



HAL
open science

Ces maladies qui touchent les abeilles : comprendre les comportements pour mieux anticiper les soins

Lihoreau Mathieu, Tamara Gómez-Moracho

► **To cite this version:**

Lihoreau Mathieu, Tamara Gómez-Moracho. Ces maladies qui touchent les abeilles : comprendre les comportements pour mieux anticiper les soins. La Santé de l'Abeille, 2024. <hal-04864371>

HAL Id: hal-04864371

<https://hal.science/hal-04864371v1>

Submitted on 4 Jan 2025

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.



HAL Authorization

Ces maladies qui touchent les abeilles : comprendre les comportements pour mieux anticiper les soins

Les agresseurs des abeilles – virus, champignons, acariens, stresseurs environnementaux, etc. – font l’objet d’une abondante littérature pour tenter de comprendre leur rôle dans le déclenchement des maladies. Mais quels sont leurs impacts sur les capacités cognitives des individus atteints ? Cet article analyse le lien entre agents pathogènes et perturbations comportementales.

Par Mathieu Lihoreau* et Tamara Gómez-Moracho**

*Directeur de recherches CNRS au CRCA-CBI Toulouse, spécialiste du comportement des abeilles

**Chercheuse à l’Université de Grenade, spécialiste des maladies des abeilles



Figure 1 : Abeilles domestiques sur un nourrisseur dans un champs expérimental dédié à l'étude du comportement au Centre de Recherches sur la Cognition Animale (CRCA-CBI) à Toulouse. Crédit : Joanna Brebner.

Si nous ne le savions pas encore, la crise du Covid nous l'a bien rappelé : nous sommes vulnérables à une multitude d'agresseurs biologiques, souvent invisibles à nos yeux, que l'on se transmet les uns aux autres, et qui nous rendent plus ou moins malades en fonction de notre sensibilité. Ainsi, en quelques semaines seulement, plusieurs dizaines de milliers d'individus peuvent se retrouver contaminés et confinés pour lutter contre une épidémie. Sur ce point, les abeilles ne sont pas si différentes de nous...

Les abeilles sont les hôtes d'une grande diversité de parasites et autres agents pathogènes biologiques : des virus, des bactéries, des protozoaires (organismes unicellulaires avec noyau), des acariens, des champignons, des nématodes (vers ronds), et parfois même d'autres insectes (Tableau 1). Ces agresseurs ont des effets bien connus sur la physiologie des abeilles, mais qui sont difficilement discernables à l'œil nu. Ils provoquent parfois des lésions des cellules et des tissus, des changements de métabolisme, des troubles de l'équilibre physico-chimique corporel (homéostasie), mais aussi des voies moléculaires de défense contre les infections. De plus en plus de travaux montrent également des effets visibles, plus facilement mesurables, sur le comportement des insectes (Gómez-Moracho *et al.*, 2017). Ces effets peuvent être la conséquence directe de l'infection, par une action de l'agent pathogène sur le système nerveux. Mais ils peuvent aussi être la conséquence indirecte du stress, en induisant des

comportements de défense chez l'insecte visant à combattre l'infection ou à réduire les risques de contamination.

L'ensemble de ces effets chez les individus infectés peut considérablement fragiliser les populations. En particulier, les abeilles dépendent de capacités cognitives élaborées pour interagir dans leurs colonies rigoureusement organisées et se nourrir sur les fleurs parfois dispersées sur plusieurs kilomètres à la ronde (Lihoreau, 2022). Une butineuse fait constamment appel à ses mémoires visuelles, olfactives et spatiales pour se repérer, localiser les fleurs, sélectionner celles qui produisent le meilleur nectar ou pollen, développer des routes entre ces fleurs, et retourner au nid. Toute altération de ces capacités cognitives par un agent pathogène, même mineur, peut compromettre la collecte de nourriture et le développement des larves (Klein *et al.*, 2017). Les espèces sociales, comme l'abeille domestique (Figure 1) et les bourdons, ont à leur disposition des stratégies collectives pour réduire les taux d'infection et diminuer leurs effets. Mais chez la majorité des espèces, qui sont solitaires, ces mécanismes n'existent pas et les risques de déclin des populations sont encore plus marqués.

Le parallèle avec les grandes épidémies humaines n'est donc pas si superficiel que cela, et une partie des connaissances acquises lors des récentes crises sanitaires que nous avons traversées nous aide à comprendre ce qui se passe chez les autres espèces. Dans cet article « d'api-démiologie » nous décrivons les principales maladies des abeilles en nous focalisant sur les effets qu'elles induisent au niveau comportemental chez les abeilles domestiques et les bourdons, c'est-à-dire les principales espèces élevées à travers le monde pour la production de miel et la pollinisation des cultures. Si aujourd'hui ces effets sont encore mal connus et font l'objet de travaux scientifiques, dans un futur proche, mieux les connaître pourrait présenter plusieurs avantages pour les apiculteurs. D'une part, certaines perturbations comportementales pourraient être plus faciles à détecter à l'œil nu que les perturbations physiologiques qui nécessitent des analyses moléculaires en laboratoire, et pourraient servir d'indicateurs pratiques pour un diagnostic rapide de terrain. D'autre part, identifier ces signes précoces dans le cas d'une épidémie permettrait d'agir avant qu'il ne soit trop tard. Enfin, une meilleure compréhension des signes comportementaux de la maladie et des stratégies de défenses des insectes pourraient servir à penser de nouveaux traitements.

