

Intelligence et mémoire chez l'abeille domestique

Camille Ducros

▶ **To cite this version:**

Camille Ducros. Intelligence et mémoire chez l'abeille domestique. Linguistique. 2019. dumas-02415946

HAL Id: dumas-02415946
https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02415946

Submitted on 3 Mar 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.

ESIT – Université Sorbonne Nouvelle – Paris 3

Intelligence et mémoire chez l'abeille domestique

Camille Ducros

Sous la direction de Monsieur Philippe Mothe

Mémoire de Master 2 professionnel

Mention : Traduction et interprétation

Spécialité : Traduction éditoriale, économique et technique

allemand – français

Session de juin 2019

CC BY NC ND

Remerciements

Je tiens avant tout à remercier Monsieur Philippe Mothe d'avoir accepté d'être mon directeur de mémoire et pour avoir pris son rôle très à cœur. Il a su me conseiller, m'encourager et me rassurer. Il a aussi parfois émis des critiques sur mon travail, mais toujours avec beaucoup de bienveillance. C'est grâce à sa patience, à ses conseils, mais aussi à la liberté et à l'autonomie qu'il m'a laissées que j'ai pu rédiger un mémoire aussi complet.

Je remercie également Madame Léa Tison, ma spécialiste-référente, pour sa patience, sa gentillesse ainsi que pour la clarté de ses réponses. Ses conseils et ses remarques m'ont permis de rendre un exposé et une traduction dignes d'un spécialiste du domaine.

Un grand merci à Monsieur Randolf Menzel, l'auteur de mon texte-support. Je le remercie tout d'abord d'avoir, à ma plus grande surprise, répondu à mon premier courriel, et de n'avoir cessé de me renseigner par la suite. La rapidité avec laquelle il m'a toujours répondu, ainsi que la précision et l'exhaustivité de ses explications m'ont été d'une grande aide lors de la traduction du texte-support.

Enfin, merci à Monsieur Pierre Lafourcade, un ami rigoureux, pour ses explications et ses précieux conseils. Il a consacré de nombreuses heures à relire mon mémoire et je lui en suis infiniment reconnaissante. C'est grâce à sa relecture minutieuse que les dernières erreurs et imprécisions ont pu être repérées et supprimées.

Sommaire

EXPOSÉ 1

I. Introduction 3

II. L'inné et le sens de l'orientation chez l'abeille 5

III. Le rôle de l'acquis dans la navigation de l'abeille : mémorisation du paysage et *carte cognitive* 11

IV. Les autres capacités d'apprentissage, de mémorisation et d'analyse de l'abeille 17

V. La communication chez l'abeille 33

VI. Conclusion 39

TEXTE-SUPPORT ET SA TRADUCTION 41

Wegintegration –Heimfinden in völlig neuer Umgebung 46

L'*intégration de trajet* — ou comment retrouver son chemin dans un environnement inconnu 47

Lernen von Routen 50

L'apprentissage de routes 51

Großer Radar für kleine Flieger 54

Un grand radar pour de petites aviatrices 55

Die Struktur des *Landschaftsgedächtnisses* der Bienen 60

La structure de la *mémoire du paysage* chez l'abeille 61

Lernen, Gedächtnis, Erwarten und Entscheiden 66

Apprentissage, mémoire, attentes et prise de décision 67

STRATÉGIE DE TRADUCTION 81

I. Introduction 83

II. Problèmes pratiques 84
III. Problèmes terminologiques 85
IV. Problèmes phraséologiques 92
V. Problèmes de compréhension 95
VI. Conclusion 96
ANALYSE TERMINOLOGIQUE 99
I. Fiches terminologiques 101
II. Glossaire 118
III. Lexiques 123
BIBLIOGRAPHIES 141
I. Bibliographie des ouvrages cités dans l'exposé 143
II. Bibliographie des ouvrages cités dans la stratégie de traduction 146
III. Bibliographie critique et sélective 147
1. Sources en français 147
2. Sources en allemand et en anglais 152
ANNEXES 157
INDEX 160

EXPOSÉ

Avertissement au lecteur

Les termes faisant l'objet d'une fiche terminologique sont indiqués en caractères gras, sauf dans le titre des parties ; ils sont alors en italique.

Les mots et expressions du glossaire sont soulignés.

Pour plus de lisibilité, les références des sources et travaux cités ne se trouvent pas en note de bas de page. Elles sont indiquées, sous leur forme abrégée, dans le corps du texte. Les références complètes sont listées dans la partie « Bibliographie » de ce mémoire.

I. Introduction

À l'heure du réchauffement climatique et des bouleversements qu'il provoque, la fameuse citation « si les abeilles disparaissaient de la surface du globe, l'homme n'aurait plus que quatre années à vivre », attribuée à tort à Albert Einstein, se fait de plus en plus menaçante… Il est vrai que les abeilles, en tant qu'insectes pollinisateurs, jouent un rôle essentiel dans la reproduction sexuée des plantes à fleurs. On estime que 80 % des principales plantes cultivées dépendent de la pollinisation des insectes (Klein et al., 2007), une grande partie d'entre elles étant pollinisées par des abeilles. Sans abeilles donc, de nombreux aliments que nous mangeons n'existeraient pas. Et sans l'abeille domestique, il n'y aurait pas de miel. Pourtant, ce petit insecte n'est pas qu'un pollinisateur ; il cache bien d'autres secrets. Plus la recherche avance et plus on lui découvre des capacités surprenantes, dont certaines rivalisent avec nos propres aptitudes. Dans ce mémoire, nous tenterons de donner un aperçu des incroyables facultés de l'abeille domestique. Nous évoquerons tout d'abord ses capacités innées, notamment en matière d'orientation. Puis, nous verrons comment l'acquis vient les compléter pour fournir à l'abeille une technique de navigation extrêmement élaborée. Nous décrirons ensuite les autres capacités cognitives et intellectuelles de l'abeille domestique. Enfin, nous aborderons un de ses aspects les plus fascinants : son mode de communication.

Illustration 1 :



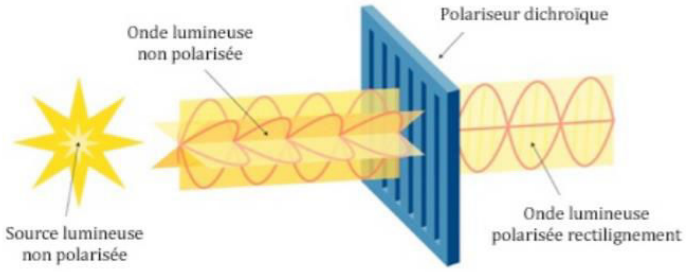
Apisavoir. La vision des ultraviolets confère des colorations surprenantes aux fleurs et au paysage (sans auteur, sans date) [photo]. In : Apisavoir [en ligne]. Disponible sur : <https://www.2imanagement.ch/fr/divers/liens/wwwapisavoirch/comment-les-abeilles-voient-elles-> (consulté le 28.04.2019)

II. L'inné et le sens de l'orientation chez l'abeille

Jürgen Tautz, dans son livre *L'Étonnante Abeille* (2009), décrit trois types de connaissances chez cet insecte : les connaissances innées, liées à l'hérédité (instinct), les connaissances acquises par des expériences personnelles (apprentissage) et, enfin, celles liées à la réception d'informations de ses congénères (communication). Dans cette première partie, nous nous intéresserons au premier type de connaissances cité.

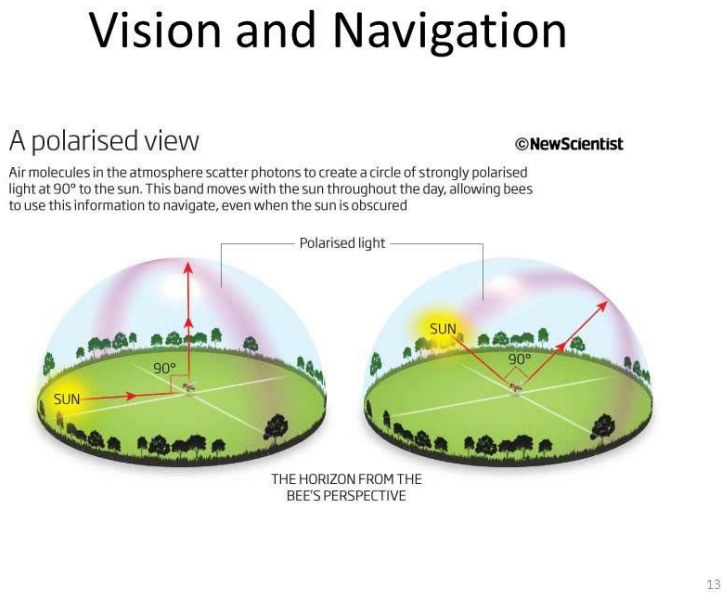
Il existe, en effet, chez les abeilles des connaissances qui se transmettent de génération en génération, qui sont liées à l'évolution, à leur adaptation à leur environnement. Par exemple, leur préférence naturelle pour les fleurs bleues et jaunes peut s'expliquer par la prédominance de ces couleurs parmi les espèces florales. Précisons ici que le spectre de la lumière visible n'est pas le même chez l'abeille que chez l'homme : les abeilles ne perçoivent pas le rouge, qui leur apparaît noir, ou plutôt gris foncé. En revanche, elles perçoivent très bien les ultraviolets (longueur d'onde dans le vide inférieure à 390 nanomètres), jusqu'à 300 nanomètres. Encore une fois, il s'agit d'une adaptation à l'environnement puisque la plupart des fleurs présentent des motifs dans l'ultraviolet afin de guider les espèces pollinisatrices vers leurs organes reproducteurs (ill. 1). En outre, quand elle survole un paysage, l'abeille ne perçoit que les objets qui émettent ou reflètent dans le vert. Elle n'a en effet pas besoin, à ce stade, de reconnaître les fleurs, mais le paysage dans son ensemble afin de pouvoir s'orienter.

Illustration 2 :



(sans auteur, sans titre, sans date) [schéma]. In : Le site de Physique de la TPC1 [en ligne]. Disponible sur : <http://www.csvi.fr/Physique/Cours_files/TP%20O2%20Polarisation%20rectiligne%20de%20la%20lumie%CC%80re.pdf> (consulté le 28.04.2019)

Illustration 3 :



Perception de la lumière polarisée
Lorsque les photons traversent l'atmosphère, ils sont diffusés par les molécules d'air, formant une bande circulaire de lumière fortement polarisée à 90° du soleil. Cette bande se déplace au cours de la journée, en même temps que le soleil, permettant ainsi aux abeilles d'utiliser cette information pour naviguer, même lorsque le soleil n'est pas visible.
Lumière polarisée
SOLEIL
L'horizon vu par une abeille (Traduit de l'allemand en français pour les besoins du présent mémoire par DUCROS Camille)

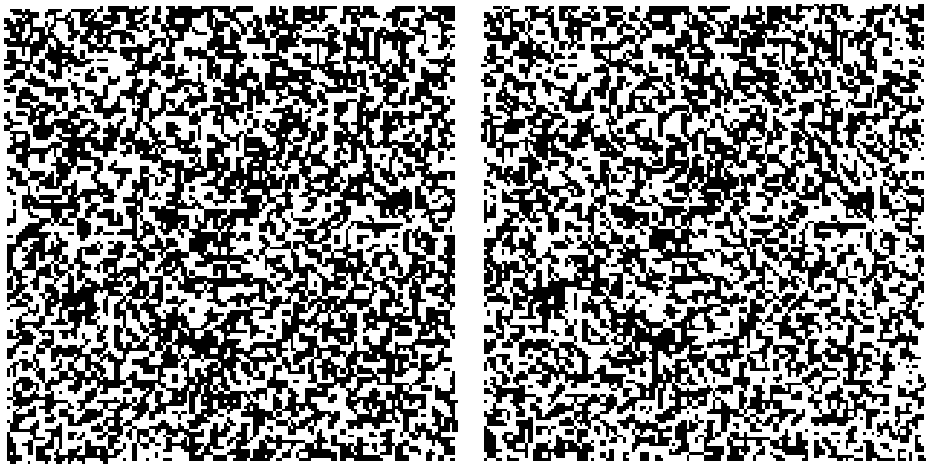
SlidePlayer, Vision and Navigation (sans auteur, sans date) [schéma]. In : SlidePlayer [en ligne]. Disponible sur : <https://slideplayer.com/slide/8980621/ > (consulté le 28.04.2019)

Les abeilles ont un excellent sens de l'orientation. Elles connaissent, de façon en partie innée, la course du soleil dans le ciel et se servent de cette information pour s'orienter. Elles se basent également sur la position du soleil pour indiquer à leurs congénères l'emplacement d'une source de nourriture intéressante (voir V). Lorsque le soleil n'est pas visible, les abeilles déterminent sa position grâce à la lumière polarisée. La polarisation de la lumière est un phénomène physique qu'il nous est difficile, à nous humains, d'appréhender, car, contrairement à celui de l'abeille, notre œil n'y est pas sensible. La lumière étant une onde électromagnétique, elle est constituée de deux champs vectoriels qui oscillent ensemble sinusoïdalement, perpendiculaires entre eux et perpendiculaires à la direction de propagation de l'onde : un champ électrique et un champ magnétique. La lumière en provenance du soleil n'étant pas polarisée, son champ électrique oscille sans direction privilégiée. Néanmoins, lorsqu'elle traverse l'atmosphère terrestre, la diffusion de cette lumière par les molécules atmosphériques provoque sa polarisation : pour chaque onde électromagnétique, le champ électrique oscille alors dans une seule direction (polarisation rectiligne) (ill. 2). La lumière d'un ciel bleu est ainsi partiellement polarisée, le degré de polarisation variant en fonction de l'angle formé entre le point du ciel observé, l'observateur et le soleil. Il est maximal lorsque le point visé se situe à 90° de la direction du soleil (ill. 3). Dans l'œil de l'abeille, chaque ommatidie présente des cellules sensorielles dont certaines (les photorécepteurs de l'ultraviolet) sont sensibles à la polarisation de la lumière. Ces cellules fonctionnent comme des filtres polariseurs rectilignes, lesquels laissent passer plus ou moins de lumière en fonction de l'angle formé par leur axe de transmission et la direction d'oscillation du champ électrique. Il y a extinction de la lumière polarisée (le filtre nous apparaît alors noir) lorsque son axe est perpendiculaire à cette direction. Ainsi, chaque ommatidie de l'abeille perçoit une image plus ou moins foncée du ciel et c'est grâce à ces différences de polarisation perçues par chacune des ommatidies que l'abeille détermine la position exacte du soleil, même lorsque celui-ci n'est pas visible. Cette capacité à s'orienter à partir du soleil — Janine Kievits parle de « boussole » (2010a, p. 12) — est en partie innée.

La position du soleil varie cependant au cours de la journée. L'abeille doit donc être capable de « correction horaire » (Kievits, 2013, p. 44), c'est-à-dire de rétablir la position des points cardinaux à partir de la position variable du soleil. Les abeilles disposeraient de cette connaissance de façon innée : des expériences ont montré que de jeunes abeilles, qu'on avait laissé sortir de la ruche uniquement le matin, retrouvaient l'après-midi l'endroit où elles avaient l'habitude de butiner, et ce, alors que le soleil se trouvait en un point du ciel où elles ne l'avaient jamais vu auparavant (Von Frisch, 2011). Ces insectes auraient ainsi la notion du temps. Randolf Menzel parle d'une « horloge interne » [Notre traduction] (2016, p. 258), Daniel Quendolo d'un « système très développé au niveau des rythmes circadiens » (2016, p. 172). Grâce à des expériences, les chercheurs ont en effet constaté que même dans une pièce fermée, éclairée par une lumière artificielle, les abeilles sont capables de butiner à heures fixes. La perception du temps est très utile aux abeilles, à la fois pour la navigation (voir II) et pour la mémorisation d'éléments se répétant à intervalles réguliers (voir IV).

Ces facultés innées permettent aux abeilles de s'orienter dans l'espace. Grâce à la position du soleil et à l'heure de la journée, une abeille sait que la source de nourriture qu'elle a découverte se trouve, par exemple, au nord-ouest de la ruche. Une fois de retour à cette dernière, elle pourra, en tenant compte du temps qui s'est écoulé et de la course du soleil, retrouver aisément ce lieu, mais aussi en indiquer la direction à ses congénères (voir V). Il lui reste néanmoins à déterminer la distance entre ce lieu et la ruche. Pour ce faire, l'abeille dispose d'une autre faculté innée : elle est capable de déterminer la distance parcourue grâce au flux optique, qui est le « pattern de mouvement présent au niveau de l'œil d'un observateur en mouvement et contenant des informations sur le mouvement propre de l'observateur, sur les objets en mouvement, et sur la disposition en trois dimensions de l'environnement » (Bossard, 2018, p. 9). C'est à partir de la quantité totale de flux perçue sur l'ensemble du trajet que l'abeille détermine la distance, comme le démontre une expérience assez simple : à leur sortie de la ruche, on fait passer des abeilles dans un tunnel de 30 centimètres de large et 6 mètres de long, présentant sur le dessus une face transparente et orné sur les faces latérales d'un dessin

Illustration 4 :



Stéréographie (sans auteur, sans date) [image]. In : Stéréographie [en ligne]. Disponible sur : <http://www.stereographie.fr/explications.php> (consulté le 28.04.2019)

aléatoire contrasté du même type que les stéréogrammes de Béla Julesz (ill. 4). Le dessin et l'étroitesse du tunnel faussent le flux optique. Si les abeilles se basent sur ce dernier pour évaluer les distances, la distance indiquée lors de la danse (voir V) sera plus importante que celle réellement parcourue. C'est effectivement le cas : la distance indiquée est 20 fois supérieure à la distance réelle.

Si elles semblent impressionnantes chez un si petit animal, ces capacités innées ne peuvent pas, à elles seules, expliquer les capacités de navigation extrêmement performantes des abeilles. C'est par l'expérience que leur orientation et leur navigation se précisent.

III. Le rôle de l'acquis dans la navigation de l'abeille : mémorisation du paysage et *carte cognitive*

Cette partie, ainsi que la suivante, seront consacrées aux connaissances acquises de l'abeille. En matière de navigation, l'expérience, et plus particulièrement ses capacités de mémorisation, lui permettent en effet de renforcer et de compléter ses capacités innées. Ces dernières sont enrichies et affinées au cours de vols d'orientation : lors de sa première sortie de la ruche, la jeune butineuse effectue des vols de repérage autour de celle-ci. Elle s'éloigne d'abord de deux ou trois mètres de la ruche, puis fait volte-face et observe pendant quelques minutes la ruche depuis sa position, mémorisant l'image perçue. Ensuite, elle se retourne et reproduit les mêmes étapes sur plusieurs centaines de mètres avant de regagner la ruche et de recommencer dans une direction différente. L'abeille couvre ainsi une zone d'un rayon de trois à cinq kilomètres autour de la ruche (Mairot). Au cours de ces vols d'orientation, elle saisit, d'une part, la course du soleil dans le ciel (l'abeille doit en effet avoir été confrontée à une partie du parcours du soleil pour en saisir l'intégralité de la course) et, d'autre part, elle mémorise les éléments marquants de son environnement. Ces éléments sont enregistrés sous la forme d'images bidimensionnelles rétinotopiques appelées « snapshots » (Macquart, 2008, p. 21).

Illustration 5 :

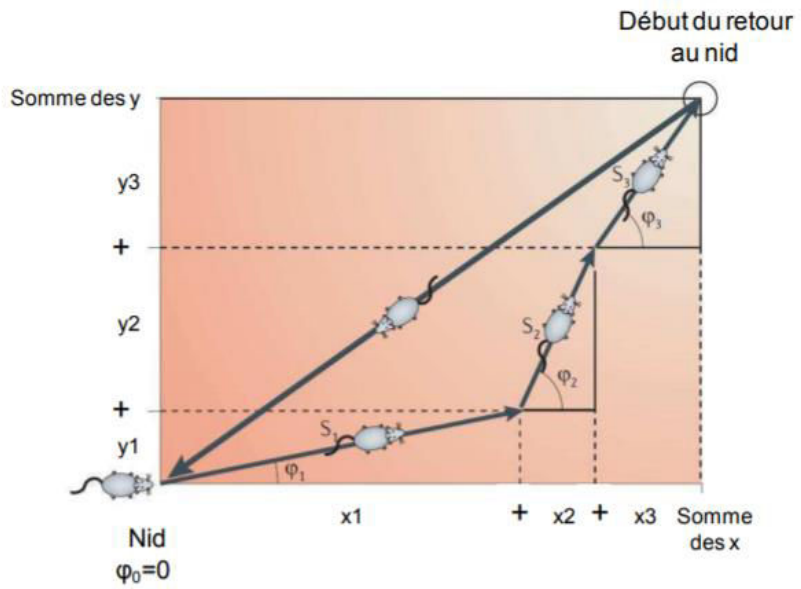


Figure 2.11

INTEGRATION DES TRAJETS.

Processus de retour au nid par intégration des trajets. Les différents segments du trajet sont représentés par 3 vecteurs caractérisés par un angle φ (φ1, φ2, φ3), et une longueur S (S1, S2, S3). Les composantes cartésiennes (x, y) de chaque vecteur peuvent être sommées pour en déduire le vecteur de retour. (d'après *McNaughton et al., 2006*).

Intégration des trajets (sans auteur, sans date) [schéma]. In : Rôle du cortex entorhinal médian dans le traitement des informations spatiales : études comportementales et électrophysiologiques [en ligne]. Thèse Neurosciences. Marseille : Université d'Aix-Marseille, 2014, p. 48. Disponible sur <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/tel-01446689/document> (consulté le 03.03.2019)

pour retrouver un site de nourriture ou la ruche, l'abeille va aligner mentalement le snapshot mémorisé du site avec les repères visibles et se déplacer jusqu'à ce que l'image perçue soit identique à celle mémorisée. De même, les différents repères mémorisés le long d'une route constituent pour l'abeille des buts intermédiaires segmentant la route en tronçons. Chaque tronçon est mémorisé sous la forme d'un vecteur local associé à un repère. Lorsque l'abeille reconnaît un repère, elle lui associe automatiquement le vecteur local correspondant et connaît, grâce à sa boussole solaire, la direction à suivre pour atteindre le repère suivant.

L'abeille dispose en outre, pour naviguer, d'un mécanisme d'**intégration de trajet** lui permettant d'estimer en continu la distance parcourue (translation) et la direction prise (rotation) par rapport à son point de départ. Une fois parvenu à son but, l'insecte va additionner les vecteurs correspondant aux différents segments du trajet (dont la direction et la longueur sont déterminées grâce à la boussole solaire et au flux optique) pour en déduire un vecteur d'intégration, aussi appelé vecteur global, dont l'origine est centrée sur son corps. La longueur et l'orientation de ce vecteur correspondent à la distance et à la direction qui relie, en ligne droite, l'abeille à la ruche (ill. 5). Ce mécanisme d'**intégration de trajet**, indépendant de tout repère visuel, ne nécessite pas la mémorisation de l'ensemble du trajet parcouru, mais simplement la mémorisation et la réactualisation permanente de la relation spatiale entre l'emplacement de l'animal et le point de départ. C'est grâce à lui qu'une abeille peut, après avoir parcouru un trajet aux multiples détours jusqu'à une source de nourriture, rentrer en ligne droite à la ruche.

Néanmoins, ces deux mécanismes de navigation reposent sur un système de représentation spatiale égocentrée (égocentrique ou autocentrée), c'est-à-dire dont l'origine est centrée sur l'individu et dont l'axe de référence correspond à l'axe d'orientation de la tête. L'abeille rapporte tous les éléments de l'environnement à son propre corps. Ce type de représentation spatiale ne lui permettrait pas de retourner à la ruche si on la capturait au moment de son départ de celle-ci ou d'une source de nourriture et si on la libérait en un autre lieu de son territoire connu. Or, confrontée à une telle situation, une abeille est capable de retrouver son chemin. Elle

Illustration 6 :

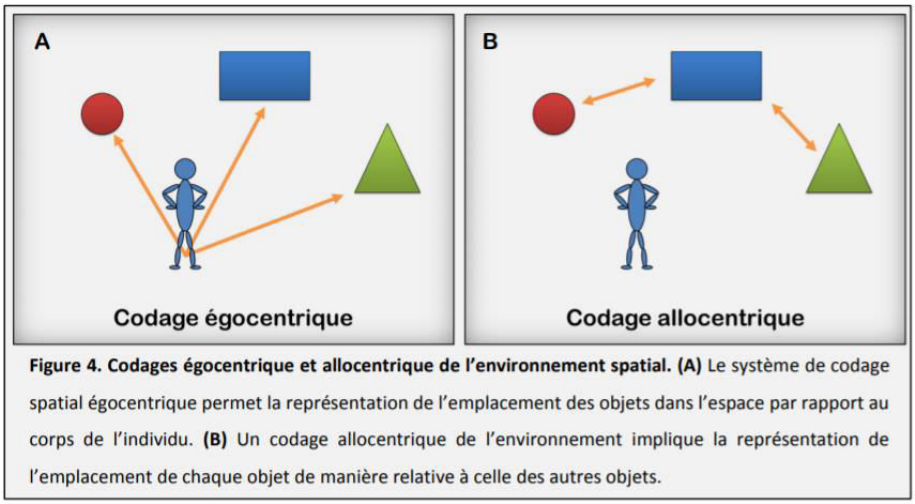
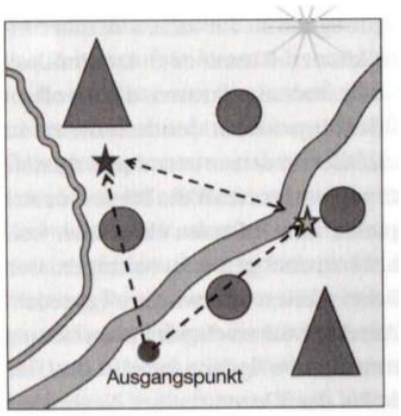


Figure 4. Codages égocentrique et allocentrique de l'environnement spatial. (A) Le système de codage spatial égocentrique permet la représentation de l'emplacement des objets dans l'espace par rapport au corps de l'individu. **(B)** Un codage allocentrique de l'environnement implique la représentation de l'emplacement de chaque objet de manière relative à celle des autres objets.

