537-40
- (11) Streit S et al. (2003) *Zoology* 106, 169-71
- (12) Chen C et al. (2012) *Comput Electron Agr* 89, 100-9
- (13) Alaux C et al. (2014) *J Exp Biol* 217, 3416-24
- (14) Dell AI (2014) *Trends Ecol Evol* 29, 417-28
- (15) Buchanan A, Fitzgibbon A (2006) *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* 1, 626-33
- (16) Khan Z et al. (2005) *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 27(11) 1805-19
- (17) Veeraraghavan A et al. (2008) *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 30, 463-76
- (18) Campbell J et al. (2008) *Proceedings of Workshop on Visual observation and analysis of animal and insect behavior* (in conjunction of ICPR).
- (19) Chiron G et al. (2013) *EURASIP J Image Video Process* 1, 59
- (20) Villemant C et al. (2011) *Biol Conservat* 144, 2142-50
- (21) Chiron G et al. (2015) *Revue d'Intelligence Artificielle* 29, 173-203