Les maladies des abeilles

Les abeilles sont la cible de nombreux agents pathogènes biologiques (voir exemples en Tableau 1), dont certains seulement déclenchent des maladies selon des processus complexes ne se résumant pas à la causalité directe (Colin, 2024). Ces agents peuvent être transmis « horizontalement », c'est-à-dire entre les individus de la même génération (sur les fleurs, par contact, durant les échanges de nourriture, pendant la copulation), ou « verticalement » entre les individus de différentes générations (de la mère à ses larves par transmission transovarienne, ou de la colonie mère à la colonie fille).

Comme chez nous, la plupart des maladies des abeilles sont causées par des micro-organismes. Ainsi les abeilles domestiques, sont infectées par de nombreux virus. Certains d'entre eux, comme le virus Kakugo (KV, du japonais « À l'attaque ! »), ou le virus de la paralysie chronique (CBPV) ont été retrouvés dans le cerveau des abeilles et perturbent probablement son fonctionnement (Fujiyuki *et al.*, 2009).

Elles sont également la cible de trypanosomes, comme *Crithidia* sp ou *Lotmaria passim*, qui sont des parasites extracellulaires qui s'attachent à la surface des cellules de l'intestin où ils se reproduisent et relâchent de nouvelles formes parasitaires dans les fèces. Enfin, les microsporidies du genre *Nosema* (Figure 2) sont des parasites obligatoires des abeilles domestiques et des bourdons. Ils envahissent les cellules épithéliales de l'intestin où ils se reproduisent et relâchent des spores dans les fèces. L'infection peut induire la nosérose et

affaiblir la colonie en réduisant les capacités cognitives des butineuses qui peuvent se perdre (Encadré 1).

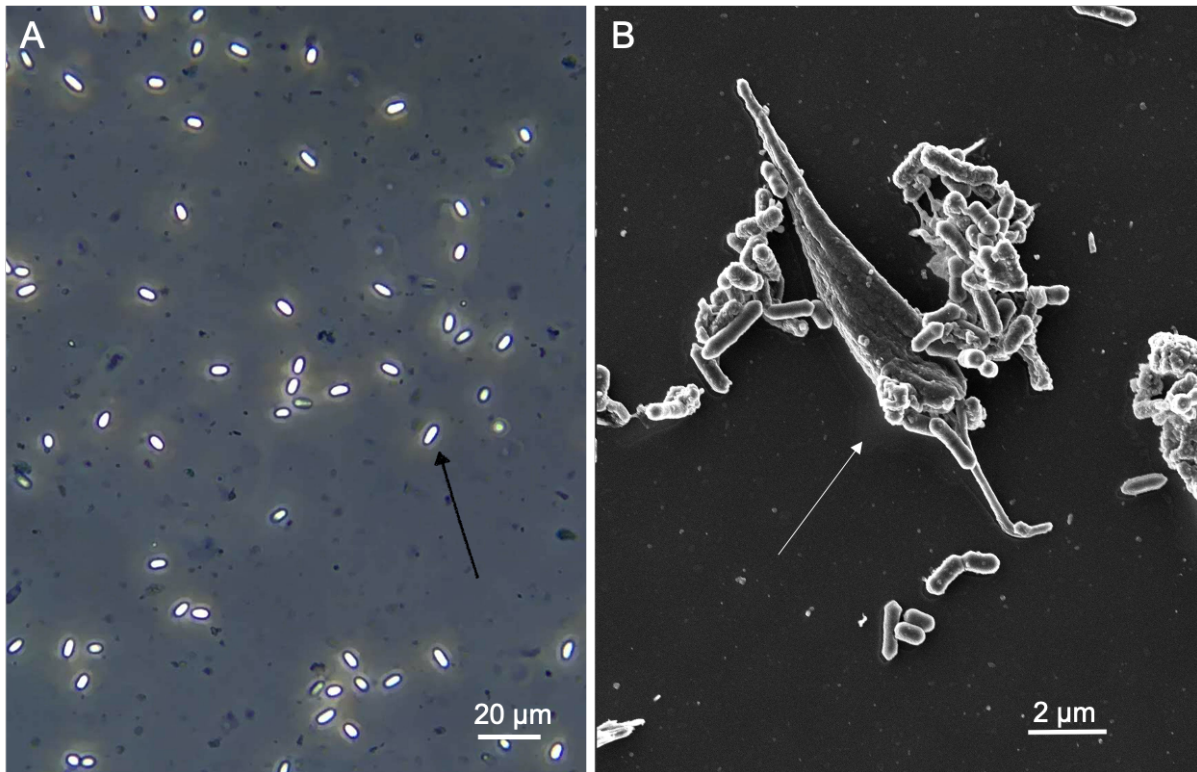


Figure 2 : A) Spores de *Nosema ceranae* dans l'intestin d'une abeille domestique naturellement infectée. Microscope contraste de phase. B) Promastigote de *Lotmaria passim* entouré par des bactéries de l'intestin d'une abeille domestique naturellement infectée. Microscope à balayage. Crédit A & B: Tamara Gómez-Moracho.