CHOLVIN T., Codages égocentrique et allocentrique de l'environnement spatial (sans date) [schéma]. In : In : Rôle d'un circuit hippocampo-cortico-thalamique dans les processus de mémoire spatiale chez le rat [en ligne]. Thèse Neurosciences. Strasbourg : Université de Strasbourg, 2014, p. 14. Disponible sur <http://www.theses.fr/2014STRAJ044> (consulté le 03.03.2019)

Illustration 7 :



Point de départ (Traduit de l'allemand en français pour les besoins du présent mémoire par DUCROS Camille)

MENZEL R., Abb. 27 (sans date) [schéma]. In : MENZEL R., ECKOLDT M., *Die Intelligenz der Bienen: Wie sie denken, planen, fühlen und was wir daraus lernen können.* 3e éd. Munich : Albrecht Knaus Verlag, 2016, p. 252.

dispose donc, en plus de la navigation égocentrée, d'une stratégie de navigation basée sur un référentiel allocentré (également appelé référentiel allocentrique ou exocentré). Dans un tel référentiel, l'origine n'est pas centrée sur l'animal, mais sur un point connu de l'environnement, et l'axe de référence ne dépend pas de l'orientation de la tête de l'animal. Ce dernier se représente alors un espace fixe dans lequel il se déplace (ill. 6).

Selon certains chercheurs, une fois que l'abeille a acquis un certain niveau de connaissance de l'environnement (soit après les vols d'orientation), le référentiel égocentré est complété par une représentation allocentrée de l'environnement. C'est ainsi ce que suggère Randolf Menzel (2016), selon lequel l'abeille disposerait d'une représentation mentale complexe de son environnement, combinant à la fois les mécanismes de la navigation égocentrée et de la navigation allocentrée et lui permettant d'associer les éléments du paysage non pas uniquement avec la ruche, mais également entre eux (ill. 7). Pour désigner cette capacité, Randolf Menzel (ibid.) emploie le terme utilisé par Edward Chace Tolman pour les rats : celui de « **carte cognitive** » ou « **mentale** ». La **carte cognitive** est une « stratégie de navigation permettant de naviguer d'un lieu à un autre en empruntant éventuellement des chemins non utilisés auparavant, c'est-à-dire en utilisant des détours et des raccourcis » (Rougier, 2011, p. 57). Cette représentation cartographique de l'espace permettrait aux abeilles de se rendre, depuis un lieu inconnu, directement à une source de nourriture alors qu'elles ne l'avaient jusqu'alors rejointe que depuis la ruche. Ce serait également grâce à cette **carte cognitive** que les abeilles peuvent prendre des raccourcis inédits, qualifiés de « novel shortcuts » (Menzel, 2016, p. 255), pour retourner à la ruche ou pour se rendre d'une source de nourriture à une autre. Pour prouver l'existence d'une telle **carte cognitive**, Randolf Menzel et ses collègues ont réalisé l'expérience suivante (Cheeseman et al., 2014) : ils ont anesthésié un groupe d'abeilles pendant six heures, de sorte que leur boussole solaire était décalée de 90° (le groupe contrôle n'a pas été anesthésié), puis ils les ont libérées à un endroit différent de celui où elles avaient été dressées à se rendre. Les insectes ont d'abord suivi la direction qu'ils auraient prise depuis la source de nourriture pour rentrer à la ruche, mais avec un décalage de 90° vers l'est (le groupe contrôle volait également dans cette direction, mais sans décalage). Toutefois, après quelque temps, les abeilles

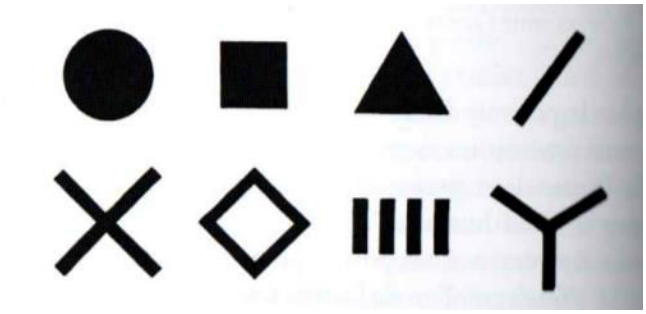
ont compris leur erreur et sont finalement parvenues à rentrer à la ruche. Cela suggère qu'elles ont ignoré leur boussole solaire et qu'elles se sont servies d'une représentation mentale de différents points de repère terrestres pour s'orienter. C'est la première fois qu'un tel système de navigation, déjà connu pour être utilisé par les oiseaux et les mammifères, a été mis en évidence chez les insectes. Néanmoins, cette théorie reste aujourd'hui contestée par de nombreux chercheurs travaillant sur le sujet (par exemple Collett et al., 2013). Outre la navigation, l'abeille dispose d'autres capacités très développées en matière d'apprentissage, de mémorisation et d'analyse.

IV. Les autres capacités d'apprentissage, de mémorisation et d'analyse de l'abeille

Comme chez l'homme, il existe chez l'abeille différentes formes d'apprentissage. Les abeilles apprennent par récompense, qu'il s'agisse de nectar, d'une solution sucrée ou simplement de retrouvailles avec leurs congénères. Elles apprennent également par des stimuli négatifs, un goût amer ou une décharge électrique par exemple. Mais, tout comme nous, elles sont aussi capables d'apprentissage exploratoire, notamment lors des vols d'orientation, qui ont pour seul but d'apprendre à connaître le paysage environnant. Néanmoins, c'est avant tout grâce à des stimulations appétitives ou aversives que l'on peut démontrer les incroyables capacités cognitives des abeilles.

Tout d'abord, ces insectes présentent des formes d'apprentissage simples. Ils sont capables de faire l'association « odeur = solution sucrée » (apprentissage associatif). En effet, un réflexe inné chez l'abeille consiste à étirer son proboscis dès que ses antennes touchent du nectar ou, en conditions expérimentales, une solution sucrée. On peut réaliser un conditionnement olfactif de ce réflexe d'extension du proboscis, c'est-à-dire apprendre à l'abeille à étirer le proboscis à la simple présentation d'une odeur. Pour cela, il suffit de toucher ses antennes avec une solution d'eau sucrée chaque fois qu'on lui présente l'odeur. L'insecte va alors associer le stimulus

Illustration 8 :



VON FRISCH K., Fig. 57 (sans date) [schéma]. In : VON FRISCH K., *Vie et mœurs des abeilles*. 3e éd. Paris : Éditions Albin Michel, 2011, p. 124.

conditionnel, l'odeur, et le stimulus inconditionnel, l'eau sucrée, et étirer le proboscis dès qu'il sera confronté à l'odeur. Cet apprentissage est très rapide : dès la troisième répétition de la séquence odeur-sucre, l'abeille sort automatiquement le proboscis à la simple présentation de l'odeur (Giurfa, 2015). Les abeilles reconnaissent en effet les fleurs à leur odeur et cet apprentissage associatif leur est très utile lors du butinage. Le zoologue Karl von Frisch a ainsi mené l'expérience suivante : il a dressé des abeilles à reconnaître, parmi plusieurs boîtes identiques (dont il changeait régulièrement la disposition), celle contenant une rose et de l'eau sucrée. Une fois que les insectes avaient appris l'association, il a placé cette boîte, avec la rose mais sans solution sucrée, parmi des boîtes contenant des fleurs différentes. Les abeilles se sont alors immédiatement dirigées vers la boîte contenant la rose et ont ignoré les autres. Dans la nature, cette caractéristique favorise le comportement de constance florale. Les abeilles vont en effet butiner une même espèce de fleur jusqu'à ce que cette dernière ne produise plus suffisamment de nectar pour constituer une source intéressante de nourriture.

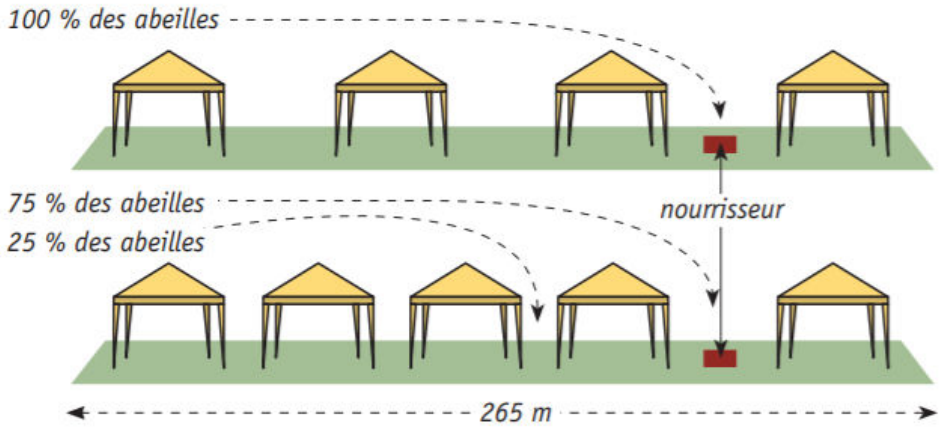
L'apprentissage associatif concerne également les formes et les couleurs. On peut ainsi dresser une abeille à se rendre sur un carton de couleur bleue en lui proposant, sur ce carton, une solution d'eau sucrée. Après plusieurs répétitions, on place le carton, sans solution sucrée, au milieu de cartons de couleurs différentes. L'abeille se pose alors spontanément sur le carton de couleur bleue. On obtient le même résultat lorsqu'on réalise l'expérience avec des formes, à condition que ces dernières soient suffisamment différentes (ill. 8). En effet, si l'œil composé de l'abeille convient particulièrement bien à la vision des objets en mouvement (elle peut voir séparément jusqu'à 200 images par seconde), il est très mal adapté à la vision des formes inertes. Ainsi, contrairement à nous, une abeille ne fera pas la différence entre un rond, un carré et un triangle. Néanmoins, chez elle, l'apprentissage des formes et des couleurs est beaucoup moins rapide que celui des odeurs. Alors qu'il suffit d'un seul contact (trois répétitions de l'association séparées par dix minutes) avec une odeur particulière pour qu'une abeille la mémorise et puisse ensuite la reconnaître parmi d'autres avec un taux de succès de 90 % (Tautz, 2009), elle doit avoir été confrontée au moins quatre fois à l'association « couleur-sucre » pour

la retenir. Ainsi, selon Karl von Frisch, si les abeilles reconnaissent d'abord les fleurs à leur couleur, puis, lorsqu'elles s'en rapprochent, à leur odeur, « c'est le parfum qui a, des deux facteurs, la plus grande force de persuasion » (2011, p. 86).

Outre les odeurs, les formes et les couleurs, les abeilles sont aussi capables d'associer une récompense à un moment de la journée. Si on donne pendant plusieurs jours de l'eau sucrée à des abeilles à des heures bien précises, elles vont mémoriser cette information et revenir au lieu de dressage uniquement aux horaires concernés. Cette capacité est particulièrement utile dans la nature puisque la production de nectar des fleurs varie en fonction de l'espèce et du moment de la journée. Grâce à leur capacité d'évaluation et de mémorisation du temps, les abeilles sont capables de programmer leurs vols de butinage en fonction des moments où les fleurs produisent le plus de nectar.

En effet, la mémoire joue un rôle essentiel dans l'apprentissage de l'abeille. Selon Randolf Menzel, il existe quatre phases de mémoire chez l'abeille : une mémoire « sensorielle » [Notre traduction], une mémoire à court terme, une mémoire à moyen terme et une mémoire à long terme (Menzel, 2016, p. 212-213). La mémoire sensorielle est la plus brève ; de l'ordre de quelques secondes, elle permet à l'abeille de passer d'une fleur à une autre et de continuer à y prélever du nectar. La mémoire à court terme, que Randolf Menzel divise en deux sous-phases, peut durer plusieurs minutes. C'est grâce à elle que l'abeille retient l'odeur, la forme et la couleur de l'espèce florale qu'elle est en train de butiner. Vient ensuite la mémoire à moyen terme. Elle nécessite que l'insecte ait été confronté plusieurs fois à l'association entre une fleur et le nectar et dure en général plusieurs heures, voire plusieurs jours. C'est grâce à elle que l'abeille peut, après un passage à la ruche, continuer à butiner la même espèce florale. Enfin, la mémoire à long terme est la plus stable. C'est celle qui entre en jeu lors des vols d'orientation, mais aussi après trois expériences positives de l'association « odeur-sucre » par exemple. Cette mémoire permet à l'insecte, si les conditions météorologiques sont mauvaises pendant plusieurs jours, de se souvenir, une fois le beau temps revenu, des meilleurs emplacements visités auparavant. La mémoire à long terme peut durer toute la vie de l'abeille, soit deux à trois semaines, voire plus pour celles nées à la fin de l'été et qui hivernent.

Illustration 9 :

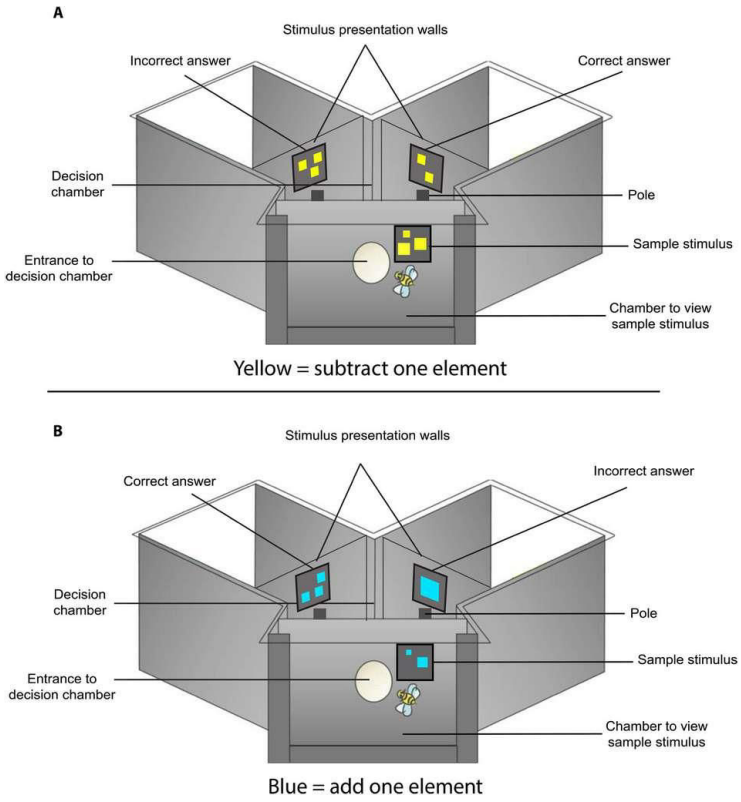


KIEVITS J. (sans date) [schéma]. In : KIEVITS J., La carte et la boussole (2). *Abeilles & C^ie^*. [en ligne]. 2010b, n 136, p. 31. Disponible sur : <http://www.cari.be/medias/abcie_articles/136_bio.pdf> (consulté le 01.04.2019)

Randolf Menzel (2016) explique l'existence de ces différentes phases de mémoire par l'énergie nécessaire à la mémorisation. Grâce au processus de consolidation, seules les informations véritablement importantes sont stockées dans la mémoire à long terme. Chez l'abeille, comme chez l'homme, le sommeil, en particulier la phase de sommeil profond, joue un rôle essentiel dans la consolidation de la mémoire. En outre, l'insecte est également capable d'oublier ou de désapprendre (extinction de la mémoire). Selon Janine Kievits (2009), l'abeille apprend certes très vite l'association « odeur-sucre », mais elle l'oublie aussi facilement si l'odeur lui est fournie plusieurs fois sans que la solution sucrée suive. De même, dans la nature, une fois qu'une espèce florale ne produit plus de nectar, l'abeille va désapprendre l'association et se reporter sur une fleur possédant, elle, une teneur en nectar élevée. Pourtant, le contenu mémorisé, s'il est stocké dans la mémoire à long terme, ne sera pas effacé. Il en restera des traces et il pourra être réactivé si l'espèce florale produit à nouveau une grande quantité de nectar.

Nous n'avons décrit jusqu'à présent que des apprentissages simples, par association. Or, les abeilles réalisent des tâches cognitives bien plus complexes, qui peuvent surprendre chez un animal aussi petit et dont le cerveau ne possède que quelque 960 000 neurones (en comparaison, le cerveau humain en compte environ 100 milliards). Tout d'abord, les abeilles savent compter ou, plutôt, elles sont capables de protocomptage. Certaines d'entre elles se servent même de cette capacité pour s'orienter. Pour le démontrer, des chercheurs ont réalisé l'expérience suivante (Chittka, Geiger, 1995) : ils ont placé quatre pergolas les unes à la suite des autres, à égale distance, et ont déposé un nourrisseur derrière la troisième. Après plusieurs jours, ils ont diminué la distance entre les pergolas sans déplacer le nourrisseur, qui s'est alors retrouvé derrière la quatrième pergola. Si plus de la moitié des abeilles a appréhendé la distance, grâce au flux optique, et s'est rendue derrière la quatrième pergola, une partie a continué à chercher derrière la troisième (ill. 9). D'après Janine Kievits, cette expérience montre que « les abeilles ont une représentation mentale du nombre d'obstacles qu'elles franchissent en vol » (2010b, p. 31). Elles sont donc capables de protocomptage, mais pas de comptage, car, au-delà de cinq pergolas, l'expérience échoue (les abeilles ne savent donc compter que jusqu'à cinq).

Illustration 10 :



Murs de présentation du stimulus

réponse erronée

réponse exacte

chambre de décision

surface d'atterrissage

entrée de la chambre de décision

stimulus initial

chambre de visualisation du stimulus initial

jaune = soustraire un élément

bleu = ajouter un élément

(Traduit de l'allemand en français pour les besoins du présent mémoire par DUCROS Camille)

HOWARD S.R, AVARGUÈS-WEBER A., GARCIA J. E. et al. *Science advance*, 2019 (sans date) [schéma]. In : DELUZARCHE C., Les abeilles savent faire des additions et des soustractions [en ligne]. Disponible sur : <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/insecte-abeilles-savent-faire-additions-soustractions-74982/> (consulté le 28.04.2019)

Il y a peu, des chercheurs ont également découvert que les abeilles comprennent le concept de zéro (Howard et al., 2018) et qu'elles sont capables de réaliser des opérations simples telles les additions et les soustractions (Howard et al., 2019). Pour démontrer cette dernière capacité, les scientifiques ont réalisé l'expérience suivante : ils ont entraîné les abeilles à associer une couleur à un type d'opération, le jaune correspondant à une soustraction et le bleu à une addition. En pénétrant dans un labyrinthe en Y, l'abeille était confrontée à une image représentant un certain nombre de carrés bleus ou jaunes. Si les carrés étaient jaunes, elle devait choisir la sortie du labyrinthe dont l'image présentait un carré de moins que l'image d'entrée pour parvenir à l'eau sucrée, faute de quoi elle trouvait une solution amère. À l'inverse, elle devait choisir l'image avec un carré supplémentaire si la couleur était le bleu (ill. 10). Après 100 essais, les abeilles trouvaient la bonne réponse dans 80 % des cas s'il y avait récompense. En l'absence de stimulus, le taux de réussite restait d'environ 70 %, ce qui prouve que les abeilles avaient bien appris la règle et ne choisissaient pas au hasard. Il s'agit certes d'opérations simples, mais elles nécessitent un traitement cognitif complexe sollicitant à la fois la mémoire à long terme et la mémoire à court terme.

Les abeilles parviennent également à résoudre d'autres problèmes complexes nécessitant un traitement cognitif élaboré. Des chercheurs du CNRS (Devaud et al., 2015) ont notamment démontré leur capacité à effectuer des discriminations non linéaires, c'est-à-dire à dissocier deux éléments de leur somme. Ils ont entraîné des abeilles à réagir à une odeur A, en l'associant à une récompense, et à faire de même pour une odeur B. Puis, ils ont confronté les abeilles à un mélange des deux odeurs, sans récompense. Après plusieurs essais, les insectes étiraient le proboscis lorsqu'on leur présentait l'odeur A ou B, mais pas lorsqu'ils étaient confrontés au mélange des deux odeurs. Ils sont donc parvenus à résoudre ce problème complexe et à inhiber le traitement linéaire selon lequel si A et B sont récompensés, AB devrait l'être doublement.

Illustration 11 :

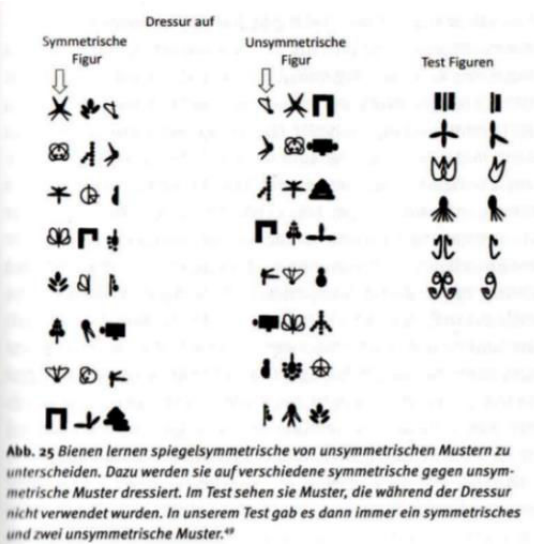


Abb. 25 *Bienen lernen spiegelsymmetrische von unsymmetrischen Mustern zu unterscheiden. Dazu werden sie auf verschiedene symmetrische gegen unsymmetrische Muster dressiert. Im Test sehen sie Muster, die während der Dressur nicht verwendet wurden. In unserem Test gab es dann immer ein symmetrisches und zwei unsymmetrische Muster.*[49]

Dressage à

une figure symétrique

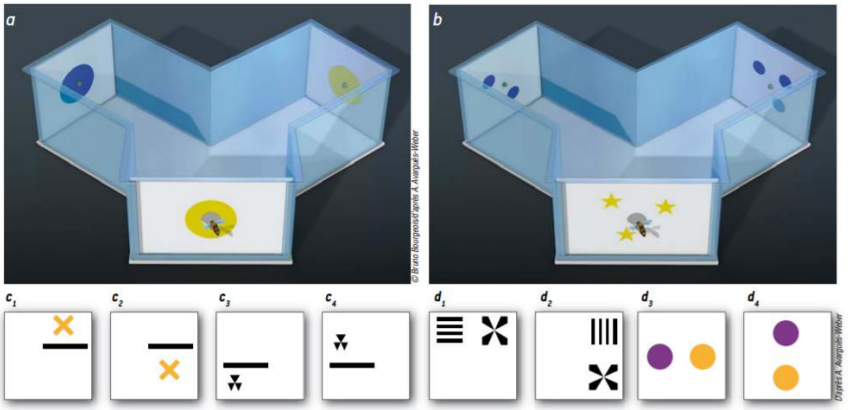
une figure asymétrique

figures du test

Fig. 25 Les abeilles apprennent à différencier des figures symétriques de figures non symétriques. Pour ce faire, elles sont dressées à reconnaître différentes figures symétriques parmi des figures asymétriques. Lors de la phase de test, elles sont confrontées à des figures qu'elles n'ont jamais vues au cours du dressage. Lors du test, il y avait toujours une figure symétrique et deux figures asymétriques. (Traduit de l'allemand en français pour les besoins du présent mémoire par DUCROS Camille)

MENZEL R., Abb. 25 (sans date) [schéma]. In : MENZEL R., ECKOLDT M., *Die Intelligenz der Bienen: Wie sie denken, planen, fühlen und was wir daraus lernen können.*3e éd. Münich : Albrecht Knaus Verlag, 2016, p. 237.

Illustration 12 :



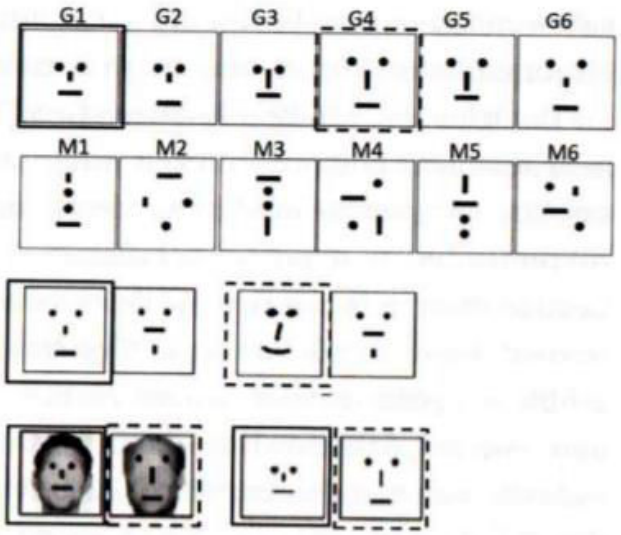
2. LES CONCEPTS RELATIONNELS sont des relations liant les objets, telles que « identique à », « en même nombre que » et « au-dessus de ». Les abeilles sont capables de maîtriser ces trois derniers concepts. Dans un labyrinthe en Y, elles peuvent apprendre à choisir la branche terminée par une image de couleur identique à celle présentée à l'entrée *(a)* ou comportant le même nombre d'éléments *(b)*. Elles transfèrent même la règle d'identité à des formes et à des odeurs : après l'avoir apprise avec des couleurs, elles choisissent spontanément la branche contenant une odeur ou une forme identique à celle présentée à l'entrée. De même, elles peuvent apprendre à choisir la branche contenant une certaine configuration spatiale : celle où un objet est au-dessus d'une barre de référence (c_1 et c_4) contre celle où il est au-dessous (c_2 et c_3), ou celle où deux objets sont l'un au-dessus de l'autre (d_2 et d_4) contre celle où ils sont côte à côte (d_1 et d_3). Dans tous les cas, les images récompensées ne se ressemblent pas (les trois étoiles sont, par exemple, très différentes des trois ronds bleus) : elles n'ont en commun que la relation à apprendre, tel le nombre d'éléments. Pour les abeilles, cette relation devient donc abstraite, c'est-à-dire indépendante des objets.

AVARGUÈS-WEBER A., Les concepts relationnels (sans date) [schéma]. In : AVARGUÈS-WEBER A., L'intelligence des abeilles. *Pour la Science*. [en ligne]. 2013, no 429, p. 23. Disponible sur : <https://www.abeilleduhain.be/wp-content/uploads/2017/04/intelligence-des-abeilles.pdf> (consulté le 01.04.2019)

Les abeilles saisissent aussi des concepts abstraits indépendamment de la forme ; elles résolvent des problèmes en fonction de règles de relation et comprennent par exemple ce que signifie « plus grand », « plus petit », « au-dessus », « en dessous », « à gauche », « à droite », etc. Elles maîtrisent également les notions de symétrie et d'asymétrie. Martin Giurfa (2015) a ainsi mené l'expérience suivante : il a présenté à une abeille, chaque fois qu'elle rentrait à la ruche, une paroi verticale avec trois images dont une, symétrique, comportait une goutte de solution sucrée. À chaque fois, il changeait les trois images, mais déposait toujours la goutte d'eau sucrée sur l'image symétrique. Après un certain nombre de répétitions, il a présenté à l'abeille 12 images qu'elle n'avait jamais vues auparavant et parmi lesquelles six étaient symétriques. Aucune des images n'était récompensée. L'abeille a tout d'abord cherché au hasard puis, au bout d'un certain temps, elle a porté son choix sur les figures auxquelles elle avait été entraînée, les figures symétriques (ill. 11). L'insecte a donc compris la règle abstraite « symétrie = récompense ». Selon Martin Giurfa (2015), il s'agit de la preuve que les abeilles sont capables d'attention, c'est-à-dire de « focaliser leur perception sur un stimulus ou un groupe de stimuli en filtrant d'autres stimuli simultanés, moins pertinents au moment considéré » [Notre transcription].

Outre la notion de symétrie, les abeilles reconnaissent le concept relationnel d'identité ou d'équivalence. C'est une autre expérience avec le labyrinthe en Y qui permet de le démontrer (Avarguès-Weber, Giurfa, 2013) (ill. 12). On présente à des abeilles, à l'entrée du labyrinthe, une image colorée. Elles ont ensuite le choix entre deux sorties : une devant laquelle se trouve une image de la même couleur que celle de l'entrée, et une autre avec une image de couleur différente. Seule la sortie dont l'image est de la même couleur que celle de l'entrée est récompensée. Après plusieurs essais (60 allers-retours), les abeilles ont compris et choisissent avec 75 % de succès la sortie présentant la même image qu'à l'entrée, et ce, même lorsqu'on change le signal récompensé : il peut s'agir d'une autre couleur, mais aussi d'une forme, d'une odeur, voire d'une odeur associée à une couleur. Les abeilles ne sont pas désorientées par le changement de signal et font le bon choix même si elles sont confrontées pour la première fois

Illustration 13 :



MENZEL R., Abb. 26 (sans date) [schéma]. In : MENZEL R., ECKOLDT M., *Die Intelligenz der Bienen: Wie sie denken, planen, fühlen und was wir daraus lernen können.*3e éd. Münich : Albrecht Knaus Verlag, 2016, p. 241.

à ce type de signal. Elles sont donc bel et bien capables d'extraire un principe d'équivalence. Les deux expériences décrites ci-dessus montrent que les abeilles sont capables de former une règle abstraite et de transférer leur choix vers des signaux nouveaux. Elles maîtrisent donc la catégorisation.

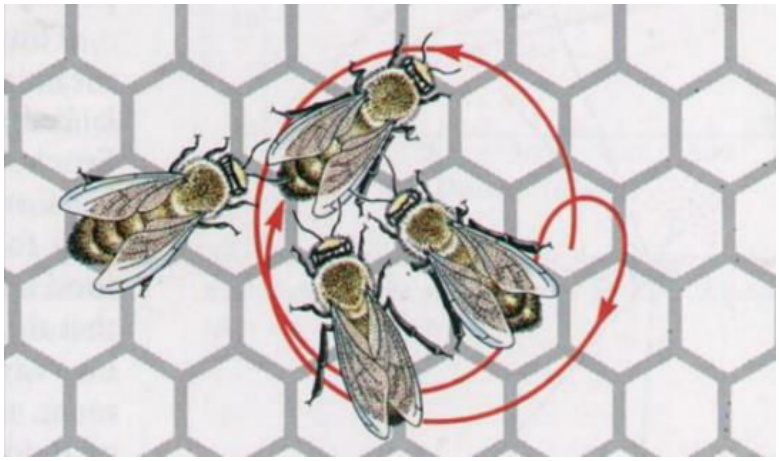
Autre capacité étonnante de l'abeille : celle de reconnaître les visages. Des chercheurs (Avarguès-Weber et al., 2010) sont partis de l'hypothèse que si les abeilles sont à même de reconnaître les fleurs à partir de leurs traits caractéristiques, elles devraient aussi pouvoir différencier des visages. Ils ont donc représenté schématiquement des visages à partir de leurs traits caractéristiques (deux yeux, un nez, une bouche). Afin de tester la validité de l'expérience, les scientifiques ont également présenté aux abeilles des images comportant les mêmes éléments, mais ordonnés de façon à ne plus former un visage (ill. 13). Les abeilles ont été capables de faire la différence entre un « visage » et un « non-visage » et de distinguer un visage d'un autre si la ressemblance entre les deux n'était pas trop grande (elles distinguent G1 de G3, mais pas G1 de G2).

Les abeilles sont aussi douées de capacités de réflexion ou, du moins, d'analyse. Lorsqu'on capture des butineuses au moment de leur départ de la ruche et qu'on les relâche dans un lieu inattendu, elles vont d'abord prendre la direction qu'elles auraient prise depuis la ruche. Mais après 100 ou 200 mètres de vol, elles comprennent qu'elles ne se trouvent pas là où elles devraient être. Elles font donc marche arrière, entreprennent au ralenti une série de vols courbes autour du lieu où elles ont été relâchées puis, une fois qu'elles ont reconnu l'endroit où elles se trouvent, elles s'envolent vers la ruche ou vers leur destination initiale (voir la théorie de la **carte cognitive** décrite au II). Janine Kievits affirme aussi que ces insectes n'agissent pas de façon aléatoire : si une abeille trouve une source de nourriture, elle va « apprécier la teneur en sucre du nectar » de l'espèce florale concernée, « apprécier la dimension du champ » et « aller solliciter d'autant plus de monde » qu'elle estime nécessaire (Kievits, 2013, p. 43). La journaliste scientifique Anne Debroise ajoute que les abeilles anticipent sur leur probabilité de réussite et « ne se lancent pas dans un exercice si elles estiment qu'elles vont à l'échec » (2016, p. 73). Elles seraient donc capables de performances métacognitives, c'est-à-dire qu'elles vont

évaluer leurs connaissances avant de prendre une décision. C'est ce que semble indiquer une expérience avec le labyrinthe en Y (Avarguès-Weber, Giurfa, 2013). Les scientifiques ont fait apprendre aux abeilles le concept « au-dessus de », puis ils leur ont présenté des images où un objet variable se trouvait au-dessus d'une ligne horizontale. Parfois, l'objet se superposait pratiquement à la ligne et il était difficile, voire impossible, de savoir s'il était « au-dessus » de la ligne ou non. Si les insectes choisissaient la bonne sortie, ils étaient récompensés par une solution sucrée, sinon par une solution amère. Après plusieurs essais, les abeilles ont décidé de rebrousser chemin plutôt que de choisir. Elles disposeraient donc d'une conscience métacognitive, puisqu'elles ont été capables de juger la difficulté de l'apprentissage effectué et d'estimer si elles avaient suffisamment confiance en leurs réponses pour finalement décider de ne pas choisir. Thomas Dyer Seeley affirme, quant à lui, que les abeilles « possèdent un degré de conscience perceptive » puisqu'elles sont « conscientes [des objets et des événements dans l'environnement] dans le sens où elles éprouvent des perceptions et des souvenirs de ces choses » (Seeley, cité dans Fayet, 2014, p. 26).

Enfin, contrairement aux apparences, les abeilles font preuve d'individualité. Selon Janine Kievits, elles font appel à des « compétences différentes pour parvenir à un même but » (2013, p. 45). Elles peuvent aussi faire des choix différents. Ainsi, lors de l'expérience avec les pergolas, certaines abeilles ont choisi de compter les pergolas, tandis que les autres ont utilisé leur capacité à mesurer la distance à l'aide du flux optique pour retrouver l'emplacement du nourrisseur. De même, une abeille recrutée par une congénère peut décider de se rendre d'abord au site qu'elle visitait jusqu'alors pour voir s'il est toujours productif et, si ce n'est pas le cas, se rendre directement et sans passer par la ruche (par un « novel shortcut ») à l'endroit indiqué par la danse, tandis que d'autres se rendront à l'endroit indiqué sans retourner à leur ancien lieu de butinage. C'est aussi grâce à des abeilles déviantes, qui refusent d'obéir à leurs congénères, que des sources intéressantes de nourriture sont découvertes. Néanmoins, avant de choisir de se rendre ou non à un lieu indiqué, les abeilles doivent d'abord pouvoir se comprendre.

Illustration 14 :



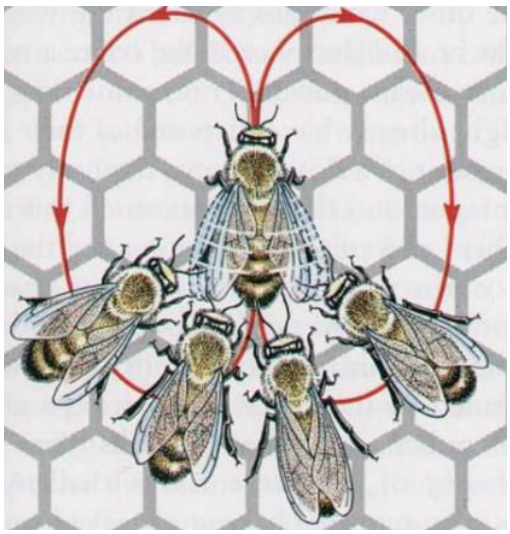
La danse en rond (sans auteur, sans date) [dessin]. In : La communication chez les abeilles [en ligne]. Disponible sur : <http://ekladata.com/cl1dRot4jKGB3w7CRMpXUGyYtqw/ommunication-abeilles.pdf> (consulté le 28.04.2019)

V. La communication chez l'abeille

Nous décrirons dans cette partie le troisième type de connaissances évoquées par Jürgen Tautz (2009), celles liées à la réception d'informations de la part des autres abeilles. Les abeilles disposent d'un système de communication très élaboré (Randolf Menzel refuse de parler de « langage »). Selon Agnès Fayet, leurs capacités de communication leur permettent d'indiquer « l'emplacement [d'une] source de nourriture », mais aussi « la qualité et la quantité de nourriture », « la distance par rapport à la ruche », « l'abondance d'autres sources », « le flux entrant de nectar dans la colonie », « la météo et l'heure », « la présence éventuelle de dangers » ou encore l'emplacement d'une nouvelle ruche lors de l'essaimage (2014, p. 26). Une multitude d'informations que les abeilles fournissent grâce à des signaux tels que des tremblements, des bourdonnements, la libération de phéromones, mais aussi et avant tout par leurs danses.

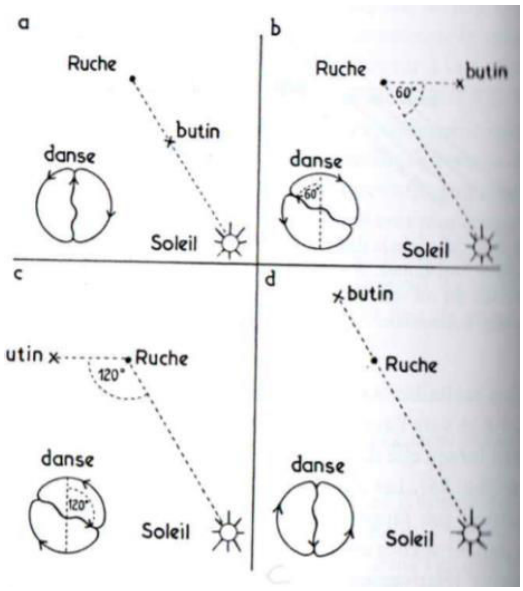
La danse des abeilles a été découverte et décodée par Karl von Frisch au début du XX^{e} siècle et ne cesse, depuis, de fasciner. L'abeille effectue deux danses différentes (certains auteurs en distinguent même trois) en fonction de la distance à laquelle se situe le lieu indiqué. Si la source de nourriture se trouve à moins de 80 mètres environ, la danseuse effectue une sorte de ronde. Karl von Frisch décrit cette danse ainsi : l'abeille « se met à trottiner à pas rapides sur le rayon, là où elle se trouve, en cercles étroits, changeant fréquemment le sens de sa rotation, décrivant de la sorte un ou deux arcs de cercle chaque fois, alternativement vers la gauche et vers la droite » (2011, p. 157) (ill. 14). Ce faisant, la danseuse n'indique pas l'endroit où se trouve la source de nourriture. Les suiveuses, ou imitatrices, savent uniquement qu'elles doivent chercher autour de la ruche dans une zone circulaire d'un rayon inférieur à 80 mètres. Elles découvrent également le type de fleur à chercher, mais, selon Karl von Frisch, cette information est fournie par l'odeur de la fleur restée sur le corps de la danseuse et par le nectar qu'elle éjecte de son jabot à l'intention des suiveuses et non pas par la danse en elle-même. Enfin, une dernière information fournie par la danse est le degré d'intérêt de la source de nourriture indiquée. Plus la source est intéressante, c'est-à-dire plus la teneur en nectar de l'espèce florale est élevée, plus l'abeille dansera avec entrain. Cela vaut également pour la danse en huit.

Illustration 15 :



La danse en huit (sans auteur, sans date) [dessin]. In : La communication chez les abeilles [en ligne]. Disponible sur : <http://ekladata.com/cl1dRot4jKGB3w7CRMpXUGyYtqw/ommunication-abeilles.pdf> (consulté le 28.04.2019)

Illustration 16 :



VON FRISCH K., Fig. 87 (sans date) [schéma]. In : VON FRISCH K., *Vie et mœurs des abeilles*. 3e éd. Paris : Éditions Albin Michel, 2011, p. 180.

En effet, lorsque la source de nourriture est située loin de la ruche, à plus de 80 mètres, le type de danse effectuée par les recruteuses change. Elles ne font plus des rondes mais des danses en huit, aussi appelées danses frétillantes. La danseuse frétille d'abord de l'abdomen en poussant son corps vers l'avant. Selon Jürgen Tautz, elle « agite son corps d'un côté puis de l'autre, à peu près 15 fois par seconde » (2009, p. 93). Les oscillations sont donc très rapides. Passé quelques secondes, l'abeille effectue un demi-cercle par la droite ou par la gauche afin de retourner à son point de départ et de recommencer sa chorégraphie. Elle alterne entre la droite et la gauche pour revenir à sa position initiale et sa danse forme donc un huit, d'où le nom de « danse en huit » utilisé pour désigner cette danse (ill. 15). Beaucoup plus élaborée que la danse en rond, la danse en huit fournit également plus d'informations. Tout d'abord, elle informe les suiveuses sur la distance séparant la colonie de la source de nourriture. Une seconde d'oscillations représente une distance d'environ 1 kilomètre. Si l'intensité de la vibration reste la même, les tours vont se succéder d'autant plus rapidement que la source de nourriture est proche. Ainsi, pour une source située à environ 100 mètres de la ruche, la danseuse va réaliser neuf à dix fois le trajet frétillant en 15 secondes, alors qu'elle ne l'effectuera qu'une fois pour une source se trouvant à dix kilomètres de la ruche. Mais, cette indication n'est pas toujours exacte. En effet, la distance indiquée varie non seulement en fonction de la morphologie du paysage, mais aussi de la dépense énergétique nécessaire au vol jusqu'à la source de nourriture : si l'abeille est poussée par le vent, elle indiquera une distance plus courte que la distance réelle (l'abeille ne mesure les distances que lors du vol aller). Outre la distance, la danse en huit informe également les abeilles recrutées sur la direction dans laquelle elles doivent se rendre. Pour indiquer cette direction, les abeilles utilisent leur capacité innée à s'orienter grâce au soleil. Elles reproduisent, à l'intérieur de la ruche, l'angle que forme la direction de la source de nourriture par rapport à celle du soleil. Par exemple, si lors du trajet frétillant la danseuse observe un angle de 30° à droite par rapport à la verticale (ou plus précisément, à l'axe de la gravité terrestre), alors cela signifie que la source de nourriture se trouve, en sortant de la ruche, à 30° à droite par rapport à la direction du soleil (ill. 16). Lorsqu'elles n'aperçoivent pas le soleil, les abeilles se basent sur la lumière polarisée du ciel pour déterminer sa position et

la direction de la source de nourriture (voir I). Lorsqu'il y a un obstacle sur le trajet et qu'un détour est nécessaire, la danseuse indique non seulement, grâce au mécanisme d'**intégration de trajet** (voir II), la direction de la source de nourriture à vol d'oiseau, mais elle donne aussi la longueur réelle du vol, de sorte que les abeilles recrutées ne se trompent pas.

Toutes ces chorégraphies se déroulent à l'intérieur de la ruche, dans le noir le plus total. Pourtant, bien qu'elles ne voient pas leurs congénères, les abeilles comprennent parfaitement les informations fournies par les danseuses. Tout d'abord, même si elles se trouvent très loin de la danseuse sur le rayon, les abeilles perçoivent la danse et sont capables de localiser la danseuse. Lors du trajet frétillant, cette dernière a en effet les pattes agrippées aux alvéoles ; les vibrations dues aux oscillations de son abdomen se transmettent donc le long du rayon et alertent les autres abeilles. Une fois accourues, celles-ci se placent tout autour de la recruteuse en rapprochant leurs antennes de son abdomen et en suivant ses moindres mouvements. Les chercheurs ont longtemps considéré que c'était uniquement grâce à leurs perceptions tactiles et olfactives que les abeilles remarquaient et suivaient les danses de leurs congénères, mais des expériences plus récentes semblent indiquer qu'en réalité, les abeilles se comprennent dans l'obscurité de la ruche grâce au champ électrique émis par leur corps et à l'électrosensibilité de leurs antennes (Greggers, Koch et al., 2013). En effet, en raison de la répulsion des antennes pour les charges positives, lorsqu'une abeille danse, les antennes des suiveuses fléchissent dès que le corps de la danseuse (chargé positivement) se rapproche d'elles. Cela leur permet de saisir ses moindres mouvements. Cette réaction des antennes provoque la mise en mouvement des cellules sensorielles ciliées. Il y a émission d'influx nerveux dont l'intensité serait liée à celle du champ électrique perçu. Ainsi, les scientifiques estiment que les abeilles exploitent ce mécanisme pour dialoguer par champs électriques interposés. Néanmoins, d'autres expériences seraient nécessaires pour pouvoir l'affirmer avec certitude.

VI. Conclusion

Nous avons tenté, dans cet exposé, de présenter certaines des capacités insoupçonnées de l'abeille domestique, que ce soit en matière d'orientation et de navigation, de cognition et de réflexion ou de communication. Néanmoins, il reste encore de nombreux mystères à percer concernant l'intelligence de cet insecte. Les recherches sur la cognition des abeilles n'en sont qu'à leurs balbutiements. La théorie de la **carte cognitive** reste critiquée par certains scientifiques, selon lesquels elle serait le propre des mammifères. Néanmoins, certaines découvertes semblent indiquer que l'abeille nous ressemble plus qu'il n'y paraît. Des processus analogues aux nôtres seraient à l'œuvre dans leur cerveau lors de l'apprentissage et de la mémorisation. En outre, leur cerveau posséderait une structure équivalente à notre hippocampe, les corps pédonculés, jouant un rôle essentiel dans la formation de la mémoire à long terme. Des recherches plus poussées sont nécessaires, mais si ces hypothèses sont corroborées, notre perception de ces insectes pourrait en être bouleversée. Et si, comme l'affirme Francis Hallé dans son livre *Éloge de la plante*, nous avons véritablement tendance à nous intéresser à ce qui nous ressemble le plus, peut-être devrions-nous davantage nous préoccuper du sort des abeilles, des insectes fascinants dont dépend notre survie, même si nous l'oublions parfois.

TEXTE-SUPPORT ET SA TRADUCTION

Avertissement au lecteur

Pour plus de lisibilité, la traductrice a choisi de séparer le texte des illustrations. Ces dernières se trouvent à la fin du texte-support et de la traduction. Certaines illustrations, considérées comme non essentielles à la compréhension du texte et de sa traduction, ont été supprimées.

Les termes faisant l'objet d'une fiche terminologique sont indiqués en caractères gras, sauf dans les titres et sous-titres ; ils sont alors en italique.

Les mots et expressions du glossaire sont soulignés.

Les termes et passages commentés dans la partie « Stratégie de traduction » sont indiqués entre deux astérisques (par exemple *Niststelle*) lors de leur première occurrence uniquement, sauf s'ils ont été traduits différemment au fil du texte. Lorsqu'un terme commenté dans la partie « Stratégie de traduction » est imbriqué dans un passage ayant lui aussi posé problème, le passage est délimité par deux astérisques initiaux et deux astérisques finaux, tandis que le terme est encadré par deux astérisques (par exemple **Ainsi les abeilles ne pouvaient pas mémoriser les composantes vectorielles d'une route, mais nous pouvions tester leur *motivation* à retrouver la ruche comme pour des abeilles dressées à des routes**).

Références bibliographiques du texte-support

MENZEL R., Kleine Gehirne – überraschendes Orientierungsvermögen: Das Landschafstgedächtnis der Bienen. *Biologie Unserer Zeit* [en ligne]. 2009, n° 39, p. 31-40. Disponible sur : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/biuz.200910382> (consulté le 03.03.2018)

Texte source : 3 501 mots (4 166 avec les illustrations et légendes)

Traduction : 4 275 mots (5 104 avec les illustrations et légendes)

Kleine Gehirne – überraschendes Orientierungsvermögen:

Das **Landschaftsgedächtnis** der Bienen

RANDOLF MENZEL

Tiere und Menschen wären verloren, wenn sie sich nicht in ihrer Lebenswelt auskennen würden. Das Erkunden der Umgebung führt zu ***Gedächtnisspuren****, die dem Zurechtfinden dienen. Wie sind diese* ***Gedächtnisspuren*** *organisiert? Sind es viele aneinander gereihte Bilder oder etwa eine Art geometrische Karte? Untersuchungen an Honigbienen zeigen, dass auch diese kleinen Tiere über ein umfassendes* ****Raumgedächtnis**** *verfügen, das es ihnen erlaubt, zielsicher über Abkürzungen zu fliegen und zwischen Zielorten auszuwählen.*

Bienen fliegen kilometerweit rund um ihren Stock, um Nektar und Pollen zu sammeln. Dabei kehren sie regelmäßig zu ihrem Stock zurück, um die Nahrung zu speichern. Außerhalb ihres Volkes können sie als soziale Insekten nur kurz überleben. Sie sind daher darauf angewiesen, sicher zu ihrem Volk zurückzukehren. Blumen, ihre Nahrungsquellen, wechseln ihre Produktivität häufig. So müssen die Bienen also immer wieder neue Orte finden und neue Wege fliegen. Auch für andere Aufgaben zum Nutzen ihres Volkes setzen sie ihr gutes Navigationsvermögen ein, etwa um Wasser zur Kühlung an heißen Sommertagen zu holen, Harz zum Abdichten der Nesthöhle oder zum Auffinden und Ansteuern einer neuen *Niststelle*, wenn sie schwärmen.

Un petit cerveau, mais un incroyable sens de l'orientation :

La **mémoire du paysage** de l'abeille

RANDOLF MENZEL

S'ils ne connaissaient pas le monde qui les entoure, les hommes et les animaux seraient perdus. C'est grâce aux ***traces mnésiques*** *formées lors de l'exploration de l'espace environnant qu'ils parviennent à se repérer. Mais comment sont organisées ces* ***traces mnésiques*** *? S'agit-il d'une succession d'images ou d'une sorte de carte géométrique ? Des études portant sur les abeilles mellifères ont montré que ces petites bêtes disposent elles aussi d'une* ****mémoire spatiale**** *vaste et détaillée leur permettant d'atteindre un lieu avec succès en prenant un raccourci ou de choisir entre plusieurs destinations.*

Afin de récolter du nectar et du pollen, les abeilles parcourent des kilomètres autour de leur ruche, tout en regagnant régulièrement cette dernière pour y entreposer la nourriture. Seuls, sans leur colonie, ces insectes sociaux ne survivent que très peu de temps. Il est donc essentiel qu'ils puissent la retrouver à coup sûr. En outre, la productivité des fleurs, leur source d'approvisionnement, change régulièrement. Les abeilles doivent donc sans cesse trouver de nouveaux lieux et parcourir de nouveaux trajets. Elles utilisent aussi leurs excellentes capacités de navigation pour réaliser d'autres tâches utiles à la colonie : par exemple aller chercher de l'eau pour rafraîchir la ruche durant les chaudes journées d'été, collecter de la résine pour la rendre étanche ou encore découvrir et rejoindre un nouvel emplacement pour le *nid* lors de l'essaimage.

Wir wissen seit den berühmten Untersuchungen von Karl von Frisch und seinen zahlreichen Schülern und wissenschaftlichen Nachfahren, dass sich Bienen nach dem Sonnenkompass orientieren, und dass sie sich mit dem Schwänzeltanz über die Richtung und Entfernung zu einem wichtigen Ort (Nahrungsquelle, Wasserstelle, Harzsammelstelle, neuer Nistort) informieren (siehe Kasten: „Tanzkommunikation“ auf Seite 35). Martin Lindauer beschrieb, wie Bienen auf der Grundlage eines angeborenen Wissens *die ortsrichtige Zeitfunktion der scheinbaren Sonnenbewegung* erlernen. In der Tradition von Karl von Frisch und Martin Lindauer wurden viele Entdeckungen über die Sinnesleistungen und das Lernvermögen der Bienen gemacht. Trotz all dieser bedeutsamen Befunde ist immer noch nicht recht klar, wie das Gedächtnis organisiert ist, das Bienen für ihre Navigation einsetzen.