Mais les populations d'abeilles sont également la cible de certains macroparasites, parmi lesquels l'acarien *Varroa destructor*, bien connu dans les ruchers à travers le monde. Le varroa est un ectoparasite obligatoire des abeilles domestiques qui se nourrit de l'hémolymphe et des corps gras des larves et des adultes. De forts niveaux d'infestation mettent en péril la survie de la colonie en réduisant les capacités reproductives de la colonie, la taille du couvain, et le nombre d'adultes (Villa *et al.*, 2008). Cet acarien est aussi un vecteur de plusieurs virus, ce qui augmente encore plus le risque d'effondrement des colonies. D'autres acariens comme *Acarapis woodi* peuvent infecter les colonies d'abeilles à miel mais ils sont moins fréquents et ont plus rarement été associés à des effondrements (Cepero *et al.* 2015).

Comme dans le cas du SARS-CoV-2, ces agresseurs biologiques peuvent parfois changer d'hôtes. Ainsi le contact entre les espèces domestiques et sauvages augmente les risques de transmission entre les espèces, ce qui multiplie des agresseurs potentiels. En particulier, l'importation de reines et les transhumances de ruches facilitent la dissémination des maladies, de même que l'utilisation de bourdons commercialisés pour la pollinisation. Ces colonies d'élevage sont souvent infectées par *Crithidia bombi* ou *Nosema bombi* et contaminent les populations de bourdons sauvages ainsi que d'autres espèces d'abeilles en s'échappant des serres. De la même manière, les agresseurs des abeilles domestiques, comme *Nosema ceranae* (Figure 1) et plusieurs virus, sont régulièrement retrouvés chez les bourdons sauvages, les abeilles solitaires, mais aussi certaines guêpes et frelons.

Tableau 1 : Quelques maladies courantes qui induisent des effets comportementaux documentés à la fois chez les abeilles domestiques et chez les bourdons.

Type d'agresseur	Nom commun	Nom scientifique	Mode de transmission	Effets sur le comportementaux et la cognition
Mouches	-	<i>Apocephalus borealis</i>	Infection directe : les femelles pondent leurs œufs dans l'hôte	- Perturbations du rythme circadien - Difficultés à marcher - Vols nocturnes
Microsporidie	Nosema	<i>Nosema ceranae</i>	Horizontale : ingestion de spores, reproduction	- Vol altéré par un manque de réserve énergétique (tréhalose) - Butinage précoce - Désorientation - Passe plus de temps en dehors du nid - Trophallaxies moins fréquentes - Apprentissages olfactifs altérés
Virus	Virus des ailes déformées (DWV)		Infection indirecte : par <i>Varroa destructor</i> Horizontale : contacts faecal-oral, cannibalisme	- Vols plus courts - Retour au nid moins fréquent
	Virus de la paralysie chronique (CBPV) - Maladie noire		Horizontale : contacts faecal-oral, lésions de la cuticule	- Paralysie au bout de 5 à 7 jours
	Virus de la paralysie aiguë (ABPV)		Horizontale : contacts faecal-oral, lésions de la cuticule	- Paralysie au bout de 2-5 jours

	Virus Israélien de la paralysie aiguë (IAPV)		Infection indirecte : par <i>Varroa destructor</i> Horizontale : contacts faecal-oral, lésions de la cuticule	- Paralysie - Retour au nid moins fréquent
Neogregarian	-	<i>Apicystis bombi</i>	Horizontale : ingestion orale	- Augmentation de la sensibilité aux sucres

Des troubles comportementaux précurseurs de déclin de populations

Plusieurs ces agents pathogènes ont des effets visibles sur le comportement des abeilles que les scientifiques ont commencé à mesurer (Figure 3). Ces troubles sont souvent la conséquence du « stress énergétique » que produit l'agresseur sur son hôte. Ainsi, les bourdons infectés par *Crithidia bombi* prennent plus de temps pour collecter le nectar et pollen des fleurs, et retournent plus souvent aux fleurs déjà vidées quelques secondes ou minutes auparavant (Gegear *et al.*, 2005). Les abeilles domestiques infectées par *Nosema ceranae* (Figure 2) sortent plus souvent de la ruche et passent plus de temps en dehors (Wolf *et al.*, 2016). Les abeilles infectées par le virus des ailes déformées volent moins loin et moins longtemps (Wells *et al.*, 2016). Toutes ces altérations du comportement diminuent drastiquement l'efficacité de butinage.

D'autres parasites réduisent les capacités d'apprentissage spatial, visuel et olfactif nécessaires à la collecte de nourriture. Ainsi les abeilles domestiques infectées par *Varroa destructor* répondent moins souvent à une stimulation de leurs antennes par de l'eau sucrée que des abeilles saines (Kralj *et al.*, 2007). Les abeilles domestiques et les bourdons infectés par *Nosema ceranae* n'arrivent plus à associer une odeur ou une couleur à une récompense sucrée (Gómez-Moracho *et al.*, 2022 ; Encadré 1). Enfin, les abeilles domestiques infectées par *Nosema ceranae* explorent moins leur environnement et ont des difficultés à relocaliser leur nid (Wolf *et al.*, 2016). Ici aussi l'efficacité de butinage est fortement impactée.

Encadré 1 : *Nosema Ceranae* altère l'apprentissage des abeilles et des bourdons.