[…]

Wegintegration –Heimfinden in völlig neuer Umgebung

Wenn eine Biene zum ersten Mal ihren Stock verlässt, fliegt sie aus, um die Landschaft zu erkunden. Zum sicheren Zurückfinden in ihren Stock steht ihr ein einfacher Navigationsmechanismus zur Verfügung, die **Wegintegration**. Diese erlaubt ihr, nach einem vom Heimatstock ausgehenden kurvenreichen Flug zu jedem Zeitpunkt auf der kürzesten Strecke zum Ausgangspunkt, ihrem Stock, zurückzufliegen. Da die Biene die Gegend nicht kennt, kann sie sich nicht nach Landmarken orientieren, sondern muss ihre eigene Bewegung hinsichtlich der rotatorischen Komponente (Richtung) und der translatorischen Komponente (Länge der Wegstrecke) registrieren (**Wegintegrationsmechanismus**). Damit ihr dies gelingt, muss die Biene also die Richtung relativ zu einem Bezugspunkt und die Flugentfernung fortlaufend auswerten.

Grâce aux célèbres expériences de Karl von Frisch, de ses nombreux élèves et des scientifiques qui lui ont succédé, on sait aujourd'hui que les abeilles utilisent une boussole solaire pour s'orienter et qu'elles indiquent, grâce à la danse en huit, la direction et la distance d'un lieu intéressant (source de nourriture, point de collecte de résine, nouvel emplacement pour le nid) […]. Martin Lindauer a quant à lui décrit comment les abeilles apprennent, sur la base de connaissances innées, *à déterminer le temps local grâce au mouvement apparent du soleil*. Dans le sillage de Karl von Frisch et de Martin Lindauer, de nombreuses découvertes ont été réalisées concernant les aptitudes sensorielles et les capacités d'apprentissage des abeilles. Néanmoins, malgré ces découvertes significatives, l'organisation de la mémoire utilisée par les abeilles pour leur navigation reste aujourd'hui mal connue.

[…]

L'*intégration de trajet* — ou comment retrouver son chemin dans un environnement inconnu

Lorsqu'une abeille quitte sa ruche pour la première fois, elle s'envole à la découverte du paysage environnant. Afin de retrouver la ruche sans encombre, elle dispose d'un mécanisme de navigation simple : l'**intégration de trajet**. Celui-ci lui permet, après avoir effectué un trajet sinueux depuis la ruche, de retourner à tout moment à son point de départ en ligne droite. Comme l'abeille ne connaît pas l'environnement, elle ne peut pas s'orienter grâce à des points de repère. Il lui faut donc enregistrer les composantes rotationnelle (direction) et translationnelle (distance parcourue) engendrées par son propre déplacement (**mécanisme d'intégration de trajet**). Pour ce faire, elle doit constamment évaluer à la fois la direction par rapport à un repère et la distance de vol.

Sowohl die Richtung als auch die Entfernung werden visuell gemessen, die Richtung über eine Reihe von Bezugsquellen, wie die Sonne, *das Muster des linear polarisierten Himmelslichtes* und Objekte in der Landschaft. Die geflogene Entfernung wird über die Bestimmung des optischen Flusses, also die scheinbare Bewegung des Untergrunds, gemessen. Für beide Größen hat die Biene ein angeborenes Wahrnehmungssystem, das durch Erfahrung präzisiert wird. Man stellt sich nun vor, dass Richtung und Entfernung während des Fluges in kleinen Stücken der Flugstrecke gemessen werden, und diese Elemente dann mit den zugehörigen Richtungen verknüpft werden (Teilvektoren).

Wie dies das Nervensystem der Biene macht und ob es auf diese Weise tatsächlich zum Auffüllen eines Speichers für Teilvektoren kommt, ist unbekannt. Zur Zeit scheint ein solches Integrieren der richtungsgewichteten Streckenelemente besonders plausibel zu sein, aber das sagt nichts über die tatsächliche Arbeitsweise der zuständigen Gehirnbereiche aus. Das Gehirn könnte die **Wegintegration** auch anders zustande bringen, und darüber wollen wir weiter unten Überlegungen anstellen.

Der **Wegintegrationsmechanismus** ist ein *egozentrisches Orientierungssystem*. Alle Größen werden auf die Bewegung des eigenen Körpers relativ zu Orientierungsmarken (Sonne, Umgebung) bezogen. Ein solches System würde es den Bienen nicht erlauben, zum Stock zurückzufinden, wenn man sie an eine Stelle ihres explorierten Raumes transportiert und dort freilässt. Bienen sind aber unter solchen Bedingungen nicht verloren, wie wir gleich sehen werden. Außerdem können erfahrene Bienen den Sonnenazimut aus der Anordnung von Landmarken erschließen. Es muss also eine Möglichkeit geben, wie die Biene die anfängliche *egozentrische Orientierungsweise* in eine allozentrische überführt, also eine, bei der sie die Lage der Landmarken und ihre räumlichen Bezüge sowohl hinsichtlich des Sonnenkompasses wie auch untereinander berücksichtigt. Welche Struktur hat also das *allozentrische „**Landschaftsgedächtnis**“*? Ich werde diesen etwas vagen Begriff verwenden, um anzudeuten, dass dieses **Raumgedächtnis** mehr sein muss als eine *egozentrische **Wegintegration***, will aber mit dem Begriff noch nicht vorgeben, welche Inhalte das Gedächtnis speichert.

L'abeille mesure la direction et la distance visuellement : la direction grâce à une série de repères tels que le soleil, *le modèle de la polarisation rectiligne de la lumière du ciel* ou des éléments du paysage ; et la distance parcourue grâce à la détermination du flux optique, c'est-à-dire le défilement du paysage sous elle. Pour ces deux grandeurs, l'abeille dispose d'un système de perception inné, consolidé par l'expérience. On suppose que la direction et la distance sont mesurées au cours du trajet en découpant la route en petits segments, lesquels sont associés à leurs directions respectives (vecteurs locaux).

Néanmoins, on ignore comment le système nerveux de l'abeille réalise une telle segmentation et si une mémorisation des vecteurs locaux a bel et bien lieu. Actuellement, l'hypothèse d'une intégration des segments du trajet en tenant compte des directions successives suivies semble tout à fait plausible, mais elle n'explique pas la façon dont fonctionnent les différentes régions cérébrales concernées. Il est aussi possible que le cerveau réalise cette intégration du trajet différemment, comme nous nous proposons de le démontrer plus bas.

Le **mécanisme d'intégration de trajet** est une *stratégie de navigation basée sur un référentiel égocentré* : toutes les grandeurs sont centrées sur le corps de l'individu par rapport à différents repères (soleil, environnement). Un système de ce type ne permettrait pas aux abeilles de retrouver leur ruche si on les transportait jusqu'à un lieu connu de leur territoire avant de les libérer. Or, dans de telles conditions, les abeilles ne sont pas perdues, comme nous le verrons bientôt. En outre, les abeilles expérimentées savent déduire l'azimut solaire de la disposition des repères terrestres. L'abeille dispose donc nécessairement d'un moyen de transformer la *représentation spatiale égocentrée* initiale en une *représentation allocentrée*, c'est-à-dire où les repères terrestres et leur localisation spatiale sont considérés à la fois en tenant compte de la boussole solaire et de leurs relations géométriques. Quelle est la structure de cette *« **mémoire du paysage** » allocentrée* ? Ce terme quelque peu vague laisse supposer que la **mémoire spatiale** de l'abeille est plus qu'une simple ***intégration de trajet***, mais il ne prétend pas expliquer quels sont les contenus stockés en mémoire.

Lernen von Routen

Auf ihren ersten Orientierungsflügen sammeln Bienen meist noch nicht Nektar oder Pollen. Auch den Tänzen erfahrener Bienen folgen sie erst, wenn sie mit ihren Orientierungsflügen die Landschaft um den Stock gut kennengelernt haben. Haben sie dann aber eine *Futterstelle* gefunden, fliegen sie zielgerichtet auf der kürzesten möglichen Strecke zwischen Stock und Futterstelle hin und her. Die Analyse solcher Routenflüge ergab eine Fülle von Einsichten in die Navigation und Kommunikation von Bienen.

Die Konzentration auf Routenflüge hat bei der Analyse der Navigation von Bienen aber auch zu Problemen geführt. Versetzt man beispielsweise Bienen im Moment des Abfluges zu einer *Futterstelle* an eine andere Stelle, dann schlagen sie die Richtung ein, die sie vom Stock zu dieser Futterstelle gebracht hätte, die sie aber natürlich nach Versetzen in eine „falsche“ Richtung lenkt. Den gleichen „Fehler“ machen sie, wenn man sie im Moment des Abfliegens von einer Futterstelle an eine unerwartete Stelle versetzt. Auch dann fliegen sie nicht etwa direkt zum Stock, sondern sie schlagen eine Abflugrichtung ein, die der Kompassrichtung entspricht, die an der Futterstelle richtig gewesen wäre (Abbildung 2).

Als man nur die Abflugrichtungen registrieren konnte, schloss man aus diesem Verhalten, dass den Bienen nur die Information ihres *egozentrischen **Wegintegrationsmechanismus*** zur Verfügung steht, also nach einem Routenlernen die Richtung und Entfernung (die Vektorkomponente) ihres Fluges zwischen dem Stock und der Futterstelle. Dieses egozentrische Gedächtnis bezieht sich auf den Ausgangspunkt aller Flüge (Stock) und enthält nur die Informationen des auf der Route geflogenen Vektors (deshalb auch häufig *Vektorgedächtnis* genannt). Ein solches Gedächtnis erlaubt es dem Tier nicht, von einer anderen Stelle zum Stock zurückzufliegen. Tatsächlich sind aber Bienen nicht verloren, wenn man sie innerhalb des Gebietes aussetzt, das sie in ihren Orientierungsflügen kennen gelernt haben.

L’apprentissage de routes

Au cours de ses premiers vols d’orientation, une abeille ne récolte généralement pas encore de nectar ou de pollen. De même, elle ne suit les indications des danseuses qu’après avoir longuement exploré les environs de la ruche. Passé les vols d’orientation, lorsqu’une abeille a découvert un *lieu de butinage*, elle effectue avec précision des allers-retours entre celle-ci et la ruche en empruntant toujours le chemin le plus court. L’analyse de telles routes a permis de nombreuses découvertes sur la navigation et la communication des abeilles.

Néanmoins, la focalisation sur ces routes a conduit à des difficultés lors de l’analyse de la navigation de ces insectes. Par exemple, si l’on capture des abeilles au moment de leur départ pour une source de nourriture et qu’on les libère ailleurs, elles suivent d’abord la direction qu’elles auraient prise pour se rendre à ce lieu de butinage depuis la ruche, mais qui, désormais, est évidemment une « mauvaise » direction. Elles commettent la même « erreur » lorsqu’on les capture au moment de leur départ d’un lieu de butinage et qu’on les relâche à un endroit inattendu. Là encore, elles ne s’envolent pas directement vers la ruche, mais prennent une direction correspondant à celle, indiquée par leur boussole solaire, qui aurait été la bonne en repartant de ce lieu de butinage (ill. 2).

À l’époque où on ne pouvait enregistrer que la direction prise, on a conclu de ce comportement que les abeilles disposaient uniquement des informations fournies par le ***mécanisme d’intégration de trajet***, c’est-à-dire, une fois des routes mémorisées, la direction et la distance (les composantes vectorielles) du vol entre la ruche et le lieu de butinage. Cette mémoire égocentrée se rapporte au point de départ de tous les vols (la ruche) et renferme uniquement les informations relatives au vecteur de la route suivie (c’est pourquoi on parle souvent de *mémoire vectorielle*). Ce type de mémoire ne permet pas à l’animal de retourner à la ruche depuis un autre lieu que le point d’arrivée. Or, en réalité, les abeilles ne sont pas perdues lorsqu’on les relâche en un lieu du territoire qu’elles ont exploré lors de leurs vols d’orientation.

Um der Frage nachzugehen, ob sie tatsächlich ohne Vektorgedächtnis zum Stock zurück finden, fühlten wir ein Experiment durch, bei dem Bienen zwar auf eine *Futterstelle* dressiert wurden, diese sich aber ganz in der Nähe des Stocks befand (ca.10 m Abstand) und langsam um den Stock kreiste. **Auf diese Weise lernten die Bienen keine Vektorkomponenten einer Route, konnten aber mit der gleichen *Motivation* auf ihr Heimfinden geprüft werden wie auf Routen dressierte Tiere** (Abbildung 3). Da wir zu diesem Zeitpunkt keine Möglichkeit hatten, die Flugstrecke der Bienen über mehrere hundert Meter aufzuzeichnen, maßen wir ihre Flugzeit zwischen dem Freisetzen an verschiedenen Stellen um den Stock herum. Wir fanden heraus, dass diese Bienen nur geringfügig längere Zeit unterwegs waren als Bienen, die dressiert worden waren und nach dem Freisetzen einen direkten Routenflug zum Stock machten. Die Bienen waren ohne Vektorgedächtnis also keineswegs verloren, im Gegenteil, sie kamen sehr rasch zum Stock zurück.

Die Experimente wurden im Herbst durchgeführt, als es keine *natürliche Tracht* mehr gab, und das Bienenvolk wurde nur wenige Tage vor den Experimenten in das Testgelände gebracht. Außerdem wurden alle Richtungen um den Stock herum getestet. Somit kann man ausschließen, dass die Bienen sich nach alten Routen orientierten, die sie auf Sammelflügen hätten lernen können. Den Bienen stand also ein Gedächtnis der Landschaft zur Verfügung, das sie nur während ihrer Orientierungsflüge an dem neuen Ort angelegt haben konnten. Dieses Gedächtnis muss Inhalte und eine Struktur haben, die es den Bienen erlaubt, auf recht direktem Weg von der unerwarteten *Auflassstelle* zum Stock zurückzukehren. Eine aus der Ferne erkennbare Marke am Stock konnte dies nicht sein, denn die Gegend um den Stock herum war von manchen *Auflassstellen* nicht einsehbar.

Afin de déterminer si elles sont effectivement capables de retrouver le chemin de la ruche sans mémoire vectorielle, nous avons procédé à une expérience au cours de laquelle nous avons dressé des abeilles à se rendre à un *lieu de nourrissage* très proche de la ruche (environ 10 mètres), et que l'on faisait tourner lentement autour de celle-ci. **Ainsi, les abeilles ne pouvaient pas mémoriser les composantes vectorielles d'une route, mais nous pouvions tester leur *motivation* à retrouver la ruche comme pour des abeilles dressées à des routes** (ill. 3). Comme nous ne disposions pas, à l'époque, d'un moyen de suivre le trajet des abeilles sur plusieurs centaines de mètres, nous avons mesuré la durée de leur vol depuis différents lieux situés autour de la ruche. Nous avons découvert que, chez ces abeilles n'ayant pas mémorisé de route, la durée de vol n'était que légèrement supérieure à celle des abeilles dressées à une route et qu'une fois relâchées, elles effectuaient un trajet direct jusqu'à la ruche. Les abeilles n'étaient donc pas du tout perdues sans leur mémoire vectorielle ; au contraire, elles revenaient très rapidement à la ruche.

Cette expérience a été réalisée à l'automne, alors qu'il n'y avait plus de *sources naturelles de nectar et de pollen*, et la colonie n'a été transportée sur le site que quelques jours avant le début de l'expérience. En outre, l'ensemble des directions partant de la ruche ont été testées, on peut donc exclure que les abeilles aient pu s'orienter grâce à des routes apprises au cours de vols de butinage antérieurs. La **mémoire du paysage** dont disposaient les abeilles testées résultait donc uniquement de leurs vols d'orientation dans le nouvel environnement. Ainsi, c'est nécessairement grâce au contenu et à la structure de cette mémoire que les abeilles peuvent retourner directement à la ruche, depuis le *lieu inattendu où elles ont été libérées*. En effet, cela ne peut pas être grâce à une marque distinctive présente sur la ruche, puisque celle-ci et ses abords n'étaient pas visibles depuis certains *lieux de relâcher*.

Großer Radar für kleine Flieger

Ein großer Mangel aller Navigationsexperimente mit Bienen war bisher, dass der Flug der Bienen nicht kontinuierlich über größere Strecken registriert werden konnte. Das hat sich mit der Einführung des harmonischen Radars durch das Team von Prof. Joe Riley (England) geändert (siehe Kasten: „Harmonisches Radar auf Seite 39). Nun können Bienen, die eine kleine Antenne (Transponder) tragen, in einem Radius von ca. 1 km um das Radargerät herum kontinuierlich verfolgt werden. Als man die ersten Orientierungsflüge registrierte (Abbildung 4), zeigte sich, dass sie – wie oben beschrieben – auf kurvigen Flügen bis zu wenige hundert Meter vom Stock in die Landschaft fliegen und sicher wieder zurückkehren. Nachfolgende Orientierungsflüge werden über größere Strecken durchgeführt, weil die Bienen zunehmend schneller fliegen.

Mit dem harmonischen Radar konnten wir nun überprüfen, auf welchen Wegen Bienen nach dem Versetzen zum Stock zurückkehren. Wir prüften drei Gruppen von Bienen: Solche, die auf eine Futterstelle 200 m im Osten vom Stock dressiert wurden und ein *__Routengedächtnis__* aufgebaut hatten (nennen wir sie die **Routenbienen*). Eine andere Gruppe wurde wieder auf eine *Futterstelle* dressiert, die in der Nähe des Stockes um diesen herum rotierte (nennen wir sie **Rotationsbienen*). Einzelne Individuen beider Gruppen wurden in dem Moment abgefangen, in dem sie nach dem Vollsaugen an der Futterstelle zum Stock zurückkehren wollten. Außer diesen beiden Gruppen testeten wir eine dritte Gruppe, nämlich solche, die einer Tänzerin folgten, die die Futterstelle 200 m im Osten anzeigte.

Wir markierten nahezu alle Bienen in einem kleinen Volk (rund 2000 Bienen) mit farbigen *Nummernschildern* (Abbildung 5). Wir konnten nun durch eine Glasscheibe beobachten, welche dieser Bienen einer Tänzerin folgte. Diese fingen wir dann am Ausgang des Stockes ab, als sie sich auf den Weg machten, der Information des Tanzes folgend nach der Futterstelle zu suchen. Den Flug dieser Bienen wollen wir zuerst betrachten, und nennen sie *rekrutierte Bienen*, weil sie durch eine Tänzerin rekrutiert wurden.

Un grand radar pour de petites aviatrices

Un des défauts majeurs des expériences sur la navigation des abeilles a longtemps été l'impossibilité d'enregistrer, en continu, le vol de ces dernières sur de longues distances. Tout a changé avec l'introduction du radar harmonique par l'équipe du professeur Joe Riley (Angleterre) […]. Désormais, il est possible de suivre une abeille, équipée d'une petite antenne (le « transpondeur »), sur un rayon d'environ 1 kilomètre autour du radar. L'enregistrement des premiers vols d'orientation a montré — comme décrit précédemment — que les abeilles réalisent des vols sinueux jusqu'à quelques centaines de mètres de la ruche puis retournent en ligne droite à cette dernière. Au cours des vols d'orientation suivants, elles parcourent des distances toujours plus grandes, car elles volent de plus en plus vite.

Le radar harmonique nous a permis d'observer les chemins qu'empruntaient les abeilles, une fois libérées, pour rentrer à la ruche. Nous avons examiné trois groupes d'abeilles : d'abord, celles qui avaient été dressées à se rendre à un lieu de nourrissage situé à 200 mètres à l'est de la ruche et *__qui avaient donc mémorisé une route__* (on les nommera les **abeilles à route**). Puis, un autre groupe, également dressé à un *point de nourrissage*, mais qui, lui, se trouvait à proximité de la ruche et tournait autour de celle-ci (groupe des **abeilles à source tournante**). Pour chaque groupe, nous avons capturé quelques individus au moment où, après s'être approvisionnés au point de nourrissage, ils s'apprêtaient à rentrer à la ruche. Outre ces deux groupes, nous en avons étudié un troisième, constitué d'abeilles suivant les indications fournies par une danseuse ayant visité le lieu de nourrissage situé à 200 mètres à l'est.

Nous avons marqué pratiquement toutes les abeilles d'une colonie de petite taille (environ 2 000 individus) à l'aide de *__pastilles numérotées__* (ill. 5). Il nous était donc possible de voir, à travers une vitre, celles qui suivaient la danseuse. Nous les avons ensuite capturées à leur sortie de la ruche, alors qu'elles se préparaient à suivre les informations de la danse pour se rendre au lieu de nourrissage. C'est le trajet de ces abeilles que nous examinerons en premier. Nous les qualifierons d'*abeilles recrutées*, car elles ont été recrutées par une danseuse.

Rekrutierte Bienen flogen in der Tat zuerst rund 200 m nach Osten, gleichgültig, ob wir sie am Stockausgang mit dem Transponder versahen und dann losfliegen ließen, oder ob wir sie an eine unerwartete Stelle transportierten (Abbildung 6). Damit bestätigen wir die Entdeckung von Karl von Frisch und seinen Schülern, die mit vielen Experimenten zeigten, dass rekrutierte Bienen der Information des Tanzes folgen. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass sie das auch tun, wenn sie nicht auf derselben Strecke fliegen wie die tanzenden Bienen. Damit kann man ausschließen, dass sie etwa Bienen folgen, die zu der Futterstelle unterwegs sind. Außerdem zeigten unsere Experimente, dass sie nicht etwa einer Duftmarke folgen, die von der Futterstelle ausgeht, denn sie fliegen ja von einer anderen *Auflassstelle* nicht zu der Futterstelle, sondern folgen den im Tanz vermittelten Informationen (200 m nach Osten). Dies ist ein außerordentlich wichtiger Befund, weil immer wieder vermutet wurde, dass es Duftspuren sind, die rekrutierte Bienen leiten und nicht die im Tanz vermittelte Information.

Sehr aufschlussreich ist auch, was die rekrutierten Bienen tun, nachdem sie der Vektorinformation gefolgt sind, die sie im Tanz gelernt haben. Wurden sie am Stock frei gelassen, finden manche zur Futterstelle und landen dort, andere finden sie nicht und kehren auf geradem Flug wieder zum Stock zurück. Dass ein beträchtlicher Teil der Bienen die Futterstelle nicht findet, unterstreicht nochmals die Tatsache, dass eine Duftlenkung keine sehr große Rolle spielen kann. Die an einer andere Stelle aufgelassenen Bienen kehren ebenfalls an die *Auflassstelle* zurück und führen dort recht systematische Suchflüge durch. Schon nach wenigen solcher kurvenden Suchflüge schlagen sie den direkten Heimflug zum Stock ein. Das ist ein aufregender Befund, weil er zeigt, dass die Bienen über mehrere hundert Meter auf direktem Flug von einer unerwarteten Stelle nach Hause zurückkehren können.

Qu'elles aient été équipées du transpondeur à la sortie de la ruche puis libérées ou qu'elles aient été transportées sur un lieu inattendu, les abeilles recrutées commençaient bien par parcourir environ 200 mètres vers l'est (ill. 6). Ce constat nous a permis de valider la découverte de Karl von Frisch et de ses élèves, lesquels avaient montré par de nombreuses expériences que les abeilles recrutées suivent les informations fournies par la danse. À ce propos, il est important de noter qu'elles s'y conforment même lorsqu'elles ne parcourent pas le même trajet que les danseuses. Il est donc exclu qu'elles suivent des abeilles se rendant au lieu de nourrissage. Cette expérience a également prouvé qu'elles ne s'orientent pas grâce à l'odeur émanant de la source de nourriture puisqu'au lieu de se rendre au point de nourrissage depuis le *lieu où elles ont été libérées*, elles suivent les indications de la danse (200 mètres vers l'est). Il s'agit d'une découverte de première importance, car, régulièrement, des scientifiques avançaient l'hypothèse que les abeilles recrutées sont guidées non pas par les informations de la danse, mais par des traces odorantes.

Toutefois, il est aussi très instructif d'étudier ce que les abeilles font après avoir suivi l'information vectorielle délivrée par la danse. Parmi les abeilles partant de la ruche, certaines trouvent le point de nourrissage et s'y arrêtent, d'autres ne le trouvent pas et retournent en ligne droite à la ruche. Le fait qu'une proportion considérable des abeilles ne trouvent pas le lieu de nourrissage confirme une fois encore que l'orientation par l'odeur ne joue qu'un rôle marginal. Les abeilles transportées sur un lieu autre que la ruche reviennent elles aussi au *lieu de leur relâcher*, d'où elles effectuent systématiquement des vols de repérage. Ces vols de repérage sinueux sont de courte durée et, bientôt, les abeilles regagnent directement la ruche. Cette découverte est passionnante puisqu'elle prouve que les abeilles sont capables de revenir, depuis un lieu inattendu situé à plusieurs centaines de mètres, en vol direct jusqu'à la ruche.

Wie die Abbildung 7 zeigt, fliegen die *Rotationsbienen* wie erwartet nach dem Versetzen an eine unerwartete *Auflassstelle* erst eine Weile in engen Kreisen um die *Auflassstelle* herum. Sie haben ja zum Zeitpunkt des Versetzens in ihrem aktiven Gedächtnis gespeichert, in der Nähe den Stock zu finden, dessen Richtung sie zwar nicht lernen konnten, der aber in 10 m Abstand liegen muss. Nach dieser anfänglichen engen Suchphase schließt sich eine mit weiten Flügen an, bei der häufig auffällige Landmarken angeflogen werden. Bemerkenswert ist, dass solche weiten Suchflüge meist in Richtung des nun entfernt liegenden Stockes ausgerichtet sind. Auch diese weiteren Suchflüge dauern nicht sehr lange verglichen mit der Zeit, die Bienen mit einem gefüllten Kropf voll Nektar fliegen können (>1 Std). Dann schließt sich ein recht gerader und meist auch im schnelleren Flug durchgeführter Rückflug zum Stock an. Dieser Heimflug kann von verschiedenen Stellen ausgehen.

Die *Routenbienen* fliegen nach dem Versetzen erst einmal 200 m nach Westen. Dabei folgen sie also ihrem Vektorgedächtnis, das sie nach dem Vollsaugen an der Futterstelle zum Stock zurückgeführt hätte (Abbildung 7). Meist kehren sie dann an die *Auflassstelle* zurück und schließen erst engere, dann weitere Suchflüge an. Wie die *Rotationsbienen* kehren die *Routenbienen* nach einer Suchphase in direktem und schnellem Flug zum Stock zurück. Zu unserer großen Überraschung tun dies jedoch nicht alle Routenbienen. Etwa ein Drittel von ihnen schlägt auf ihren Heimflügen erst die Richtung zur Futterstelle ein, überquert diese in näherer Umgebung (nur eine Biene landete an der Futterstelle), und folgt dann dem bekannten Weg ihres Routenfluges (Abbildung 8).Wie ich gleich darstellen werde, ist dieses Verhalten besonders aufschlussreich und gibt uns einen Einblick in die Struktur des **Landschaftsgedächtnisses** der Bienen.

Comme décrit dans l'illustration 7, lorsqu'on les libère sur un *lieu* inattendu, les *abeilles à source tournante* commencent bien par effectuer, pendant un certain temps, des cercles rapprochés autour de ce *point*. En effet, avant d'être déplacées, ces abeilles ont enregistré dans leur mémoire active que ce qu'elles cherchent se trouve près de la ruche, dans une direction certes inconnue, mais à moins de 10 mètres de distance. Cette première phase de repérage rapproché fait ensuite place à une phase de vols plus longs, au cours de laquelle, en général, les abeilles se dirigent vers des repères terrestres marquants. Il est intéressant de noter que ces longs vols de repérage s'effectuent la plupart du temps en direction de la ruche, laquelle est loin de l'endroit où elles ont été relâchées. Cette deuxième phase de repérage est elle aussi assez courte, par rapport à la durée pendant laquelle une abeille peut voler avec un jabot gorgé de nectar (plus d'une heure). À cette phase succède un vol plutôt direct, et en général assez rapide, jusqu'à la ruche. Ce vol de retour peut avoir différents points de départ.

Une fois déplacées et libérées, les *abeilles à route* commencent quant à elles par parcourir 200 mètres vers l'ouest. Ce faisant, elles obéissent à leur mémoire vectorielle, laquelle leur aurait permis de rentrer à la ruche une fois le jabot plein (ill. 7). Elles reviennent ensuite la plupart du temps au *lieu de leur relâcher* et effectuent des vols de repérage successifs, d'abord rapprochés, puis plus longs. Tout comme les *abeilles à source tournante*, après ce repérage, les *abeilles à route* regagnent rapidement la ruche par un vol direct. Toutefois, et à notre grande surprise, ce n'est pas le cas de toutes les abeilles à route. Lors de leur vol de retour, environ un tiers d'entre elles prend d'abord la direction du lieu de nourrissage, passe très près de celui-ci (lors de l'expérience, une seule abeille s'y est arrêtée), puis suit ensuite la route qu'il sait être celle de la ruche. Comme nous l'exposerons bientôt, ce comportement est particulièrement instructif, puisqu'il nous donne une idée de la façon dont la **mémoire du paysage** de l'abeille est structurée.

Die Struktur des *Landschaftsgedächtnisses* der Bienen

Den Bienen stehen mehrere Wahrnehmungsleistungen für ihre Navigation im Gelände zur Verfügung. (1) Der Sonnenkompass ist ihnen in seiner Grundstruktur angeboren, aber den am Ort herrschenden Zusammenhang zwischen Tageszeit und Sonnenstand (Sonnenazimutkurve) erlernen sie. Das Muster des linear polarisierten Lichtes kann auch ohne Sicht der Sonne als Orientierungsmarke zur Bestimmung des Sonnenazimuts verwendet werden. (2) Ihr Zeitsinn wird für den Sonnenkompass eingesetzt, aber auch zur Bestimmung von Tageszeiten, an denen eine Nahrungsquelle ein Angebot zur Verfügung stellt. (3) Mithilfe des **Mechanismus der Wegintegration** bestimmen sie neue Flugstrecken, um an einen Ausgangspunkt – wie beispielsweise den Stock – zurückzukehren, wenn sie ihren ersten Ausflug unternehmen.(4) Die visuelle Bestimmung von Flugentfernungen erlaubt ihnen, zusammen mit dem Sonnenkompass Flugvektoren zu bestimmen, die sie auch im Schwänzeltanz mitteilen. (5) Landmarken werden hinsichtlich ihrer Ausrichtung zur Sonnenkompassrichtung und in ihrer Lage zueinander erlernt. (6) Zusätzlich zu all diesen Leistungen, die bereits vor dem Einsatz des harmonischen Radarsystems bekannt waren, fanden wir heraus, dass Bienen auf der Grundlage ihrer Orientierungsflüge in der Lage sind, einen Ort im Gelände so zu bestimmen, dass sie von dort im geraden Flug direkt zum Stock oder zu einer ihnen bekannten Futterstelle zurückkehren können.

Welche Leistungen muss ihr Gehirn erbringen, um diese Orientierungsweisen zu ermöglichen? Man könnte zunächst einmal davon ausgehen, dass die in den Punkten 1 – 5 genannten Leistungen getrennt voneinander erbracht werden. Das könnte beispielsweise so erfolgen, dass sie ein *__Bildgedächtnis__* einsetzen und jedes Mal, wenn sie an einen Ort kommen, den sie ihren Flügen passiert hatten, den damit assoziierten Heimflugvektor aus dem Gedächtnis aufrufen. Dieser Erklärungsansatz folgt der elementaren Argumentation.

La structure de la *mémoire du paysage* chez l'abeille

Les abeilles disposent pour leur navigation spatiale de plusieurs facultés de perception. (1) La boussole solaire est en grande partie innée chez elles, mais elles doivent apprendre à associer le moment de la journée à la position du soleil (courbe représentative de l'azimut solaire en fonction du temps), pour le lieu où elles se trouvent. Le modèle de la polarisation rectiligne de la lumière peut leur servir de repère pour déterminer l'azimut solaire même lorsque le soleil n'est pas visible. (2) Les abeilles se servent de leur notion du temps à la fois pour la boussole solaire et pour déterminer les moments de la journée où il est intéressant de se rendre à une source de nourriture. (3) Grâce au **mécanisme d'intégration de trajet**, elles déterminent de nouveaux trajets pour rejoindre un point de départ – par exemple la ruche – lorsqu'elles se rendent à un lieu pour la première fois. (4) L'estimation visuelle des distances de vol, associée à la boussole solaire, leur permet de déterminer des vecteurs de vol, dont elles transmettent les coordonnées lors de la danse en huit. (5) Les repères terrestres sont mémorisés en fonction de leur orientation par rapport à la direction du soleil et de leur position les uns par rapport aux autres. (6) Outre toutes ces facultés, déjà connues avant l'utilisation du radar harmonique, nous avons découvert que les abeilles sont capables, sur la base de leurs vols d'orientation, de situer un lieu dans leur territoire de façon à pouvoir se rendre directement de celui-ci jusqu'à la ruche ou jusqu'à un lieu de nourrissage connu.

Quels processus à l'œuvre dans leur cerveau permettent de tels modes d'orientation ? On pourrait tout d'abord supposer que les performances décrites aux points 1 à 5 sont réalisées séparément les unes des autres. Ainsi, il serait par exemple possible que les abeilles utilisent une *__mémoire visuelle__* et que, chaque fois qu'elles arrivent à un endroit déjà survolé, elles se remémorent le vecteur de retour qui lui est associé. Cette explication relève de l'approche élémentaire.

Die alternative Betrachtungsweise (kognitive Erklärung) würde annehmen, dass die verschiedenen Leistungen zusammengeführt werden und zu einer integrierten Navigationsleistung führen, die auf einer gemeinsamen Gedächtnisstruktur für alle einzelnen Leistungen basiert. So eine Gedächtnisstruktur würde Bienen dann in die Lage versetzen, den Ort zu bestimmen, an dem sie sich gerade befinden, den Zielort auszuwählen, dessen Lage relativ zu dem *Aufenthaltsort* festzulegen und dann auf kürzestem Wege, also entlang einer neuen Flugstrecke, anzufliegen. Für eine solche integrierte Gedächtnisstruktur hat sich seit E. C. Tolman der Begriff ***kognitive** (oder **mentale**) **Karte*** eingebürgert. Hat das **Landschaftsgedächtnis** der Biene die Struktur einer solchen **kognitiven Karte**? Um sich dieser Frage zu nähern, wollen wir noch einmal kurz betrachten, welche wesentlichen neuen Befunde die Analyse der Flugspuren mit dem harmonischen Radar erbracht haben.

Alle drei Gruppen von Bienen kehren aus verschiedenen Richtungen in geradem Flug zu ihrem Stock zurück (Abbildung 9). Sie tun dies aus großen Entfernungen, was ausschließt, dass sie bei Beginn der Heimflugphase den Stock oder eine Marke in seiner Nähe sehen können. In der Abbildung 9 ist der Abstand eingetragen, von dem aus sie solche Marken hätten sehen können (Radius 60 m).Wir haben diesen Abstand einerseits nach der visuellen Auflösung des Bienenauges berechnet und andererseits aus unseren Befunden entnommen, die uns zeigten, aus welchen Entfernungen sie Landmarken anfliegen.

Die einzigen Informationen, die den Bienen zur Verfügung standen, waren also die, die sie während der Orientierungsflüge sammeln konnten, denn unsere Versuchsbienen haben entweder an einer von uns kontrollierten Futterstelle gesammelt (*Rotationsbienen, Routenbienen*), oder sie haben keine Futterstelle angeflogen (*rekrutierte Bienen*).

Die bisher genannten Navigationsleistungen könnten auch von einem umfangreichen **Bildgedächtnis** geleistet werden. Dieses würden die Bienen während der Orientierungsflüge aus der Sicht auf viele Landmarken aufbauen und mit dem möglichen kürzesten Heimflugvektor aus dem **Wegintegrationsmechanismus** abspeichern.

D'après un point de vue alternatif (explication cognitiviste), ces différentes performances seraient réunies et donneraient naissance à un système de navigation intégré, fondé sur une structure de mémoire commune à toutes ces performances. Si elles disposaient d'une telle structure de mémoire, les abeilles seraient capables de déterminer le lieu où elles se trouvent, de choisir leur destination, d'estimer la *position* de celle-ci par rapport à la leur et de s'y rendre ensuite par le chemin le plus court, c'est-à-dire en suivant un itinéraire inconnu. Pour décrire une telle structure de mémoire intégrée, le terme de ***carte cognitive*** (ou mentale) inventé par E.C. Tolman s'est peu à peu imposé. La **mémoire du paysage** de l'abeille a-t-elle pour structure une telle **carte cognitive** ? Pour tenter de répondre à cette question, nous reviendrons brièvement sur les découvertes essentielles apportées par l'analyse du trajet des abeilles grâce au radar harmonique.

Nos trois groupes d'abeilles reviennent, depuis des directions différentes, en vol direct à la ruche (ill. 9), et ce, depuis des lieux très éloignés. Il est donc impossible que les abeilles voient, au début de leur trajet, la ruche ou une marque distinctive à proximité de celle-ci. Sur l'illustration 9 est indiquée la distance à partir de laquelle elles auraient pu voir une telle marque (rayon de 60 m). Cette distance a été calculée, d'une part, à partir du pouvoir de séparation de l'œil de l'abeille, et d'autre part, à partir de nos observations de la distance à partir de laquelle les abeilles se dirigent vers un repère terrestre.

Les seules informations dont disposaient les abeilles étaient donc celles qu'elles avaient collectées lors de leurs vols d'orientation. En effet, les abeilles de notre expérience avaient soit butiné à un lieu de nourrissage dont nous avions le contrôle (*abeilles à source tournante* et *abeilles à route*), soit ne s'étaient pas rendues à un lieu de nourrissage (*abeilles recrutées*).

Les capacités de navigation évoquées jusqu'à présent pourraient aussi être le fruit d'une **mémoire visuelle** poussée. Celle-ci serait constituée, lors des vols d'orientation, à partir de nombreux repères terrestres visualisés par les abeilles, lesquels seraient associés au vecteur de retour le plus court possible grâce au **mécanisme d'intégration de trajet**.

Unser Befund aber, wonach *Routenbienen* nicht nur den Stock ansteuern, sondern auch die gelernte Futterstelle, schließt eine solche Erklärung aus. Niemals vorher wurde die Futterstelle anders als vom Stock aus angeflogen. Es gibt also keine aus der **Wegintegration** entnehmbaren Flugvektoren zu der Futterstelle. Auch die **Bildgedächtnisse**, von denen oben die Rede war, beziehen sich nur auf solche, die zum Stock zurückführen. Wenn also auch die Futterstelle aus verschiedenen Richtungen angesteuert werden kann, muss eine zusätzliche Navigationsleistung erbracht worden sein.

Formal könnte man die Bestimmung des Fluges zur Futterstelle als eine Verrechnung von zwei Vektoren betrachten, dem aus dem **Bildgedächtnis** aufgerufenen Heimflugvektor zum Stock und dem Hinflugvektor vom Stock zur Futterstelle (Abbildung 10). In gleicher Weise wäre vorstellbar, dass die Biene eine **kognitive Karte** einsetzt, ihr Navigationsgedächtnis also die Struktur einer geometrischen Repräsentation von Landmarken und deren Bezügen aufweist. Mindestens drei Orte (*Aufenthaltsort*, Stock, Futterstelle) müssten dann in ihrer relativen Lage zueinander in ihrem Gedächtnis niedergelegt sein. Diese Orte könnten auch durch geländespezifische Marken mit langer Reichweite (Begrenzungen von Arealen, Spuren im Gelände, eventuell das Erdmagnetfeld oder seine Anomalien in der Gegend) gekennzeichnet sein, die den Bienen eine Art überkreuzendes Gitterraster zur Ortsbestimmung bieten. Die Redundanzen, die sich aus einem solchen System ergäben, könnten durch **Bildgedächtnisse** ausgeschlossen werden.

Zwischen diesen Interpretationsmöglichkeiten kann noch nicht entschieden werden. Formal sind alle Interpretationen nicht sehr verschieden, denn sowohl die Berechnung einer Dreiecksbeziehung aus Vektoren als auch aus einem kreuzenden Gitterraster von Marken mit langer Reichweite führt zu Ortsbestimmungen.

Toutefois, notre découverte, selon laquelle les *abeilles à route* ne prennent pas uniquement la direction de la ruche, mais également celle du lieu de nourrissage où elles ont appris à se rendre, exclut une telle explication. Jamais les abeilles n'ont rejoint le lieu de nourrissage depuis un autre lieu que la ruche. Elles ne disposent donc d'aucun vecteur issu de l'**intégration de trajet** pour le lieu de nourrissage. Même la **mémoire visuelle** évoquée plus haut n'utilise que des vecteurs pointant vers la ruche. Par conséquent, si les abeilles sont aussi capables de se rendre au lieu de nourrissage depuis différentes directions, c'est qu'elles disposent d'une capacité de navigation supplémentaire.

En théorie, on pourrait considérer que la détermination du trajet jusqu'au lieu de nourrissage résulte de l'addition de deux vecteurs : le vecteur de retour à la ruche issu de la **mémoire visuelle** et le vecteur correspondant au trajet de la ruche jusqu'au lieu de nourrissage (ill. 10). Mais on pourrait également supposer que l'abeille fait appel à une **carte cognitive**, c'est-à-dire que la mémoire utilisée pour la navigation prendrait la forme d'une représentation géométrique des repères terrestres et de leurs relations spatiales. Dans ce cas, au moins trois lieux (*lieu actuel*, ruche et lieu de nourrissage), ainsi que leur position relative, devraient être stockés en mémoire. Ces lieux pourraient également être repérés par d'autres marques spatiales à plus grande échelle (limites de parcelles, traces dans le paysage, éventuellement le champ magnétique terrestre ou ses anomalies locales), ce qui permettrait à l'abeille de disposer d'une sorte de trame quadrillée pour localiser un lieu. Les redondances engendrées par un tel système pourraient être supprimées grâce à la **mémoire visuelle.**

Il n'est pas encore possible de savoir laquelle de ces deux interprétations est la bonne. En théorie, ces interprétations sont assez proches puisque la localisation peut résulter tant de la détermination d'un triangle de vecteurs que d'une trame quadrillée de repères à grande échelle.

Lernen, Gedächtnis, Erwarten und Entscheiden

Die Navigationsleistungen der Biene sind mit einer großen Zahl von Lernvorgängen verbunden. An einer Futterstelle lernt sie deren Signale (Farbe, Duft, Gestalt, Ergiebigkeit, Zeitpunkt der Produktivität, *Manipulierbarkeit*). Auch am Stock lernt sie die Farbe, den Duft, die Form, die relative Lage zu benachbarten Landmarken des Eingangs, und natürlich erlernt sie den Duft ihrer Stockgenossinnen, um sie von Bienen anderer Völker zu unterscheiden. Zur Navigation erlernt sie Komponenten des Himmelskompasses und möglicherweise auch Eigenschaften des Erdmagnetfeldes.

Alle diese Lernvorgänge führen zu **Gedächtnisspuren**, die wieder aufgerufen werden können, wenn sie für Entscheidungen benötigt werden. Dabei gibt es zwei Arten von Entscheidungen: So können die Signale im unmittelbaren Bezug zu den Entscheidungsvorgängen auftreten, so beispielsweise, wenn eine Biene zwischen verschiedenfarbigen Blumen zu unterscheiden hat, und dann die Farbe wählt, bei der sie belohnt wurde.

In der Nähe des Stockes wird sie den Stockgeruch ihres Volkes wählen und nicht den eines anderen Volkes. Solche Entscheidungen beruhen auf **assoziativen Gedächtnissen**, also solchen, die durch Lernvorgänge entstanden sind, bei denen Signale mit Belohnung verknüpft (assoziiert) wurden. Auf Grund der Assoziationen rufen die Signale Erwartungen hervor (Futterbelohnung, eigenes Volk), und je nach Motivationslage (Futtersammeln, Heimkehrstimmung) führt das Tier eine Handlung aus.

Apprentissage, mémoire, attentes et prise de décision

Les capacités de navigation de l'abeille sont liées à un grand nombre de processus d'apprentissage. Arrivée à une source de nourriture, elle en assimile les signaux caractéristiques (couleur, odeur, forme, rendement, horaires de productivité, *accessibilité*). Elle mémorise également la couleur, l'odeur et la forme de la ruche, ainsi que sa position par rapport aux repères terrestres proches de l'entrée de la ruche et, bien sûr, elle apprend l'odeur de ses congénères afin de pouvoir les différencier des abeilles d'une autre colonie. Dans le cadre de la navigation, elle apprend les composants de la boussole solaire, voire les propriétés du champ magnétique terrestre.

Tous ces processus d'apprentissage créent des **traces mnésiques**, qui peuvent être ravivées si elles sont nécessaires à une prise de décision. Il existe deux types de prise de décision : tout d'abord, certains signaux sont directement liés aux processus de décision, notamment lorsqu'une abeille doit différencier des fleurs de couleurs différentes et qu'elle choisit la couleur pour laquelle elle était récompensée auparavant.

À proximité de ruches, elle optera pour la ruche dont l'odeur correspond à celle de sa colonie et non à celle d'une autre. De telles décisions reposent sur une **mémoire associative**, c'est-à-dire formée à la suite d'un apprentissage par association entre des signaux et une récompense. En raison de cette association, les signaux suscitent une attente (récompense alimentaire, retrouvailles avec la colonie) et, en fonction de ses motivations (collecte de nourriture, motivation pour rentrer à la ruche), l'animal exécutera l'action correspondante.

Beobachtendes Lernen (auch ***latentes Lernen**** genannt), wie es bei der Navigation im Gelände im Vordergrund steht, führt zu Gedächtnisformen, die sich von einem **assoziativen Gedächtnis** unterscheiden. Hier wirken Komplexe von Signalen, die im Zusammenhang und relativ zueinander erlernt werden. Wenn in diesem Fall Assoziationen gebildet werden, dann nicht mit äußeren bewertenden Signalen (Belohnung), sondern mit inneren Zuständen wie etwa der Motivation (Erkundungsverhalten, Suchen) und Messgrößen, die aus dem Verhalten selbst erwachsen (Richtungsmaß und Entfernungsmaß für die **Wegintegration**, Beobachtung des Landschaftsbildes, *Tiefeninformation* aus der *Bewegungsparalaxe*, also der scheinbar schnelleren Bewegung von nahen Objekten und der langsameren von fernen, wenn das Tier oder der Mensch sich im Raum bewegen). Es ist vorstellbar und durch vielfältige Ergebnisse an anderen Tieren belegt, dass beobachtendes Lernen zu einer Gedächtnisstruktur führt, auf deren Grundlage Entscheidungen für zu erwartende und nicht gerade aktuell wahrgenommene Signale ermöglicht werden. Eine **kognitive Karte** hätte eine solche Gedächtnisstruktur.

L'***apprentissage latent***, qui est l'apprentissage dominant dans le cadre de la navigation dans l'espace, engendre des formes de mémoire qui diffèrent de la **mémoire associative**. Elles font intervenir des complexes de signaux appris ensemble et les uns par rapport aux autres. Dans ce cas, s'il y a formation d'associations, ces dernières ne sont pas dues à des signaux externes (récompense), mais à des états internes comme la motivation (comportement d'exploration, quête) et à des grandeurs de mesure qui dépendent du comportement (direction et distance pour l'**intégration de trajet**, observation du paysage, *informations sur la profondeur* issues de la *parallaxe de mouvement*, c'est-à-dire l'impression que les objets proches défilent plus vite que les objets lointains lorsque l'animal ou l'homme se déplace). Il est possible, et de multiples expériences réalisées sur d'autres animaux le prouvent, que l'**apprentissage latent** génère une structure de mémoire permettant la prise de décision pour des signaux attendus mais encore inaperçus. Une **carte cognitive** aurait ce type de structure de mémoire.

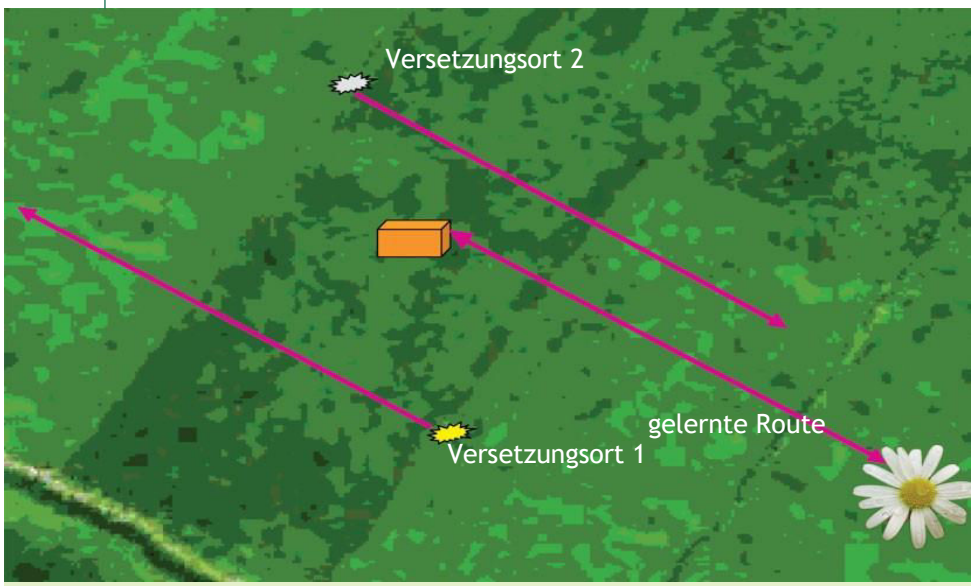
Von „entscheiden“ spricht man sinnvollerweise nur, wenn mehr als eine Option zur Verhaltenssteuerung zur Verfügung steht. Solche Optionen müssten im Navigationskontext erwartete Konsequenzen der Verhaltensweisen sein, also etwa: führt diese oder eine andere Entscheidung zu dem Erfüllen der Motivationslage? Wir haben mit der Beobachtung, dass die *Routenbienen* entweder direkt zum Stock zurückfliegen oder den Umweg über die Futterstelle nehmen, einen Hinweis auf Entscheidungen zwischen zwei Optionen erhalten. Es ist schwer vorstellbar, dass diese nicht auf der Grundlage einer **kognitiven Karte** getroffen werden. Nun könnte man einwenden, dass ein kleines Insekt wie die Honigbiene mit ihrem winzigen Gehirn (1 mm^3, ca. 1 Million Neurone) wohl kaum in der Lage sein wird, eine Gedächtnisstruktur in Form einer **kognitiven Karte** zu bilden und mit Bezug auf dieses Gedächtnis Entscheidungen zu fällen. Wenn wir so argumentieren, nehmen wir für uns in Anspruch zu wissen, was eine einfache und was eine schwierige Aufgabe für ein kleines Gehirn ist. Ein solcher Anspruch ist unbegründet. Es könnte sehr wohl sein, dass beobachtendes Lernen höchst ökonomisch für das Nervensystem zu einer kartenartigen Repräsentation führt.

[…]

À juste titre, on ne parle de « décision » que lorsque plus d'une option permet d'orienter le comportement. Dans le contexte de la navigation, ces options seraient les conséquences escomptées d'un type de comportement : est-ce cette décision, ou bien une autre, qui permettra de réaliser l'action souhaitée ? Le fait que les *abeilles à route* choisissent soit de rentrer directement à la ruche, soit de faire un détour par le lieu de nourrissage semble indiquer qu'elles prennent une décision en fonction de deux options. On peut difficilement imaginer qu'une telle décision soit prise sans s'appuyer sur une **carte cognitive**. Toutefois, on pourrait objecter qu'un insecte tel que l'abeille mellifère, avec son minuscule cerveau (1 mm^3, environ 1 million de neurones), est bien incapable de former une structure de mémoire telle que la **carte cognitive** et de prendre des décisions en relation avec cette mémoire. Or, en argumentant ainsi, on prétend savoir à quoi correspond une tâche simple ou complexe pour un petit cerveau. Une telle affirmation est sans fondement. Il est tout à fait possible qu'un **apprentissage latent**, extrêmement économique pour le système nerveux, aboutisse à une représentation de type carte.