Nosema ceranae est un des parasites les plus répandus chez les abeilles domestiques. Les individus infectés ont des difficultés à se repérer dans l'espace, une activité de vol accrue et des capacités d'apprentissage réduites. Récemment, ces parasites ont été retrouvés chez des pollinisateurs sauvages. Les fleurs visitées par les abeilles sont donc un lieu d'échange du parasite présent dans le nectar ou le pollen. Pour comprendre si *Nosema ceranae* présentait également un danger sur ces insectes sauvages, nous avons infecté des bourdons en laboratoire en les nourrissant de solutions de spores de parasite, puis nous les avons soumis à des tests d'apprentissage sept jours après infection (Gómez-Moracho *et al.*, 2022). Pour cela, nous avons placé les bourdons en contention face à un canon à odeur (Figure 3 A). Certaines odeurs étaient présentées en même temps qu'une récompense d'eau sucrée. D'autres ne l'étaient pas. Après quelques essais seulement, les bourdons non-infectés étaient capables de tirer leur proboscis (langue) en anticipation d'eau sucrée lors de la présentation de l'odeur récompensée, alors que

les bourdons infectés n'en étaient pas capables. Cette baisse de performance dans l'apprentissage des odeurs a été observée pour plusieurs formes d'apprentissage testées, ce qui démontre un effet du parasite sur la cognition des bourdons, similaire à celui qui était déjà connu chez les abeilles. Le transfert des parasites d'une espèce d'abeille à l'autre est donc un problème majeur.

Plus rarement, certains agresseurs agissent directement sur le système nerveux. C'est le cas de la mouche parasitoïde *Apocephalus borealis* qui altère le rythme circadien des abeilles, quittant la colonie durant la nuit avec des risques élevés de se faire piéger par les lumières artificielles qui les attirent (Core *et al.*, 2012). Ces changements de motricité sont probablement dus à une manipulation de l'abeille par le parasite afin de favoriser sa propre dispersion. C'est aussi le cas des virus de la paralysie chronique qui se multiplient dans le cerveau des abeilles, affectant les fonctions neuronales impliquées dans la perception sensorielle. Une fois infectées, les abeilles meurent en une semaine (Fujiyuki *et al.*, 2009).

Enfin parfois, ces perturbations à l'échelle individuelle ont des répercussions sur l'ensemble de la population. Ainsi *Nosema ceranae* (Figure 2) modifie les interactions sociales entre abeilles domestiques (Goblirsch *et al.*, 2013). L'organisation de la colonie repose sur un partage des tâches en fonction de l'âge des individus. La transition des activités au sein du nid vers les activités en dehors du nid dépend d'un programme développemental et cérébral très précis qui prépare au butinage entre le 12^e et le 15^e jour de la vie adulte, mais qui peut être modulé en fonction des besoins en nourriture de la colonie. Le parasite accélère artificiellement cette transition. Les ouvrières infectées réduisent leurs échanges de nourriture (trophallaxies) et meurent plus rapidement à cause du stress énergétique imposé par l'infection. Le déficit en nourriture au sein de la colonie déclenche le butinage précoce par de jeunes ouvrières dont les capacités cognitives et l'efficacité sont moindres. Si ce phénomène se prolonge dans le temps, cela peut aboutir à l'effondrement de la colonie (Naug et Gibbs, 2009). Mais une reine jeune est capable de compenser temporairement ces pertes en augmentant son rythme de ponte (Botías *et al.*, 2012), suggérant que changer régulièrement les reines peut permettre d'éviter les effondrements.

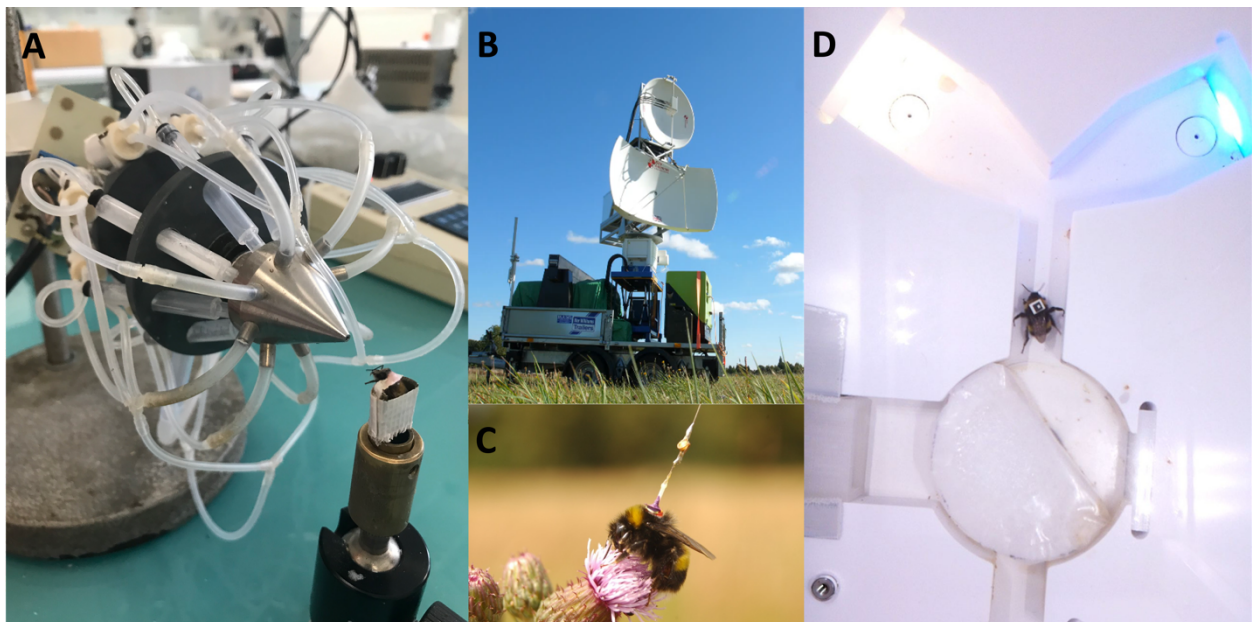


Figure 3: Exemples de dispositifs expérimentaux utilisés dans la recherche pour mesurer les effets des agents biologiques pathogènes sur la cognition. A) Abeille domestique faisant face à un canon à odeur permettant de mesurer l'apprentissage et la mémoire olfactive (voir détails en Encadré