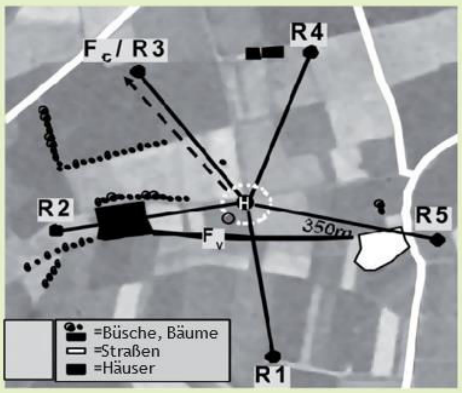
[…]

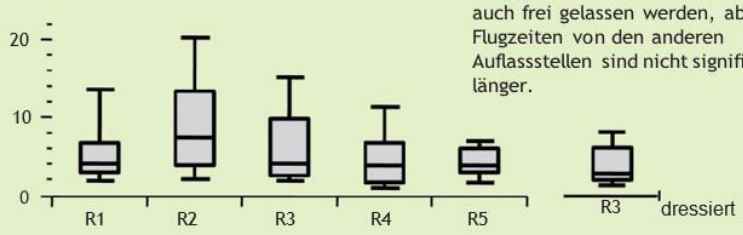
ABB. 2



Versetzt man Bienen im Moment des Abfluges von einer Futterstelle an eine andere Stelle (Versetzungsort 1), dann schlagen sie die Richtung ein, die sie von der Futterstelle zum Stock gebracht hätte. Versetzt man sie im Moment des Abfliegens vom Stock zu einer Futterstelle an einen anderen Ort (Versetzungsort 2), dann schlagen sie eine Abflugrichtung ein, die der Kompassrichtung entspricht, die am Stock richtig gewesen wäre.

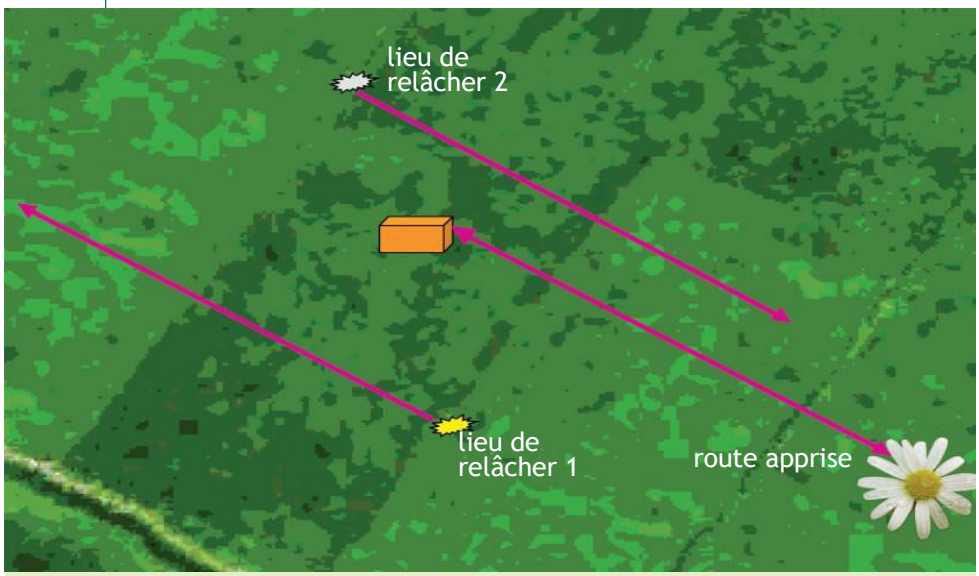
ABB. 3 KURZE FLUGZEITEN TROTZ NEUER UMGEBUNG





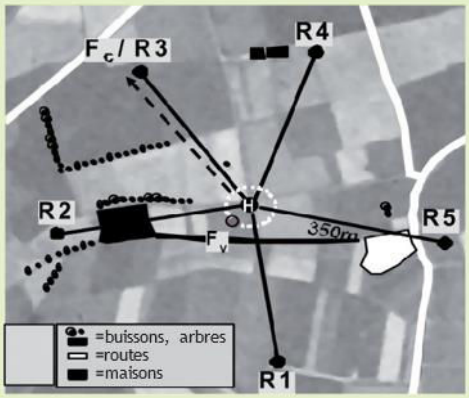
Die Flugzeit von Bienen, die an einer von fünf verschiedenen Stellen rund um den Stock in 350 m Entfernung (R1 bis R5) aufgelassen wurden. Die so untersuchten Bienen wurden vorher entweder auf eine 350 m entfernte Futterstelle an Fc/R3 dressiert, oder sie wurden auf eine Futterstelle dressiert, die in der Nähe des Stockes (10 m Entfernung) um den Stock he- rum wanderte (Fv, gestrichelter weißer Kreis). Alle Bienen kehren innerhalb recht kurzer Zeit von allen fünf Auflassstellen zum Stock zurück (Diagramm unten). Die kürzeste Flugzeit findet man für Bienen, die an Fc/R3 dressiert wurden und dort auch frei gelassen werden, aber die Flugzeiten von den anderen Auflassstellen sind nicht signifikant länger.

ILL. 2



Si on capture des abeilles au moment de leur départ d'un lieu de butinage et qu'on les libère ailleurs (lieu de relâcher 1), elles suivent la direction qu'elles auraient prise pour se rendre à la ruche depuis le lieu de butinage. Si on les déplace sur un autre lieu au moment de leur départ de la ruche (lieu de relâcher 2), elles prennent la direction correspondant à celle, indiquée par leur boussole solaire, qui aurait été la bonne depuis la ruche.

ILL. 3 UN TEMPS DE VOL RÉDUIT MALGRÉ UN ENVIRONNEMENT INCONNU



Temps de vol d'abeilles relâchées en un des cinq lieux situés à 350 m autour de la ruche (R1 à R5). Les abeilles de l'expérience ont été préalablement dressées soit à un lieu de nourrissage situé à 350 m (Fc/R3), soit à un lieu de nourrissage situé à proximité de la ruche (10 m) et tournant autour de celle-ci (Fv, cercle en pointillé blanc). Toutes les abeilles reviennent très rapidement à la ruche, qu'importe le lieu où elles ont été libérées (diagramme ci-dessous). Ce sont les abeilles dressées à Fc/R3 et libérées ensuite sur ce lieu qui ont le temps de vol le plus court, mais celui des autres abeilles n'est pas significativement plus long.

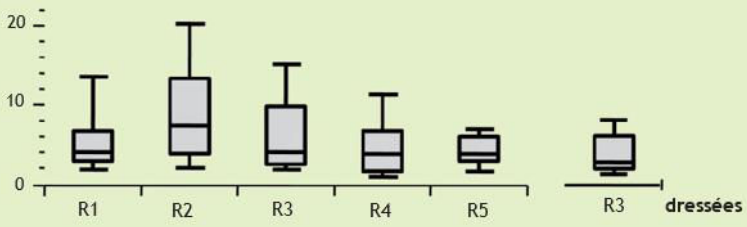
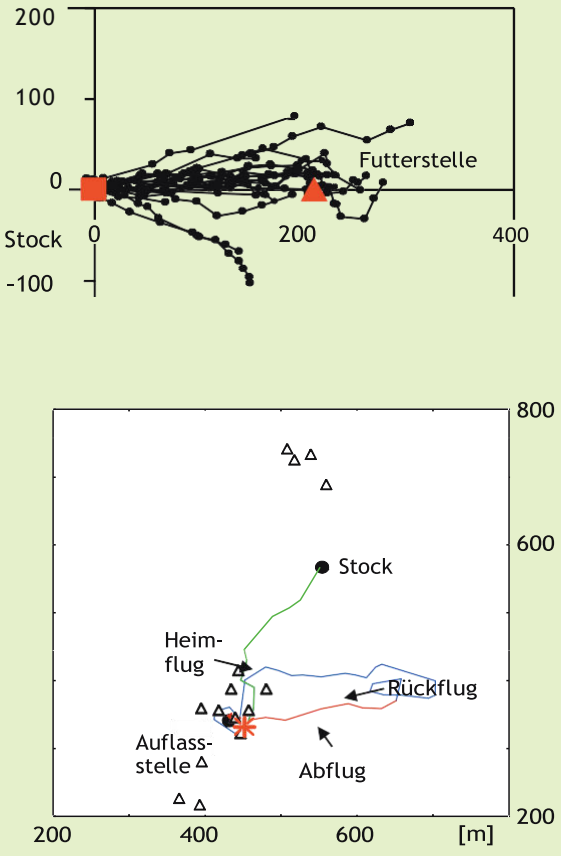




ABB. 5 Blick in einen Beobachtungsstock (links) und an eine Futterstelle (rechts). Die Bienen sind mit farbigen Nummernschildchen individuell markiert.

ABB. 6 REKRUTIERTE BIENEN FOLGEN DER TÄNZERIN



Obere Abbildung: Flugspuren von Bienen, die von einer tanzenden Bienen zum Ausflug rekrutiert wurden und am Stockausgang mit einem Transponder versehen wurden. Die Bienen fliegen recht genau nach der Vektoranweisung der Tänzerin 200 m nach Osten.

Untere Abbildung: Flugspur einer rekrutierten Biene, die nach dem Folgen des Tanzes am Stockausgang abgefangen, mit einem Transponder ausgestattet und dann ca. 300 m nach Süden zu einer Auflassstelle transportiert wurde. Sie fliegt erst 200 m nach Osten (rote Linie), nach wenigen Kurvenflügen kehrt sie an die Auflassstelle zurück, wo sie ebenfalls nur wenige Kurvenflüge macht (blaue Linie) um dann auf recht direktem Flug zum Stock zurückzukehren (grüne Linie). Die Skalen an den Rändern des Quadrates geben die Entfernungen in m an.

Die Dreiecke markieren Zelte als Landmarken.



ILL. 5 Aperçu de l'intérieur d'une ruche d'observation (à gauche) et d'un lieu de nourrissage (à droite). Chaque abeille est marquée à l'aide d'une pastille numérotée.

ILL. 6 LES ABEILLES RECRUTÉES SUIVENT LA DANSEUSE

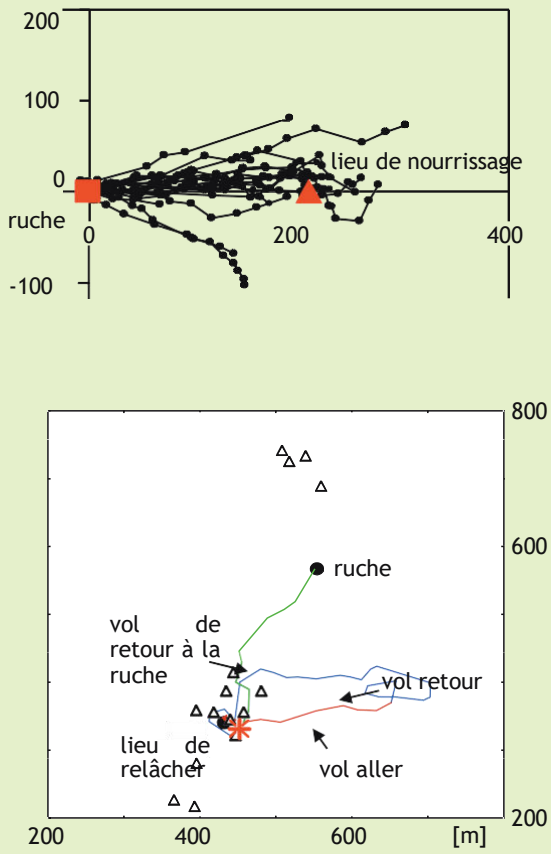
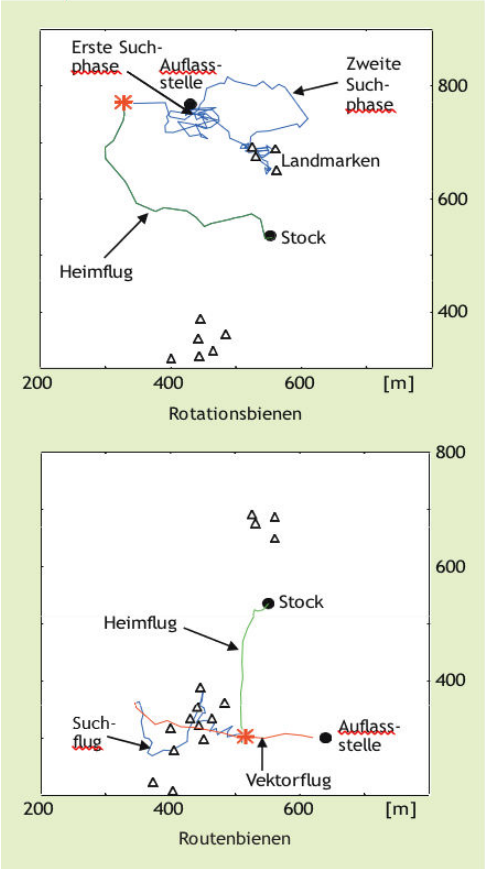


Illustration du haut : trajet d'abeilles recrutées par une danseuse et équipées d'un transpondeur à leur sortie de la ruche. Les abeilles suivent précisément les indications vectorielles de la danseuse et se rendent à 200 m à l'est.

Illustration du bas : trajet d'une abeille recrutée, capturée à sa sortie de la ruche après avoir suivi la danse, équipée d'un transpondeur, puis relâchée à environ 300 m au sud de la ruche. Elle se rend d'abord à 200 m à l'est (ligne rouge), puis, après quelques vols sinueux, elle retourne au lieu de relâcher, où elle effectue également quelques vols sinueux (ligne bleue), avant de regagner en vol direct la ruche (ligne verte). Les chiffres sur les bords du cadre indiquent la distance en mètres.

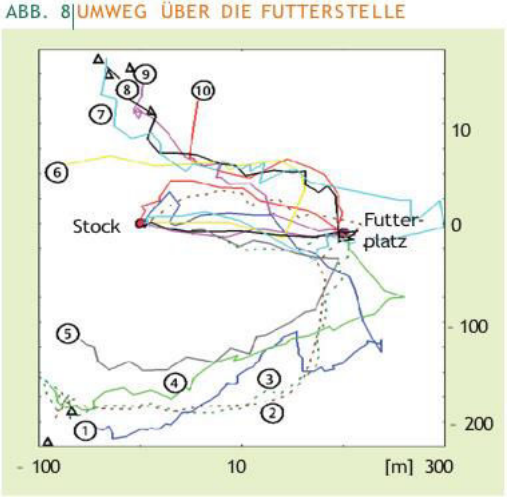
Les triangles signalent la présence de tentes comme repères terrestres.

ABB. 7 FLUGSPUREN EINER ROTATIONSBIENE UND EINER ROUTENBIENE



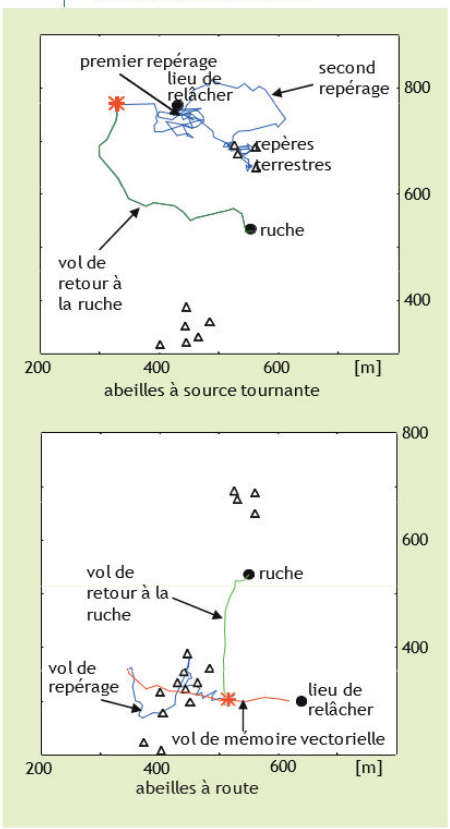
Die Rotationsbiene wurde an einer nördlich vom Stock liegenden Stelle aufgelassen, die Routenbiene an einer südlich vom Stock liegenden Stelle. Wie in Abbildung 6 ist der anfängliche Vektorflug der Routenbiene rot markiert, die Suchflüge blau und die Heimflüge grün.

ABB. 8 UMWEG ÜBER DIE FUTTERSTELLE



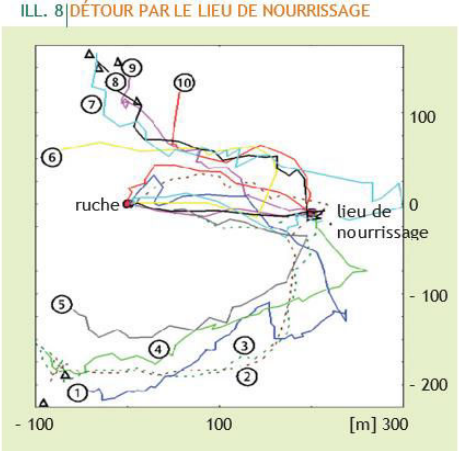
Heimflüge von zehn Routenbienen, die nicht direkt zum Stock zurückfliegen, sondern zuerst die Futterstelle (200 m östlich des Stockes) ansteuern, um dann entlang der gelernten Route zum Stock zu fliegen. Die Bienen Nr. 1–5 wurden südlich vom Stock aufgelassen, die mit den Nr. 6–10 nördlich des Stockes.

ILL. 7 TRAJETS D'UNE ABEILLE À SOURCE TOURNANTE ET D'UNE ABEILLE À ROUTE



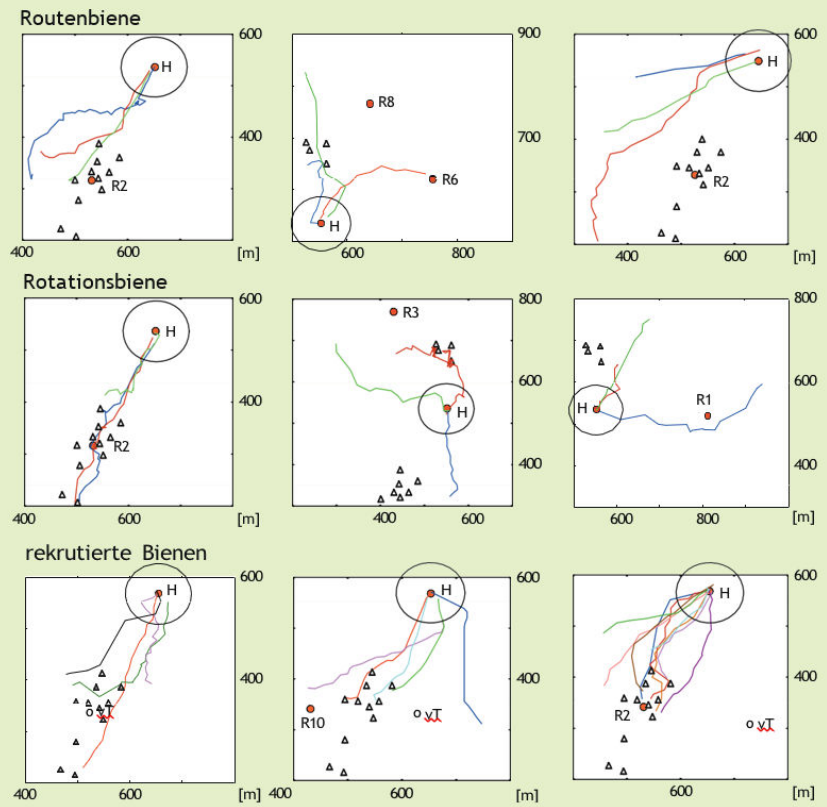
L'abeille à source tournante a été libérée sur un lieu situé au nord de la ruche, l'abeille à route sur un lieu situé au sud de la ruche. Comme dans l'illustration 6, le premier vol de l'abeille à route, qui suit sa mémoire vectorielle, est représenté en rouge, les vols de repérage sont en bleu et les vols de retour à la ruche en vert.

ILL. 8 DÉTOUR PAR LE LIEU DE NOURRISSAGE



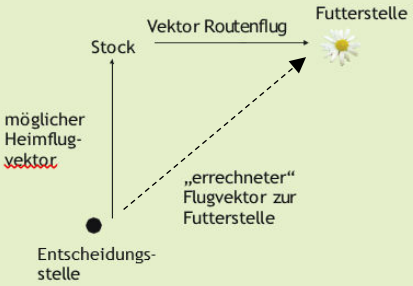
Vols de retour à la ruche de dix abeilles à route, lesquelles ne rentrent pas directement à la ruche, mais se dirigent d'abord vers le lieu de nourrissage (situé à 200 m à l'est de la ruche), avant de suivre la route apprise jusqu'à la ruche. Les abeilles numérotées 1 à 5 ont été relâchées au sud de la ruche, les abeilles 6 à 10 eu nord de celle-ci.

ABB. 9 HEIMFLÜGE VON ROUTENBIENEN, ROTATIONSBIENEN UND REKRUTIERTEN BIENEN



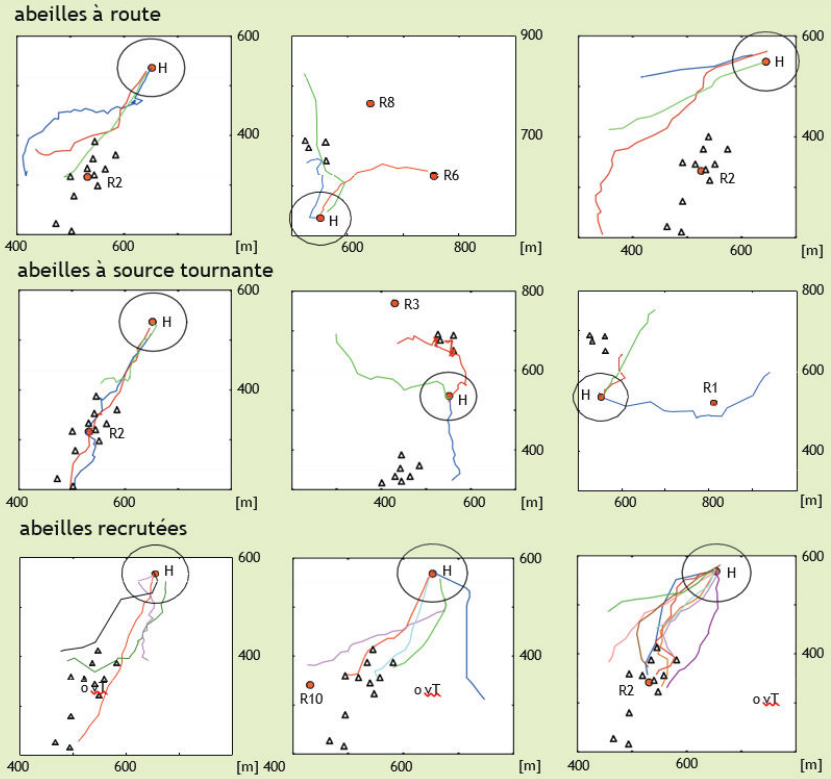
Die Bienen wurden entweder nördlich oder südlich vom Stock aufgelassen. Die jeweilige Auflassstelle ist in den Abbildungen mit „R" angegeben. Der Kreis um den Stock (H) markiert den Bereich, innerhalb dessen die Bienen den Stock sehen können. Es ist deutlich zu sehen, dass die direkten und schnellen Heimflüge aus vielen Richtungen und über Entfernungen weit außerhalb der Sichtweite des Stockes erfolgen. Die kleinen Dreiecke geben wieder die Landmarken (Zelte) an.

ABB. 10 ERRECHNEN BIENEN DEN DIREKTEN WEG ZUM STOCK?



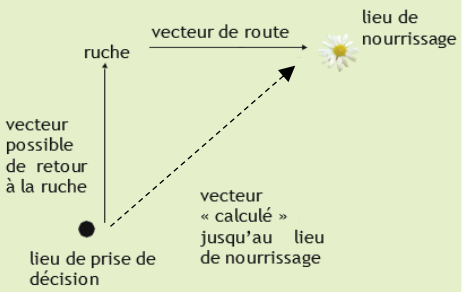
Eine mögliche Erklärung für die Flüge von Routenbienen zu ihrer Futterstelle geht von einer Vektorintegration aus. Dabei wird angenommen, dass die Bienen an einer Entscheidungsstelle aus dem Gedächtnis den Heimflugvektor zum Stock aufrufen und gleichzeitig den Flugvektor vom Stock zu ihrer Futterstelle aktivieren. Diese beiden nun in einem aktiven Gedächtnis vorliegenden Vektorgedächtnisse könnten so verrechnet werden, dass die Bienen einen Flug direkt zur Futterstelle verfolgen („errechneter" Flugvektor).

ILL. 9 VOLS DE RETOUR À LA RUCHE DES ABEILLES À ROUTE, À SOURCE TOURNANTE ET RECRUTÉES



Les abeilles ont été relâchées soit au nord, soit au sud de la ruche. Le lieu de relâcher est indiqué par la lettre « R ». Le cercle entourant la ruche (H) correspond à la zone dans laquelle les abeilles voient la ruche. On constate que les abeilles regagnent la ruche en vol direct et rapide depuis diverses directions et depuis des lieux situés bien au-delà de la zone de visibilité de la ruche. Encore une fois, les petits triangles signalent les repères terrestres (tentes).

ILL. 10 LES ABEILLES CALCULENT-ELLES LE TRAJET DIRECT JUSQU'À LA RUCHE ?



Une explication possible aux trajets des abeilles à route jusqu'au lieu de nourrissage est l'intégration vectorielle. On suppose qu'en un lieu de prise de décision, les abeilles se remémorent à la fois le vecteur de retour à la ruche et le vecteur de la route ruche-lieu de nourrissage. Ces deux vecteurs mémorisés, désormais présents dans la mémoire active des abeilles, sont additionnés, de sorte que les insectes peuvent se rendre directement au lieu de nourrissage (vecteur « calculé »).

STRATÉGIE DE TRADUCTION

Avertissement au lecteur

Par souci de cohérence, comme pour la partie « Exposé », les références des sources et travaux cités ne se trouvent pas en note de bas de page, mais sont indiquées, sous leur forme abrégée, dans le corps du texte. Les références complètes sont listées dans la partie « Bibliographie ».

Les numéros de page indiqués correspondent aux occurrences dans le texte source des termes et expressions commentés.

I. Introduction

Ma fascination pour les abeilles a commencé avec ma lecture du livre *Vie et mœurs des abeilles* de Karl von Frisch. J'aurais aimé pouvoir utiliser ce livre comme texte-support de mon mémoire, malheureusement il a déjà été traduit en français d'une part (c'est d'ailleurs grâce à sa traduction française que je l'ai découvert), et il s'agit, d'autre part, d'un texte de vulgarisation. Je voulais malgré tout consacrer mon mémoire aux abeilles et j'ai donc cherché d'autres ouvrages, en allemand, qui pourraient convenir. C'est ainsi que j'ai découvert les écrits de Monsieur Menzel, qui est pour moi un peu le Karl von Frisch du XXI^{e} siècle. Je me suis procuré son dernier livre, *Die Intelligenz der Bienen* (« L'Intelligence des abeilles », non traduit), mais il s'agit une fois encore d'un texte de vulgarisation et je ne pouvais donc pas l'utiliser pour mon mémoire. J'ai poursuivi mes recherches afin de trouver un texte allemand pouvant convenir. Malheureusement, dans le domaine scientifique, la plupart des ouvrages sont en anglais. J'ai donc fini par écrire à Monsieur Menzel pour lui expliquer mon problème. Il a répondu très rapidement et m'a envoyé plusieurs articles rédigés en allemand, mais ceux-ci étaient trop courts pour servir de texte-support. Je commençais à perdre espoir lorsque j'ai finalement déniché, en faisant des recherches sur Internet, un article de Monsieur Menzel paru en février 2009 dans le 39^{e} volume de la revue scientifique *Biologie in unserer Zeit*. Cet article, intitulé « Das Landschaftsgedächtnis der Bienen. Kleine Gehirne – überraschendes Orientierungsvermögen », porte sur la navigation des abeilles mellifères et, plus précisément, sur le type de mémoire impliqué dans cette navigation. Il était un peu trop long, mais une partie du texte pouvait être supprimée sans nuire à la compréhension. En outre, je trouvais le sujet vraiment intéressant. J'ai donc envoyé l'article à mon directeur de mémoire, Monsieur Philippe Mothe, pour savoir ce qu'il en pensait. Après qu'il eut approuvé mon choix, je me suis attelée à la rédaction de mon mémoire.

II. Problèmes pratiques

La première difficulté à laquelle j'ai été confrontée lors de la traduction était d'ordre pratique : l'article n'était disponible qu'au format PDF. Or, pour pouvoir supprimer certains passages, ainsi que les illustrations, il me fallait un format modifiable. J'ai dû convertir le document au format Word, ce qui a entraîné quelques problèmes de mise en page. Par exemple, l'article original était structuré en colonnes et je n'arrivais pas à les supprimer une fois le document converti. Il m'a donc fallu copier, passage par passage, le texte source pour le coller ensuite dans un second document Word. Les coupures de mots de l'article original étaient également conservées dans le document converti. J'ai donc dû supprimer tous les tirets qui coupaient des mots en deux.

La suppression des illustrations et de leurs légendes a également nécessité des modifications. J'avais en effet d'abord traduit les références aux illustrations dans le texte source, même si elles étaient absentes de mon texte-support. Monsieur Mothe m'a conseillé de supprimer ces références de ma traduction. Lorsque j'ai voulu le faire, le problème suivant s'est posé à moi : je pouvais soit supprimer les références aux illustrations dans le texte-support, soit conserver ces références et ne pas les traduire, en le mentionnant néanmoins dans l'avertissement au lecteur. J'ai tout d'abord essayé de les supprimer du texte-support, mais cela demandait des modifications conséquentes du texte, et j'ai donc préféré demander conseil à mon directeur de mémoire. Il m'a encouragée à traduire certaines illustrations afin de faciliter la compréhension du texte par un lecteur néophyte. J'ai donc copié les illustrations et les légendes du document Word pour les coller dans un autre document, avant de les traduire dans SDL Trados Studio. J'ai alors constaté que la dernière illustration, celle contenant des flèches, avait été modifiée lors de la conversion du document PDF en document Word (la flèche en pointillés devenait verticale). Je suis parvenue à résoudre ce problème lors du regroupement des différentes parties de mon mémoire, car j'ai réalisé des captures d'écran des illustrations afin de les ajouter au document assemblé. Je n'ai donc eu qu'à retravailler l'illustration problématique dans Gimp pour supprimer la flèche verticale et la remplacer par une flèche en diagonale.

III. Problèmes terminologiques

- « *Routenbienen* », « *Rotationsbienen* » (p. 54) :

Certains termes du texte source ont présenté des difficultés lors de la traduction. En effet, l'allemand est une langue qui facilite la création de néologismes : il suffit d'assembler plusieurs mots pour former un mot nouveau. Monsieur Menzel a eu recours à ce procédé pour la dénomination de deux des trois groupes d'abeilles évoqués, « *Routenbienen* » et « *Rotationsbienen* ». L'auteur avait lui-même mis les termes en italique, afin de souligner qu'il s'agissait de néologismes, ce qui m'a évité des recherches inutiles. J'ai décidé de créer moi aussi des mots nouveaux, ou plutôt des expressions nouvelles, afin de rendre ces néologismes en français. Pour « *Routenbienen* », j'ai opté pour « *abeilles à route* », une expression qui a l'avantage d'être courte et de rendre assez bien l'allemand sans pour autant paraître étrange en français.

J'ai eu beaucoup plus de mal à traduire le second néologisme. En effet, je voulais au départ recourir à une structure similaire, mais « *abeilles à rotation* » me semblait peu intelligible, malgré l'explication donnée dans le texte. Je me suis alors appuyée sur cette explication pour désigner de façon plus claire ce groupe d'abeilles. Le résultat, « *abeilles à source tournante* », est certes beaucoup plus long que le terme allemand, mais il rend, à mon avis, le sens de ce dernier.

- « Landschaftsgedächtnis », « Raumgedächtnis » (p. 44) :

J'ai également éprouvé de la difficulté à déterminer si certains mots employés par l'auteur étaient des termes ou de simples néologismes. Par exemple, « Landschaftsgedächtnis » ne semble pas être très employé en allemand dans le domaine de l'apidologie : lorsqu'on cherche ce mot associé au mot « Bienen » sur Google, on n'obtient que 220 résultats (recherche effectuée pour la dernière fois le 18 mars 2019) et la plupart des sources trouvées sont soit des

textes de Monsieur Menzel, soit des ouvrages qui le citent. En outre, il ne semble exister aucune définition de ce mot, qui est probablement un calque de l'anglais « landscape memory ». La recherche des traductions littérales en français « mémoire paysagère » ou « mémoire du paysage » donne certes quelques résultats, mais soit les sources ne sont pas fiables, soit le terme se rapporte à un autre domaine (géographie). J'ai donc d'abord choisi de traduire ce terme par « mémoire spatiale », en considérant qu'il s'agissait d'un synonyme de « Raumgedächtnis », terme employé dans le chapô. Néanmoins, en relisant ma traduction, j'ai eu un doute quant à la synonymie de ces deux termes, d'autant plus que j'avais trouvé un article en anglais de Monsieur Menzel, dans lequel il souligne la différence entre ce qu'il appelle la « specialized route memory » et la « general landscape memory » (Menzel et al., 2000). En outre, une des illustrations de mon texte-support était reprise dans cet article. J'ai donc préféré envoyer un courriel à Monsieur Menzel pour être sûre de ne pas me tromper. Celui-ci m'a confirmé qu'il s'agissait bien de deux concepts différents et il m'a fourni, en allemand, sa définition de « Landschaftsgedächtnis » (voir partie « Annexes »), définition que j'ai utilisée dans la fiche terminologique correspondante, puisque la « general landscape memory » est un terme créé par Monsieur Menzel et ses collègues pour faire part de leurs découvertes en ce qui concerne la navigation des abeilles. Quant à la traduction de ce terme, j'ai finalement trouvé, en restreignant mes recherches sur Google, deux sources en français faisant référence aux travaux de Monsieur Menzel et ses collègues en employant l'expression « mémoire du paysage ». C'est pourquoi j'ai opté pour ce terme dans ma traduction.

Concernant la traduction de « Raumgedächtnis », je ne parvenais pas à trouver de définition exacte de ce terme, si ce n'est dans un mémoire de master portant sur les chiroptères (Ehrlich, 2009, p. 144). L'étudiante reprenait une définition issue d'un ouvrage sur les chauves-souris. Néanmoins, sa traduction française du terme par « mémoire des lieux » me paraissait présenter un risque de confusion avec le terme « mémoire des lieux » du domaine de la géographie et j'ai donc lu d'autres sources dans lequel le terme figurait, sans qu'il y soit néanmoins explicitement défini. Je me suis alors rendu compte que « Raumgedächtnis » et « räumliches Gedächtnis » étaient employés indifféremment en allemand. La définition de « räumliches Gedächtnis » sur le site de la revue scientifique *Spektrum* (Spektrum.de, « Räumliches Gedächtnis ») donnant

pour synonyme du terme « topographisches Gedächtnis » et pour équivalent anglais « spatial memory », j'ai d'abord choisi de traduire « Raumgedächtnis » par « mémoire topographique », afin de ne pas réemployer « mémoire spatiale », que j'avais déjà utilisé pour « Landschaftsgedächtnis ». Toutefois, à la suite du courriel de Monsieur Menzel, j'ai modifié ma traduction et j'ai employé « mémoire spatiale », car ce terme est plus courant que « mémoire topographique » en français et sa définition correspond parfaitement à celle que Monsieur Menzel fait de « Raumgedächtnis » dans son courriel (voir partie « Annexes »).

- « Vektorgedächtnis » (p. 50), « Routengedächtnis » (p. 54) :

Parfois, la recherche d'équivalents en français des termes allemands s'est révélée difficile. En effet, beaucoup de termes employés par Monsieur Menzel semblent être des calques de l'anglais, dont certains se sont imposés en allemand. C'est le cas notamment des termes « Vektorgedächtnis » (« vector memory ») et « Routengedächtnis » (« route memory »). Pour traduire ces termes en français, j'ai eu recours à différentes méthodes.

Pour le premier, « Vektorgedächtnis », j'ai cherché si les calques « mémoire de vecteurs » ou « mémoire vectorielle » étaient utilisés en français. Ils le sont tous deux, mais dans un autre domaine : l'informatique. Le terme étant mentionné entre parenthèses en allemand, j'ai hésité entre ne pas le traduire et le traduire entre guillemets tout en ajoutant une note du traducteur. Toutefois, étant donné que Monsieur Menzel l'emploie plusieurs fois dans le texte, je ne pouvais pas le supprimer. J'ai donc demandé conseil à mon directeur de mémoire, qui m'a conseillé d'attendre l'avis de ma spécialiste référente, Madame Léa Tison. Elle m'a confirmé qu'elle n'avait jamais entendu « mémoire vectorielle » employé en français dans son domaine de spécialité, mais qu'à son avis, les spécialistes feraient le rapprochement avec l'anglais « vector memory », qui lui est utilisé. J'ai néanmoins décidé de modifier quelque peu la phrase contenant la première occurrence de ce terme, afin de sous-entendre qu'il ne s'agissait pas d'une terminologie courante.

Pour le deuxième terme, « Routengedächtnis », j'avais d'abord cherché des occurrences du calque de l'allemand « mémoire de(s) routes », mais soit les sources trouvées citaient les travaux de Monsieur Menzel, soit elles traitaient d'un autre domaine. Je suis donc passée par l'anglais, « path memory » ou « route memory » (après avoir vérifié que les définitions se recoupaient), et en faisant le rapprochement avec « route integration », qui est l'équivalent anglais du terme français « intégration de trajet », j'ai cherché l'expression « mémoire des trajets » sur Google. J'ai obtenu un grand nombre de résultats, avec des sources fiables, dont certaines traitaient de la navigation des abeilles. Néanmoins, après relecture, j'ai préféré traduire cette expression par une périphrase, « qui avaient donc mémorisé une route », pour faire le lien avec la dénomination du groupe d'abeilles, « *abeilles à route* ».

- « Tracht » (p. 52), « Auflassstellen » (p. 52, 56, 58), « Aufenthaltsort » (p. 62, 64) et « Manipulierbarkeit » (p. 66) :

Certains termes qui n'étaient pas des calques de l'anglais n'avaient, semble-t-il, pas d'équivalents en français. C'est le cas notamment de « Tracht », dont je ne suis pas parvenue à trouver de traduction. Pour traduire ce terme, je me suis appuyée sur la définition en allemand, « 2. (Imkersprache) von den Bienen eingetragene Nahrung, besonders Nektar, Pollen, Honigtau » (Duden.de, « Tracht »), et j'ai eu recours à deux procédés : la périphrase et la modulation. C'est pourquoi on peut lire « sources de nectar et de pollen » dans ma traduction.

J'ai également utilisé une périphrase pour traduire le mot composé « Auflassstelle » : « lieu où elles ont été libérées ». Lors de sa relecture, Madame Tison a remplacé une de mes traductions de « Auflassstellen » par « lieux de relâché ». Le terme « relâché » écrit de cette façon ne me semblait cependant pas grammaticalement correct. Étant donné que Monsieur Mothe m'avait déjà suggéré de modifier ma traduction en « lieux de lâcher », j'ai pensé que Madame Tison avait simplement fait une faute d'inattention, et des recherches sur Internet m'ont confirmé que le terme « relâcher » était bien employé par les spécialistes dans le domaine apicole. J'ai donc finalement traduit « Auflassstelle(n) » par « lieu(x) de relâcher » la plupart du temps. Je l'ai aussi traduit une fois par « point », car le texte parlait de « faire des cercles

autour » de l'« Auflassstelle », et il me semblait bizarre de faire des cercles autour d'un lieu, ce qu'ont confirmé mes recherches phraséologiques. Trois autres fois, j'ai traduit « Auflassstelle » par une périphrase (« lieu où elles ont été libérées » ou « endroit où elles ont été relâchées »), car cela me paraissait plus fluide dans la phrase.

Le mot « Aufenthaltsort », qui apparaît plusieurs fois dans le texte, a été particulièrement difficile à traduire. J'ai eu recours à une modulation pour traduire la première occurrence (« So eine Gedächnisstruktur würde Bienen dann in die Lage versetzen, den Ort zu bestimmen, an dem sie sich gerade befinden, den Zielort auszuwählen, dessen Lage relativ zu dem Aufenthaltsort festzulegen… »). J'ai préféré parler de la « position » des abeilles plutôt que du lieu où elles se trouvent. Pour la seconde occurrence (« Mindestens drei Orte (Aufenthaltsort, Stock, Futterstelle) müssten dann in ihrer relativen Lage zueinander in ihrem Gedächtnis niedergelegt sein »), j'ai décidé de garder le mot « lieu », car le début de la phrase mentionne « trois lieux ». Je ne suis cependant pas très satisfaite de ma traduction, « lieu actuel », car « actuel » renvoie à l'énonciation.

Enfin, concernant le mot dérivé « Manipulierbarkeit », je ne voulais pas avoir recours à une périphrase, car cela aurait, à mon avis, alourdi l'énumération ; j'ai donc opté pour une modulation, qui peut-être ne traduit pas exactement le mot allemand : j'ai parlé d'« accessibilité ».

- « Bildgedächtnis » (p. 60) et « Bewegungsparalaxe » (sic) (p. 68) :

Pour ces termes, les définitions française et allemande m'ont été d'une grande utilité. En lisant la définition allemande du premier, trouvée sur Enzyklo.de : « Teil des Gedächtnisses, in dem bildhafte Vorstellungen repräsentiert werden; Gedächtnisleistung steigt in dem Maße, in dem eine Information bildlich kodiert und repräsentiert wird; dabei wird die Information in einen Imagekode übersetzt - vgl Imagery, Imagerysystem, Imagerykode » (Enzyklo.de, « Bildgedächtnis »), j'ai pensé au terme français « mémoire visuelle ». Néanmoins, je n'étais

pas sûre de la définition exacte de ce dernier. Je l'ai donc cherchée et, en recoupant les deux définitions, j'ai pu vérifier qu'il s'agissait bien du même concept.

De même, pour « Bewegungsparallaxe » (l'auteur a oublié un « l » dans son article), j'ai commencé par regarder les pages allemande et française de Wikipedia. Or, je me suis rendu compte que les définitions dans les deux langues ne correspondaient pas. La page française traitait du « défilement parallaxe » (« parallax scrolling » en anglais), qui est un terme propre au domaine informatique, et plus précisément à la conception de jeux vidéos, tandis que la page allemande faisait bien référence à la navigation. J'ai alors pensé que « Bewegungsparallaxe » était un synonyme d'« optischer Fluss », le « flux optique », qui permet aux abeilles d'évaluer les distances. Néanmoins, en comparant les définitions de ces deux termes en allemand, je me suis rendu compte qu'elles ne correspondaient pas. Le concept d'« optischer Fluss » est plus large que celui de « Bewegungsparallaxe ». À court d'idées, j'ai cherché une traduction littérale de ce terme, « parallaxe du mouvement », et, en recoupant les définitions, j'ai pu valider cette traduction. J'ai cependant constaté, par la suite, qu'il y avait plus d'occurrences de « parallaxe de mouvement » sur Internet, et j'ai donc opté pour cet équivalent. Toutefois, Léa Tison a modifié ma traduction et a remplacé « parallaxe du mouvement » par « flux optique ». J'ai alors envoyé un courriel à Monsieur Menzel, qui m'a confirmé qu'il s'agit bien de deux phénomènes visuels différents (voir partie « Annexes »). J'ai donc conservé ma traduction initiale.

- « beobachtendes Lernen » et « latentes Lernen » (p. 68) :

Ces termes apparaissent à la fin du texte, dans la phrase : « Beobachtendes Lernen (auch latentes Lernen genannt), wie es bei der Navigation im Gelände im Vordergrund steht, führt zu Gedächtnisformen, die sich von einem assoziativen Gedächtnis unterscheiden. » Ces deux termes sont ici employés comme synonymes. Or, à la lecture de leur définition en allemand, il m'a semblé qu'ils renvoyaient à des concepts différents. Après avoir lu attentivement la suite du paragraphe, j'ai finalement choisi de traduire « latentes Lernen », même s'il est entre parenthèses dans le texte source, et de supprimer « beobachtendes Lernen » de ma traduction. En effet, la définition allemande de « latentes Lernen » explique qu'il s'agit

d'un apprentissage sans récompense, ce que Monsieur Menzel souligne dans la suite du paragraphe. Les différentes définitions françaises d'« apprentissage latent » m'ont confortée dans mon choix, puisque plusieurs d'entre elles mentionnent la théorie de la carte cognitive d'Edward Tolman.

- « Niststelle » (p. 44), « Futterstelle » (p. 50, 52, 54) et « Nummernschilder » (p. 54) :

Ces trois termes sont employés dans le domaine apicole. Concernant les deux premiers, j'ai eu des doutes quant à leur traduction, car les équivalents « nid » et « lieu de nourrissage » sont en général utilisés lorsqu'on parle d'oiseaux. Néanmoins, en faisant des recherches, j'ai constaté qu'ils étaient également employés par les spécialistes dans le domaine apicole, c'est pourquoi je les ai traduits ainsi. J'ai cependant parfois traduit « Futterstelle » par « source de nourriture », lorsque j'estimais que cela correspondait mieux au contexte. J'ai également préféré « point de nourrissage » lorsque l'auteur employait plusieurs fois le mot « lieu » dans une phrase, pour éviter toute confusion. Enfin, lors de sa relecture, Madame Tison a commenté ma traduction en mentionnant que « lieu de butinage » était aussi employé lorsqu'il ne s'agissait pas de conditions expérimentales. C'est pourquoi j'ai traduit les occurrences de « Futterstelle » par « lieu de butinage » dans la première partie de l'article, où Monsieur Menzel décrit le comportement général des abeilles.

Concernant « Nummernschilder », mon problème a été de trouver l'équivalent en français. En effet, je voyais tout à fait ce à quoi l'auteur faisait référence, mais je ne connaissais pas le terme employé en français par les spécialistes pour désigner ce concept. C'est grâce à mes lectures que j'ai pu résoudre ce problème : dans les ouvrages d'apiculture, les auteurs parlent de « pastilles numérotées ». J'ai donc utilisé ce terme dans ma traduction.

- « Motivation » (p. 52) :

J'avais hésité à traduire « Motivation » par « motivation » en français, car cela ne me paraissait pas idiomatique pour parler des abeilles. C'est pourquoi j'avais choisi de rendre ce terme, en fonction de la phrase, par « motivation », « envie » ou même « capacité ». Il s'agissait d'une erreur, le langage technique et scientifique étant en général répétitif. En outre, Léa Tison a systématiquement modifié ma traduction pour la remplacer par « motivation », me signalant ainsi qu'il s'agit bien de la terminologie employée en apidologie et, plus généralement, en zoologie.

- « Tiefeninformation » (p. 68) :

J'avais traduit ce terme, de manière erronée, par « données poussées ». C'est un ami, ancien professeur de physique, qui m'a signalé mon erreur et m'a expliqué ce qu'est la parallaxe de mouvement et comment elle permet de déterminer la distance, ou profondeur, entre l'observateur et un élément du paysage. Suivant les conseils de cet ami, j'ai remplacé « données poussées » par « informations sur la profondeur », une traduction qui correspond effectivement mieux au contexte.

IV. Problèmes phraséologiques

Comparées aux problèmes terminologiques, les difficultés d'ordre phraséologique que j'ai rencontrées étaient moindres. J'en mentionnerai néanmoins quelques-unes dans cette partie.

- « die ortsrichtige Zeitfunktion der scheinbaren Sonnenbewegung » (p. 46) :

Le premier type de difficultés phraséologiques rencontré concerne deux expressions très longues en allemand, dont je comprenais le sens global sans être pour autant à même de le

rendre dans la langue des spécialistes en français. Pour la première, « die ortsrichtige Zeitfunktion der scheinbaren Sonnenbewegung », j'ai d'abord choisi la facilité en la traduisant par « la course du soleil », qui me semblait correspondre et que j'avais lu plusieurs fois dans des articles en français lors de mes recherches documentaires. Néanmoins, lorsqu'il a révisé le premier jet de ma traduction, Monsieur Mothe a inséré un commentaire à la suite de cette expression, me demandant si elle traduisait bien l'ensemble de l'expression allemande. J'ai demandé à une amie d'origine allemande ce qu'elle comprenait en lisant cette expression, mais, n'étant pas une spécialiste du domaine, elle m'a avoué qu'elle ne voyait pas exactement ce que l'auteur voulait dire. Comme je n'avais pas de preuve que « course du soleil » traduisait l'intégralité de l'expression allemande, j'ai transformé ma traduction en « déplacement du soleil dans le ciel au cours du temps », qui me paraissait cependant nettement moins idiomatique. Sur les conseils de Monsieur Mothe, j'ai demandé à Madame Tison son avis. Elle m'a dit que « course du soleil » pouvait convenir, mais elle a également proposé la traduction suivante : « la position changeante du soleil dans le ciel au cours de la journée ». J'ai d'abord opté pour cette proposition, mais mon ami professeur de physique a critiqué cette traduction et m'a proposé une expression, « la détermination du temps local par le mouvement apparent du soleil », que j'ai reprise, en la modifiant légèrement pour l'insérer dans la phrase : « à déterminer le temps local grâce au mouvement apparent du soleil ».

- « das Muster des linear polarisierten Himmelslichtes » (p. 48) :

Il s'agit de la seconde expression pour laquelle j'avais des doutes quant à la phraséologie en français. Lors de mes recherches préalables à la traduction, j'avais souvent lu que les abeilles sont capables de voir la « lumière polarisée ». Certaines sources mentionnaient également le « schéma de polarisation de la lumière du ciel bleu » (Bouguet et al., 2014, p. 114). Enfin, en me renseignant sur le principe physique de polarisation de la lumière, j'avais appris qu'il existe une polarisation rectiligne, une polarisation circulaire et une polarisation elliptique de la lumière. Néanmoins, je ne savais pas comment assembler l'ensemble de ces éléments en une seule et même expression. J'ai donc fait plusieurs essais avec différentes expressions, que j'ai

cherchées sur Google et, en m'appuyant sur le nombre de résultats et sur la fiabilité des sources trouvées, j'ai opté pour « le schéma de polarisation de la lumière du ciel », en supprimant « rectiligne », car je ne trouvais aucune occurrence de l'expression avec cet adjectif. Mon ami professeur de physique a commenté cette traduction, en m'expliquant le modèle de polarisation de la lumière par diffusion de Rayleigh, et il a remplacé « schéma » par « modèle » et a ajouté « rectiligne » (que j'avais supprimé) à ma traduction, ce qui donne donc : « le modèle de la polarisation rectiligne de la lumière du ciel ». Si cette traduction est fidèle au texte source, elle est néanmoins incomplète, comme l'a souligné mon ami. En effet, seule la lumière diffusée perpendiculairement à la direction incidente est polarisée rectilignement, tandis que celle diffusée dans la direction de la lumière incidente n'est pas polarisée. Dans toute direction intermédiaire, la polarisation de la lumière est partielle.

- « egozentrisches Orientierungssystem », « egozentrische Orientierungsweise », « allozentrische Orientierungsweise », « egozentrische Wegintegration » (p. 48) et « egozentrisches Wegintegrationsmechanismus » (p. 50) :

Ma traduction initiale des deux premières expressions, que l'auteur emploie comme synonymes, n'était pas juste d'un point de vue phraséologique. En effet, les expressions utilisées dans la littérature française pour désigner cette stratégie de navigation sont très nombreuses. Rien que l'adjectif peut être traduit par « égocentré », « égocentrique » ou encore « autocentré ». J'ai donc décidé de rester proche du texte source et d'employer « système d'orientation égocentré » pour les deux. Or, l'ami auquel j'ai demandé de relire mon mémoire m'a signalé que la notion de « système d'orientation » était malvenue, puisque ce n'est pas le système en lui-même qui est « allocentré », mais le référentiel dans lequel s'inscrit la représentation spatiale. J'ai donc rectifié ma traduction en conséquence, pour parler de « stratégie de navigation basée sur un référentiel égocentré » et de « représentation spatiale allocentrée ».

Quant à « egozentrische Wegintegration » et « egozentrisches Wegintegrationsmechanismus », j'avais choisi dès le départ de supprimer « égocentré » de ma traduction, car je ne trouvais aucune occurrence pour l'expression « intégration de trajet égocentrée/autocentrée » ou

« intégration égocentrée/autocentrée de trajet ». En outre, Monsieur Menzel explique dans le paragraphe consacré à l'intégration de trajet qu'il s'agit d'un système de navigation égocentré. J'ai donc estimé que je pouvais omettre « égocentré » sans que cela nuise à la compréhension.