1). Crédit : Mathieu Lihoreau. B) Radar harmonique utilisé pour enregistrer les trajectoires de vol et mesurer les apprentissages spatiaux. C) Bourdon équipé d'une antenne radar. B & C Crédit : Joe Woodgate. D) Labyrinthe en Y utilisé pour mesurer l'apprentissage et la mémoire visuelle. Ici un bourdon est équipé d'un QR code pour identification individuelle. Crédit : Mathieu Lihoreau.

Mais les abeilles peuvent se défendre...

Au cours de leur longue coévolution avec les parasites et autres agents pathogènes, les abeilles ont développé de nombreux moyens de défense (Figure 4). Au niveau individuel, la première barrière est la cuticule (l'exosquelette qui recouvre leur corps). Cette couche solide et étanche, constitue à la fois une barrière mécanique et biochimique rendant difficile les attaques par des agresseurs.

La seconde barrière est le système immunitaire basé sur des réponses cellulaires, comme l'encapsulation d'agents pathogènes, ou humorales sous forme de sécrétions de peptides antimicrobiens.

La troisième barrière est l'adoption de comportements réduisant les risques de contamination et de transmission. Les abeilles peuvent, par exemple, changer leurs préférences alimentaires. C'est ainsi que les bourdons évitent les fleurs contenant *Crithidia bombi*, probablement en percevant des modifications de l'odeur et du goût du nectar contaminé (Fouks et Lattorf, 2011). S'ils parviennent néanmoins à être infectés, les bourdons ont tendance à préférer les nectars contenant des métabolites secondaires, c'est-à-dire des substances de défense produites par les plantes qui permettent de réduire les infections parasitaires, comme par exemple la nicotine (Baracchi *et al.*, 2015). Mais cela ne se limite pas aux plantes. L'utilisation de substances issues de champignons peut également réduire les infections virales, comme c'est le cas pour le virus des ailes déformées et le virus du lac Sinai (Stamets *et al.*, 2018).

Au niveau collectif, les abeilles peuvent également adopter des comportements « d'immunité sociale ». Les abeilles domestiques sont les championnes dans ce domaine : elles fabriquent de la propolis à partir de résines ayant des propriétés anti-microbiennes issues de plusieurs espèces de plantes qu'elles mélangent à la cire et en tapissent l'intérieur du nid pour diffuser des molécules antimicrobiennes dans la colonie (Simone-Finstrom et Spivak, 2012).

Depuis toujours, les abeilles adoptent aussi les gestes barrière. Elles réduisent les risques de contamination par une ségrégation spatiale des individus dans le nid, par exemple en évitant les contacts entre les nourrices qui s'occupent des larves et les butineuses qui sont exposées de manière chronique aux agresseurs biologiques (Stroeymeyt *et al.*, 2014). Ce confinement des ouvrières de différentes castes est un bon moyen de limiter la transmission des agents pathogènes au couvain.

Si les immatures sont infectées, les adultes peuvent les détecter et les sacrifier afin de minimiser les risques de transmission à travers la colonie. Ce comportement hygiénique est le principal moyen de défense des abeilles domestiques contre les maladies du couvain. Pour réduire encore plus les contacts avec ces agresseurs, les abeilles pratiquent également l'exclusion forcée des adultes infectés hors de la colonie. Il est aussi probable que les ouvrières infectées partent de la colonie de leur propre gré, ou bien sous l'effet d'une manipulation du parasite qui vise à favoriser sa dispersion, mais cela reste à démontrer (Alaux *et al.*, 2014).

Les abeilles mettent aussi en place des comportements collectifs pour lutter contre certains parasites. La fièvre sociale chez les abeilles domestiques est un exemple bien connu où les insectes se regroupent autour de l'agresseur. Ils activent les muscles de leurs ailes de manière synchronisée pour faire monter la température ambiante à des niveaux létaux pour les parasites, mais pas pour les abeilles elles-mêmes. C'est le cas, par exemple, contre le couvain plâtré causé par le champignon *Ascosphaera apiset* (Starks *et al.*, 2000).

Enfin, assurer une diversité génétique au sein de la colonie est un autre moyen efficace de réduire les risques d'infection. C'est ce que font les reines d'abeilles domestiques qui

s'accouplent généralement avec plusieurs mâles (reines polyandres), produisant ainsi des lignées d'ouvrières avec des susceptibilités différentes aux maladies. Par ce mécanisme, les colonies comptant le plus de lignées en leur sein sont généralement moins touchées par la mycose, la loque américaine et la nosérose que les colonies consanguines (Seeley et Tarpy, 2007).

A. Défense individuelle



1. Barrière physique

- Cuticule

2. Réponse immunitaire

- Cellulaire
Phagocytose
Encapsulation
Nodulation

- Humorale
Peptides antimicrobiens
Dérivés réactifs de l'oxygène
Melanisation

B. Comportements collectifs

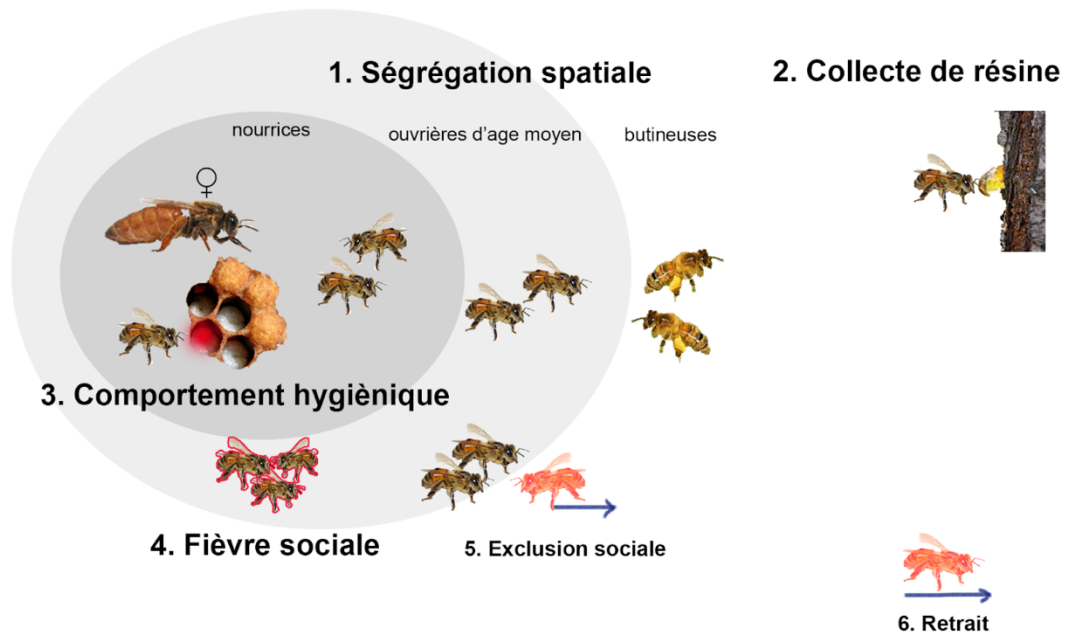


Figure 4 : Mécanismes de défense utilisés par les abeilles domestiques pour lutter contre les maladies. (a) Au niveau individuel, les abeilles ont une cuticule et produisent des réponses immunitaires. (b) Au niveau collectif, elles adoptent des comportements “d’immunité sociale” qui réduisent les contacts avec les agents agresseurs : les comportements d’hygiène, la ségrégation spatiale des butineuses, la collecte de résines, l’exclusion sociale et l’isolement des individus infectés (en rouge). Modifié d’après Gómez-Moracho *et al.*, 2017.

Vers de nouveaux traitements basés sur le comportement des abeilles

Il existe déjà différentes méthodes à disposition des apiculteurs pour prévenir et lutter contre des maladies qui touchent les abeilles domestiques. Ces méthodes sont souvent basées sur des approches vétérinaires qui impliquent l'exposition à des molécules naturelles ou de synthèse, comme l'acide formique, le thymol, ou les acaricides (tau-fluvalinate, amitraze) contre le varroa, dont les effets sur les abeilles et autres espèces non cibles ne sont pas toujours bien connus. Un jour, peut-être, le comportement des abeilles pourra être utilisé pour diagnostiquer certaines maladies de manière précoce et robuste. Mais à l'heure actuelle, les recherches sur le comportement des abeilles malades permettent principalement d'envisager des solutions alternatives à l'utilisation de produits phytosanitaires tout en améliorant la précision des traitements.

Une première piste consiste en l'amélioration des techniques de distribution des traitements. Par exemple, en janvier 2023, le premier vaccin pour les abeilles domestiques a été approuvé par le gouvernement américain. Ce vaccin devrait permettre de prévenir la loque américaine pour laquelle, jusqu'alors, si le dépistage était trop tardif, l'unique solution pour s'en débarrasser était de brûler intégralement les ruches infectées. Le vaccin contient une version inerte de la bactérie. L'innovation majeure ici vient de la méthode d'inoculation dans les colonies qui repose sur les spécificités comportementales des abeilles : le vaccin est incorporé dans la gelée royale que les ouvrières utilisent pour nourrir la reine. Une fois que la reine a été exposée, elle transmet le vaccin aux larves à travers ses ovaires et donne l'immunité à la ruche entière. Cette approche par vaccination, aujourd'hui limitée à la lutte contre la loque américaine et largement éprouvée chez les humains, est prometteuse pour lutter sur le long terme contre d'autres maladies telles que celles discutées plus haut dans cet article.

Une autre voie de changement des pratiques réside dans la stimulation des comportements d'immunité sociale naturellement exprimés par les abeilles, par exemple en favorisant l'automédication (Figure 4). L'installation de bandes enherbées dans les paysages agricoles est une pratique de conservation en plein essor qui pourrait être améliorée en incorporant des plantes médicinales. Récemment, il a été montré qu'une alimentation riche en pollen de tournesol permettait aux bourdons de réduire leurs niveaux de *Crithidia bombi* intestinaux (Malfi *et al.*, 2023). Cet effet surprenant du pollen de tournesol est dû à son enveloppe extérieure recouverte de picots, lesquels pourraient soit irriter la paroi intestinale et la contraindre à produire un mucus lubrifiant, soit parvenir à déloger de quelque manière que ce soit le parasite. Il est donc probable que de nombreuses plantes de la famille des Astéracées produisent ces mêmes effets antiparasitaires. Attention tout de même à ne pas limiter l'accès des abeilles à ces seules astéracées car, comme nous, les insectes ont besoin de réguler leurs apports nutritionnels à partir de plusieurs sources de nourriture pour éviter les carences.

Malgré toutes ces pistes, il est encore compliqué de définir des pratiques de lutte concrètes et efficaces. Ces maladies se combinent bien souvent les unes aux autres (ex : *Varroa destructor* favorise la transmission de plusieurs virus), et d'autres facteurs de stress environnementaux, comme les pollutions, les pesticides ou les carences nutritionnelles, s'ajoutent aux maladies en question. Pour ces raisons, la modélisation est un enjeu important pour l'apiculture moderne, afin de comprendre et prédire les phénomènes épidémiques. Depuis une décennie, les ruches connectées, équipées de capteurs à l'intérieur et à l'extérieur, se sont multipliées pour enregistrer des paramètres associés à la santé des colonies (Marchal *et al.*, 2020). Les capteurs permettent de suivre en direct l'évolution des colonies et de comparer les scénarios sur plusieurs milliers de ruches dans différents environnements caractérisés par des taux de maladies et d'autres facteurs de stress potentiels. Plusieurs projets de recherche sont en cours en France (ex: <https://econect.cnrs.fr>) et à travers le monde (Figure 4). L'analyse de ces grands jeux de données, aujourd'hui facilitée par l'intelligence artificielle, permet de mieux comprendre les réponses des abeilles face à ces menaces et de mieux les anticiper avec des mesures pratiques précises. Des modèles sont déjà disponibles pour prédire l'effondrement de colonies d'abeilles et de bourdons dans des études de cas (<https://beehave-model.net>). S'ils sont encore en phase de validation, et

plutôt réservés à des utilisateurs initiés, il ne fait aucun doute que de nouvelles versions plus précises et intuitives seront bientôt disponibles au grand public. Après cette phase de validation, on peut imaginer que dans une dizaine d'années, ces modèles constitueront des outils indispensables pour mieux comprendre et anticiper les effets des épidémies croisées au sein des ruchers et des populations sauvages, tout comme cela a été déterminant pour endiguer les vagues épidémiques les plus virulentes de Covid il y a encore peu.

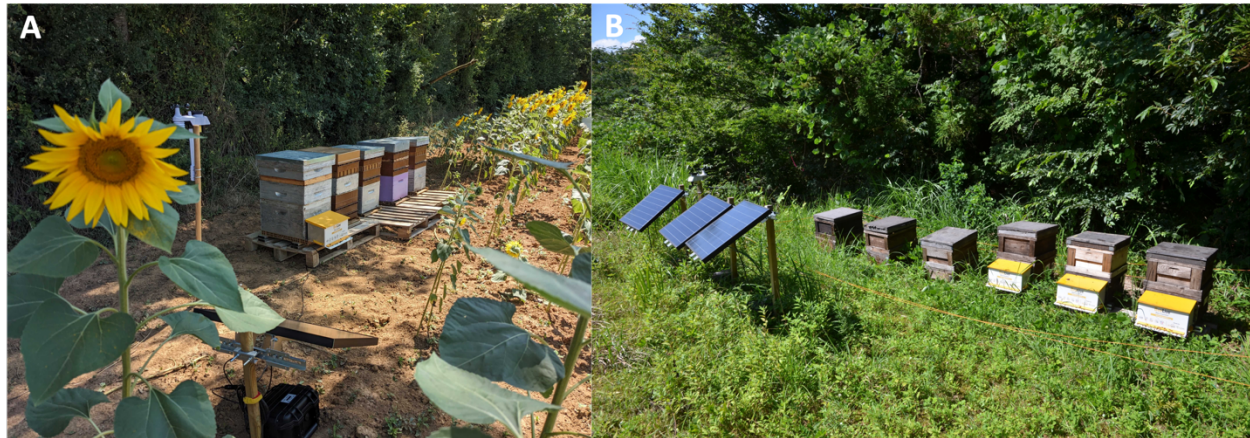


Figure 4 : Biosurveillance des populations d'abeilles domestiques par utilisation de capteurs. Les ruches connectées sont équipées des capteurs de position, de température, d'humidité, d'une station météo et d'un compteur d'abeilles optique. Le tout est alimenté par des panneaux solaires. A. Ruches connectées dans un champ de tournesols en région Occitanie. Crédit : Cristian Lubat (BeeGuard). B. Ruches connectées à Fukushima où l'équipe de Mathieu Lihoreau (CNRS) et ses collègues à l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) et à l'Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (INRAe) mènent des projets (BEERAD et BEECONNECT). Crédit : Jean-Marc Bonzom.

Bibliographie

Alaux C, Crauser D, Pioz M, Saulnier C, Le Conte Y, 2014, « Parasitic and immune modulation of flight activity in honey bees tracked with optical counters », *Journal of Experimental Biology*, Vol. 217 (19).

Baracchi D, Brown MJF, Chittka L, 2015, « Behavioural evidence for self-medication in bumblebees ? », *F1000Research* Vol. 4.

Botías C, Martín-Hernández R, Días J, García-Palencia P, Matabuena M, Juarranz A, Barrios L, Meana A, Nanetti A, Higes M, 2012, « The effect of induced queen replacement on *Nosema* spp. infection in honey bee (*Apis mellifera iberiensis*) colonies », *Environmental Microbiology*, Vol. 14(4).

Cepero A, Martin-Hernandez R, Prieto L, Gómez-Moracho T, Martinez-Salvador A, Bartolomé C, Maside X, Meana A, Higes M, 2015, « Is *Acarapis woodi* a single species? A new PCR protocol to evaluate its prevalence », *Parasitology Research*, Vol. 114.

Colin M.-E., 2024, « De l'agent pathogène à la maladie chez l'abeille, quels processus ? », *La Santé de l'Abeille* n° 319.

Core A, Runckel C, Ivers J, Quick C, Siapno T, DeNault S, Brown B, DeRisi J, Smith CD, Hafernick J, 2012, « A new threat to honey bees, the parasitic phorid fly *Apocephalus borealis* », *PLoS One*, Vol. 7(1).

Fouks B, Lattorf HMG, 2011, « Recognition and avoidance of contaminated flowers by foraging bumblebees (*Bombus terrestris*) », *PLoS One*, Vol. 6(10).

Fujiyuki T, Matsuzaka E, Nakaoka T, Takeuchi H, Wakamoto A, Ohka S, Sekimizu K, Nomoto A, Kubo T, 2009, « Distribution of Kakugo virus and its effects on the gene expression profile in the brain of the worker honeybee *Apis mellifera* L », *Journal of Virology*, Vol. 83(22).

Gegear RJ, Otterstatter MC, Thomson JD, 2006, « Bumblebee foragers infected by a gut parasite have an impaired ability to utilize floral information », *Proceedings of the Royal Society B*, Vol. 273(1590).

Goblirsch M, Huang ZY, Spivak M, 2013, « Physiological and behavioral changes in honey bees (*Apis mellifera*) induced by *Nosema ceranae* infection », *PLoS One*, Vol. 8(3).

Gómez-Moracho T, Heeb P, Lihoreau M, 2017, « Effects of parasites and pathogens on bee cognition » *Ecological Entomology*, Vol. 42.

Gómez-Moracho T, Durand T, Lihoreau M, 2022, « The gut parasite *Nosema ceranae* impairs olfactory learning in bumblebees », *Journal of Experimental Biology*, Vol. 225.

Klein S, Cabirol A, Devaud JM, Barron AB, Lihoreau M, 2017, « Why bees are so vulnerable to environmental stressors », *Trends in Ecology and Evolution*, Vol. 32(4).

Kralj J, Brockmann A, Fuchs S, Tautz J, 2007, « The parasitic mite *Varroa destructor* affects non-associative learning in honey bee foragers, *Apis mellifera* L », *Journal of Comparative Physiology A*, Vol. 193(3).

Lihoreau M, 2022, *A quoi pensent les abeilles?*, HumenSciences, ISBN 9782379313622.

Malfi R, McFrederick QS, Lozano G, Irwin RE, Adler LS, 2023, « Sunflower plantings reduce a common gut pathogen and increase queen production in common eastern bumblebee colonies », *Proceedings of the Royal Society B*, Vol. 290.

Marchal P, Buatois A, Kraus S, Klein S, Gómez-Moracho T, Lihoreau M, 2020, « Automated monitoring of bee behaviour using connected hives: Towards a computational apidology », *Apidologie*, Vol. 51.

Naug D, Gibbs A, 2009, « Behavioral changes mediated by hunger in honeybees infected with *Nosema ceranae* ». *Apidologie*, Vol. 40.

Seeley TD, Tarpay DR, 2007, « Queen promiscuity lowers disease within honeybee colonies », *Proceedings of the Royal Society of London, Series B : Biological Science*, Vol. 274.

Simone-Finstrom MD, Spivak M, 2012, « Increased resin collection after parasite challenge: a case of self-medication in honey bees? », *PLoS One*, Vol. 7(7).

Stamets PE, Naeger NL, Evans JD, Han JO, Hopkins BK, Lopez D, Moershel HM, Nally R, Sumerlin D, Taylor AW, Carris LM, Sheppard WS, 2017, « Extracts of polypore mushroom mycelia reduce viruses in honey bees », *Scientific Reports*, Vol. 8.

Starks PT, Blackie CA, Seeley TD, 2000, « Fever in honeybee colonies », *Naturwissenschaften*, Vol. 87.

Stroeymeyt N, Casillas Perez B, Cremer S, 2014, « Organisational immunity in social insects », *Current Opinion in Insect Science*, Vol. 5.

Villa JD, Bustamante DM, Dunkley JP, Escobar LA, 2008, « Changes in honey bee (Hymenoptera: Apidae) colony swarming and survival pre- and postarrival of *Varroa destructor* (Mesostigmata: Varroidae) in Louisiana », *Annals of the Entomological Society of America*, Vol. 101.

Wells T, Wolf S, Nicholls E, Groll H, Lim KS, Clark SJ, Swain J, Osborne JL, Houghton AJ, 2016, « Flight performance of actively foraging honey bees is reduced by a common pathogen », *Environmental Microbiology Reports*, Vol. 8(5).

Wolf S, Nicholls E, Reynolds AM, Wells AM, Lim KS, Paxton RJ, Osborne JL, 2016, « Optimal search patterns in honeybee orientation flights are robust against emerging infectious diseases », *Scientific Reports*, Vol 6.