V. Problèmes de compréhension

- « Auf diese Weise lernten die Bienen keine Vektorkomponenten einer Route, konnten aber mit der gleichen Motivation auf ihr Heimfinden geprüft werden wie auf Routen dressierte Tiere » (p. 52) :

Lors de la traduction, j'ai buté sur cette phrase en raison de l'ambiguïté de l'expression « mit der gleichen Motivation ». Je n'arrivais pas à comprendre s'il s'agissait de la « motivation » des abeilles ou de celle des chercheurs. Avaient-ils pu tester la capacité des abeilles à retrouver leur ruche comme ils avaient pu le faire avec les abeilles à route, ou les abeilles avaient-elles montré la même capacité à retrouver leur ruche que l'avaient fait auparavant les abeilles à routes ? Monsieur Mothe, en comparant le texte source à ma traduction, s'est fait la même réflexion. J'ai donc décidé de rester assez vague en français, en traduisant cette expression par « mais nous pouvions tester leur capacité à retrouver la ruche comme pour des abeilles dressées à des routes ». J'ai conscience qu'en choisissant cette traduction, je penche plutôt pour la première interprétation, mais c'est celle qui me paraissait la plus logique, en me plaçant du point de vue du chercheur.

- « allozentrische Landschaftsgedächtnis » (p. 48) et « kognitive Karte » (p. 62) :

Cette difficulté de compréhension a été assez problématique, puisque c'est sur la différence entre ces deux systèmes de mémoire que repose la thèse de l'auteur. J'avais tenté de comprendre la différence grâce au livre *Die Intelligenz der Bienen* de Monsieur Menzel, dans lequel un chapitre entier est consacré à la navigation des abeilles, néanmoins, comme cela restait malgré tout très flou, j'ai écrit à l'auteur pour lui demander des explications (voir partie « Annexes »).

Il m'a très gentiment répondu, et j'ai compris, grâce à son courriel, que le système de la carte cognitive repose sur une représentation allocentrée de l'espace, mais contient également des informations sur les relations géométriques entre les différents repères spatiaux. Cette clarification m'a permis de mieux comprendre le texte source, et donc de mieux le traduire.

VI. Conclusion

À première vue, l'article de Monsieur Menzel ne m'avait pas paru insurmontable. Il y avait certes quelques passages qui étaient assez flous pour moi, notamment celui où il décrit les différentes stratégies de navigation (basées sur un référentiel égocentré ou allocentré, carte topographique), mais j'avais compris l'idée du texte dans son ensemble et je pensais qu'il serait donc aisé de le traduire. J'ai réalisé à quel point je me trompais lorsque je l'ai relu plus attentivement, et que j'ai commencé à le traduire.

Il y avait tout d'abord les problèmes de terminologie : la plupart des articles scientifiques étant publiés en anglais, il est parfois difficile de trouver en français des correspondances attestées des termes allemands, qui sont eux-mêmes souvent des calques de l'anglais. C'est pourquoi la terminologie est le point qui m'a posé le plus de difficultés lors de la traduction. Heureusement, certaines réponses m'ont été apportées par ma spécialiste-référente, Madame Léa Tison, qui a relu attentivement mon mémoire et m'a fait part de ses conseils et de ses remarques. C'est également grâce à elle que j'ai pu résoudre la plupart des problèmes de phraséologie rencontrés. Concernant la compréhension de l'article, j'ai pu m'appuyer sur l'article scientifique publié par Monsieur Menzel et ses collègues portant précisément sur le thème de mon texte support (Menzel et al., 2000), ainsi que sur l'ouvrage de vulgarisation *Die Intelligenz der Bienen*, écrit par Monsieur Menzel (2016), et dans lequel il consacre un chapitre entier à la navigation des abeilles. En outre, j'ai eu la chance de pouvoir communiquer directement avec lui par courriel. Il a toujours répondu très rapidement, et de façon très précise à mes questions, ce qui m'a permis d'éviter toute erreur de sens ou imprécision. Malgré les fois où j'ai buté pendant des heures sur un mot ou une phrase, et celles où j'avais l'impression que

je ne viendrais jamais à bout de ce texte, j'ai pris beaucoup de plaisir à le traduire, à voir le sens se préciser au fur et à mesure de mes recherches, et les zones d'ombres disparaître peu à peu. J'avais un peu l'impression d'être moi-même une abeille, récoltant des informations ici et là, comme elle le nectar des fleurs, pour ensuite les transformer en un tout cohérent et cohésif, le miel ou, dans mon cas, une traduction française aboutie de l'article de Monsieur Menzel.

ANALYSE TERMINOLOGIQUE

I. Fiches terminologiques

Vedette allemande	N°	Vedette française
assoziatives Gedächtnis	01	mémoire associative
Engramm	02	trace mnésique
kognitive Karte	03	carte cognitive
Landschaftsgedächtnis	04	mémoire du paysage
latentes Lernen	05	apprentissage latent
räumliches Gedächtnis	06	mémoire spatiale
Routengedächtnis	07	mémoire des trajets
Wegintegration	08	intégration de trajet

COMMENT LIRE UNE FICHE TERMINOLOGIQUE

Les fiches terminologiques ci-après sont constituées de tout ou partie des champs suivants :

- VE VEdette (terme faisant l'objet de la fiche et ses synonymes)
- EN ENglish — *Indiquer ici le code de langue correspondant à chaque partie de vos fiches*
- DF DéFinition de la vedette
- DOM DOMaine (en français, source : www.granddictionnaire.com)
- CTX ConTeXte
- COL COLlocations
- ID IDentification de l'auteur :
  Bureau Émetteur (organisme pour lequel la fiche a été rédigée) : ESIT
  Collection terminologique à laquelle appartient la fiche : MEM19 pour mémoire soutenu en 2019
  Auteur de la fiche : MDU = Marie DUpont
- Notes :
  - EXP = renseignements encyclopédiques qui ne font pas partie de la définition
  - USG = indications relatives à l'USaGe, au niveau de la langue, au registre, à la région, etc.
  - GRM = indications GRaMmaticales
  - ETY = ETYmologie
  - DER = mots DERivés
  - HOM = HOMonyme
  - ANT = ANTonyme
  - SPE = termes SPÉcifiques
  - GEN = termes GÉNériques
  - REL = renvois associatifs à d'autres termes
- RF RéFérences (sources bibliographiques)

La plupart des termes que j'ai choisis ont trait à la mémoire. En effet, les capacités de mémorisation des abeilles et la façon dont elles s'en servent pour naviguer sont au centre de l'argumentaire de l'auteur, il me paraissait donc essentiel de définir explicitement les différents types de mémoire cités. Outre ces termes, deux vedettes ne portent pas sur la mémorisation à proprement parler, mais y sont rattachées, puisqu'elles désignent des systèmes de navigation. Enfin, une vedette désigne un type d'apprentissage important pour la navigation des abeilles.

Fiche 1 allemand

– VE DE assoziatives Gedächtnis

– DOM psychologie

- DF Gedächtnis, das für die gewohnheitsmäßigen Verhaltensweisen wie Assoziation, Reproduktion oder den bedingten Reflex verantwortlich ist.

- CTX Tiere, die ein assoziatives Gedächtnis gebildet haben, vermeiden den bestraften Duft CS+ signifikant.

- COL v. : ein * bilden, entwickeln, formen, über ein * verfügen

- ID ESIT MEM19 CDU

- Notes

- SPE Verknüpfung

- RF Philosophie und Literatur, Assoziatives Gedächtnis [online]. Verfügbar unter: <https://philosophieundliteratur.de/zusammenfassungen/die-stellung-des-menschen-im-kosmos-zusammenfassung/2-kapitel-das-stufenmodell-des-seins/2-3-assoziatives-gedachtnis/> (abgerufen am 01.04.2019) [SEC DF] [VE]; JAECKEL A., Die Rolle des Proteinkinase A – Ankerprotein – Komplexes bei der Bildung von olfaktorischen Gedächtnissen [online] Doktorarbeit Naturwissenschaften. Saarbrücken: Universität des Saarlandes, 2007, 108 S. Verfügbar unter: <https://publikationen.sulb.uni-saarland.de/bitstream/20.500.11880/22495/1/Diss_Andrea_Jaeckel.pdf > (abgerufen am 01.04.2019) [CTX]

Fiche 1 français

– VE FR mémoire associative [1] mémoire par association [2]

– DOM psychologie

– DF Capacité à rassembler des éléments et à les associer.

– CTX Il s'agit donc de mémoriser le chemin suivi par les signaux de prévision dans la mémoire associative pour, dans un second temps comparer ces chemins afin de respecter la cohérence des états prédits.

– COL v. : faire appel à, faire jouer, faire travailler, utiliser sa *

– ID ESIT MEM19 CDU

– Notes

– EXP La mémoire associative stocke des représentations dites amodales (i.e., qui peuvent être activées quelle que soit la modalité perceptive d'entrée) ; le stimulus est identifié lorsque l'entrée est appariée avec les traits de l'objet stocké.

– RF GAUTIER L., Mémoire associative ou comment mieux apprendre [en ligne]. Disponible sur : <http://tout-sur-la-memoire.com/tag/memoire-par-association> (consulté le 01.04.2019) [1] [2] [SEC DF] ; DO HUU N., Apprentissage de représentations sensori-motrices pour la reconnaissance d'objet en robotique [en ligne]. Thèse de doctorat Intelligence artificielle. Toulouse : Université Paul Sabatier, 2007, 130 p. Disponible sur : <http://thesesups.ups-tlse.fr/190/1/Do_Huu_Nicolas.pdf> (consulté le 01.04.2019) [CTX] ; LASSERRE, J.-L., Corps Emotion Ostéopathie [en ligne]. Disponible sur : <http://jeanluc.lasserre.pagesperso-orange.fr/04neuroscience.html> (consulté le 01.04.2019) [EXP]

Fiche 2 allemand

– VE DE Engramm [1], Gedächtnisspur [2]

- DOM psychologie

- DF Veränderung des Nervengewebes zur Fixierung von Gelerntem (Lernen) im Langzeitgedächtnis durch ständiges Üben und Wiederholen.

- CTX Hinsichtlich der Fixierung von Gedächtnisinhalten ist daher besonders zu beruücksichtigen, daß also nicht nur das Engramm eines bestimmten Ereignisses isoliert fesgehalten wird, sondern daß parallel hierzu auch die Begleitumstände wie vor allem die jeweils unterlegte Motivationslage, wie etwa positive oder negative Gefühlsbetonnungen, mit engrammiert werden.

- COL v. : ein * bilden, erzeugen, hervorrufen

n. : Aktivierung, Ausdehnung, Bildung, Ekphorie, Etablierung, Reduzierung, Speicherung eines *s

- ID ESIT MEM19 CDU

- RF Spektrum, Engramm [online]. Verfügbar unter: <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/engramm/21404> (abgerufen am 01.04.2019) [1] [2] [SEC DF] ; RAHMANN H., RAHMANN M., *Das Gedächtnis: Neurobiologische Grundlagen.* [online]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1988, 320 S. Verfügbar unter: <https://books.google.fr/books?id=VxuYBwAAQBAJ&pg=PA266&dq=%22das+engramm%22+%22ged%C3%A4chtnis%22&hl=fr&sa=X&ved=0ahUKEwiWg9OtzsDhAhVIyYUKHb-aB3cQ6AEIODAC#v=onepage&q=%22das%20engramm%22%20%22ged%C3%A4chtnis%22&f=false> (abgerufen am 01.04.2019) [CTX]

Fiche 2 français

– VE FR trace mnésique [1], engramme [2], trace mémorielle [3]

– DOM psychologie

– DF Modification du tissu nerveux constituant la base neurophysiologique de la conservation du passé dans la mémoire.

– CTX Il est évident que de la qualité de l'encodage dépendront la robustesse et la durabilité de la trace mnésique ainsi créée, et donc la récupération de cette information.

– COL n. : durabilité, évanouissement, robustesse, stabilisation de la *, élaboration d'une *

– ID ESIT MEM19 CDU

– RF RICHARD J.-F., Encyclopedia Universalis [en ligne]. Disponible sur : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/trace-mnesique/> (consulté le 01.04.2019) [1] [DF] ; MEULEMANS T., SERON X., *L'examen neuropsychologique dans le cadre de l'expertise médico-légale* [en ligne]. Sprimont : Éditions Margada, 2004, 205 p. (Pratiques psychologiques : évaluation et diagnostic). Disponible sur : <https://books.google.fr/books?id=7px8htWlmB4C&pg=PA99&dq=%22trace+mn%C3%A9sique%22&hl=fr&sa=X&ved=0ahUKEwiJ7PeKiq_hAhXj6OAKHbkMDm4Q6AEILjAB#v=onepage&q=%22trace%20mn%C3%A9sique%22&f=false> (consulté le 01.04.2019) [CTX] ; VERGNAUD G., *Les sciences cognitives en débat: première école d'été du CNRS sur les sciences cognitives* [en ligne]. Paris : CNRS Éditions, 1991. 334 p. Disponible sur : <https://books.google.fr/books?id=WRJ-AAAAMAAJ&q=%22trace+mn%C3%A9sique%22&dq=%22trace+mn%C3%A9sique%22&hl=fr&sa=X&ved=0ahUKEwi2nbWYiq_hAhXB8uAKHWbyAW44ChDoAQg6MAM> (consulté le 01.04.2019) [3]

Fiche 3 allemand

– VE DE kognitive Karte [1] mentale Karte [2]

– DOM psychologie

- DF Mentale Repräsentation, d. h. mentale Abbildung von räumlich angeordneten Gegebenheiten.

- CTX Das Verhalten, eine neue und direkte Verbindung zwischen zwei Orten einzuschlagen, wird üblicherweise als ein Indiz für eine kognitive Karte als Struktur des Navigationsgedächtnisses angesehen, wenn ausgeschlossen werden kann, dass nicht andere Mechanismen eingesetzt werden, wie zum Beispiel Wegintegration, Landmarken an den Zielorten oder ein strukturierter Horizont (Tolman 1948, Wiener et al. 2011).

- COL v. : eine * aufbauen, verwenden, über eine * verfügen

- ID ESIT MEM19 CDU

- Notes

- EXP Herman und Siegel (1977) betonen, bezugnehmend auf Siegel und White, dass bei wiederholter Erfahrung mit der Umwelt, Bewegungen und Wahrnehmung solange miteinander verknüpft werden, bis eine kognitive Karte bzw. eine räumliche Repräsentation entwickelt ist. Kognitive Karten, sowie kognitives Kartieren sind flexibel. Sie verändern sich, passen sich an, werden ausgebaut.

- RF HELLBRÜCK J., KALS E., *Umweltpsychologie: Lehrbuch.* Wiesbaden: Springer-Verlag, 2012, S. 28. (Basiswissen Psychologie) [1] [SEC DF]; FLADE A., *Der rastlose Mensch: Konzepte und Erkenntnisse der Mobilitätspsychologie* [online]. Wiesbaden: Springer-Verlag, 2013, 278 S. Verfügbar unter: <https://books.google.fr/books?id=ibkmBAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=fr#v=onepage&q&f=false> (abgerufen am 01.04.2019) [2]; MENZEL R., Wie Pestizide (Neonicotinoide) die Navigation, die Tanz-Kommunikation und das Lernverhalten von Bienen verändern. In: *Rundgespräche der Kommission für Ökologie: Soziale Insekten in einer sich wandelnden Welt* [online]. 2014, Bd 4, S. 75-83. Verfügbar unter: <https://publikationen.badw.de/de/042198748%7B09%20Menzel%20%28Wie%20Pestizide%20%28Neonicotinoide%29%20die%20Navigation%20...%20ver%C3%A4ndern%29%7D%5BBY-ND%5D.pdf> (abgerufen am 01.04.2019) [CTX]; ZIER J., Kognitive Karten – Distanzschätzungen in der Europäischen Union [online]. Diplomarbeit Naturwissenschaften. Wien: Universität Wien, 2009, 102 S. Verfügbar unter: <http://othes.univie.ac.at/6300/1/2009-08-24_0007638.pdf> (abgerufen am 01.04.2019) [EXP]

Fiche 3 français

– VE FR carte cognitive [1] carte mentale [2]

– DOM psychologie

– DF Représentation des positions relatives des différents lieux de l'environnement et mise en place de trajets pour les relier.

– CTX Les réactions du groupe de babouins dans cette expérience démontrent qu'une double intégration est réalisée par la carte cognitive : l'acquisition de représentations sur l'espace ainsi que sur les événements s'y déroulant (comme le prévoyait déjà E.C. Tolman en 1948).

– COL n. : développement, implémentation, utilisation d'une *

– ID ESIT MEM19 CDU

– Notes

– EXP Le système de cartes est une alternative au système de routes : la « carte cognitive » est une représentation mentale des lieux reliés entre eux par des règles de transformation. La référence est cette fois exocentrique ou allocentrique, et la carte ne privilégie pas de trajet particulier.

– RF VAUCLAIR J., *L'intelligence de l'animal* [en ligne] 2de éd., Paris : Éditions du Seuil, 1995, 227 p. Disponible sur : <https://books.google.fr/books?id=FGXlCwAAQBAJ&hl=fr&source=gbs_navlinks_s> (consulté le 01.04.2019) [1] [SEC DF] [CTX] ; LAUNAY M., *Psychologie cognitive* [en ligne]. Paris : Hachette Supérieur, 2004, 240 p. Disponible sur : <https://books.google.fr/books?id=K9Wq2bWjGEgC&pg=PA37&lpg=PA37&dq=%22carte+mentale%22+tolman&source=bl&ots=Ub__nJ-Uq6&sig=ACfU3U1BBruMYf84h751dWHbDxx7s_cs2w&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKEwil76y3s9nhAhUd8uAKHZ2lCpg4ChDoATABegQIBhAB#v=onepage&q=%22carte%20mentale%22%20tolman&f=false> (consulté le 01.04.2019) [2] ; BUSER P., *Cerveau de soi, cerveau de l'autre : neurobiologie, conscience et inconscient* [en ligne]. Paris : Éditions Odile Jacob, 1998, 432 p. Disponible sur : <https://books.google.fr/books?id=xlSp9VSo67wC&printsec=frontcover&hl=fr&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false> (consulté le 01.04.2019) [EXP]

Fiche 4 allemand

– VE DE Landschaftsgedächtnis

- DOM psychologie

- DF Gedächtnis für die von dem Tier explorierte Landschaft.

- CTX Letzterer verlangt von den Tieren, dass sie sich an ein Tage oder Wochen zurückliegendes Gedächtnis erinnern und auf diese Weise sich auf ein allgemeines Landschaftsgedächtnis beziehen.

- COL v. : ein * erlernen, aufbauen, bilden, abrufen, sich auf ein * beziehen

adj. : generelles, allgemeines, kartenartiges *

- ID ESIT MEM19 CDU

– Notes

– USG Terme créé en allemand par Randolf Menzel, faisant référence au terme anglais « general landscape memory ».

– ETY [1] traduit de l'expression anglaise « landscape memory » utilisée par Randolf Menzel et ses collègues pour faire part de leurs découvertes sur la navigation des abeilles dans MENZEL R., BRANDT R., GUMBERT A. et al., Two spatial memories for honeybee navigation. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Science.* [en ligne]. 2000, vol. 267, nº 1447, p. 961-968. Disponible sur : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1690634/pdf/10874744.pdf> (consulté le 01.04.2019).

- RF MENZEL R., Wie Pestizide (Neonicotinoide) die Navigation, die Tanz-Kommunikation und das Lernverhalten von Bienen verändern. In: *Rundgespräche der Kommission für Ökologie: Soziale Insekten in einer sich wandelnden Welt* [online]. 2014, Bd 4, S. 75-83. Verfügbar unter: <https://publikationen.badw.de/de/042198748%7B09%20Menzel%20%28Wie%20Pestizide%20%28Neonicotinoide%29%20die%20Navigation%20...%20ver%C3%A4ndern%29%7D%5BBY-ND%5D.pdf> (abgerufen am 01.04.2019) [VE] [CTX]; MENZEL R., Fragen Masterarbeit französischer Übersetzungsstudentin [E-Mail an DUCROS C.], 08.04.2019 [SEC DF]

Fiche 4 français

– VE FR mémoire du paysage

– DOM psychologie

– DF Mémoire du paysage exploré par l'animal.

– CTX Les abeilles exposées aux pesticides volent bien quand il s'agit de suivre la direction d'un vecteur, mais elles se perdent quand elles doivent faire appel à leur mémoire du paysage, poursuit Randolf Menzel.

– COL v : faire appel à une, utiliser une *

– ID ESIT MEM19 CDU

– Notes

– USG hapax, calque de l'allemand

– RF ROSPARS J.-P. Le cerveau de l'insecte. In : SAUVION N., CALATAYUD P.-A., THIÉRY D. et al., *Interactions insectes-plantes* [en ligne]. Versailles : Éditions Quae, 2013, p. 151-162. Disponible sur : <https://books.google.fr/books?id=wfJaAgAAQBAJ&pg=PA161&lpg=PA161&dq=%22m%C3%A9moire+du+paysage%22+insecte&source=bl&ots=DlQhIxYuve&sig=ACfU3U3B_ARBG4819o57ukqKA_Qzpe9fZA&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKEwi3nuSCv8DhAhUKQBoKHQ90DG4Q6AEwAHoECAkQAQ#v=onepage&q=%22m%C3%A9moire%20du%20paysage%22%20insecte&f=false> (consulté le 01.04.2019) [VE] ; MENZEL R., Fragen Masterarbeit französischer Übersetzungsstudentin [courrier électronique à DUCROS C.]. Communication personnelle le, 08.04.2019 (Traduit de l'allemand en français pour les besoins du présent mémoire par DUCROS C.) [SEC DF] ; Radio Canada. Des antennes radar pour comprendre le déclin des abeilles [en ligne]. Disponible sur : <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/625274/abeilles-pesticides-antennes> (consulté le 01.04.2019) [CTX]

Fiche 5 allemand

– VE DE latentes Lernen

- DOM psychologie

- DF Lernvorgänge, die ohne am Verhalten ablesbare Aufmerksamkeit des Tieres, z.B. beim Erkunden (Erkundungsverhalten), Neugierverhalten, Spielen, und ohne Lernhilfen wie Belohnung oder Bestrafung ablaufen.

- CTX Durch latentes Lernen könnten bestimmte Fähigkeiten erworben werden, z.B. die Fähigkeit ein Labyrinth fehlerfrei zu durchlaufen, ohne evidente Belohnung oder Bestrafung.

- COL v. : ein * nachweisen

- ID ESIT MEM19 CDU

- RF Spektrum, latentes Lernen [online]. Verfügbar unter: <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/latentes-lernen/38323> (abgerufen am 01.04.2019) [SEC DF] [VE]; REICHERT H., *Neurobiologie* [online]. 2. Auflage, Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2000, 250 S. Verfügbar unter: <https://books.google.fr/books?id=KumLCzMxrw8C&printsec=frontcover&hl=fr&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false> (abgerufen am 01.04.2019) [CTX]

Fiche 5 français

– VE FR apprentissage latent

– DOM psychologie

– DF Forme d'apprentissage se réalisant sans renforcement, de manière « invisible », et ne se manifestant explicitement qu'avec l'introduction d'un renforcement.

– CTX On peut ainsi concevoir que l'omission d'un stimulus (choc électrique) puisse être facteur d'apprentissage, et l'on peut également donner une explication aux effets de contraste, à l'apprentissage latent, et aux paradoxes que présentent les effets de renforcement partiel.

– COL v. : appliquer, réaliser, utiliser un *, faire l'objet d'un *

– ID ESIT MEM19 CDU

– RF Memovocab, Vocabulaire de la psychologie cognitive de la mémoire humaine [en ligne] Disponible sur : <http://memovocab.net/glossaire/glossa_af/apprentissage-latent.html> (consulté le 01.04.2019) [VE] [DF] ; BITTERMAN M.E., *L'apprentissage chez l'animal : faits et théories* [en ligne]. Bruxelles : Pierre Margada, 1979, 236 p. Disponible sur : <https://books.google.fr/books?id=2A7QBL3QdWwC&printsec=frontcover&hl=fr&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false> (consulté le 01.04.2019) [CTX]

Fiche 6 allemand

- VE DE räumliches Gedächtnis [2], Raumgedächtnis [1], topographisches Gedächtnis [3]

– DOM psychologie

- DF Gedächtnis für die beim räumlichen Lernen erworbenen Informationen.

- CTX Auch in kognitive Funktionen wie räumliches Gedächtnis und Aufmerksamkeit scheint Testosteron involviert zu sein.

- COL v. : ein * aufbauen, bilden, entwickeln, erzeugen, verwenden, zusammenbauen

- ID ESIT MEM19 CDU

- RF EHRLICH A., Terminologie der Chiroptera Deutsch-Französisch [online]. Diplomarbeit Philosophie. Wien: Universität Wien, 2009, 291 S. Verfügbar unter: <https://core.ac.uk/download/pdf/11587672.pdf> (abgerufen am 01.04.2019) [2]; Spektrum, Räumliches Gedächtnis [online]. Verfügbar unter: <https://www.spektrum.de/lexikon/neurowissenschaft/raeumliches-gedaechtnis/10754> (abgerufen am 01.04.2019) [SEC DF] [1] [3]; FRIES E., HELLHAMMER D.H., LEHNERT H. et al., Psychoneuroendokrinologie. In: ADLER R., HERZOG W., JORASCHKY P. et al., *Psychosomatische Medizin: Theoretische Modelle und klinische Praxis* [online]. 7. Auflage, München: Elsevier Verlag, 2011 S. 74-81. Verfügbar unter: <https://books.google.fr/books?id=eDK68b4ygZkC&pg=PA77&dq=%22raumliches+ged%C3%A4chtnis%22&hl=fr&sa=X&ved=0ahUKEwiIwpWS1dvhAhVRJhoKHWZbDIo4HhDoAQhdMAk#v=onepage&q=%22raumliches%20ged%C3%A4chtnis%22&f=false> (abgerufen am 01.04.2019) [CTX]

Fiche 6 français

– VE FR mémoire spatiale [1], mémoire topographique [2], mémoire des lieux [3]

– DOM psychologie

– DF Fonction mentale permettant le stockage de l'ensemble des informations spatiales.

– CTX Ainsi, comme nous l'avons vu, parmi les structures connectées directement à l'hippocampe ou indirectement par l'intermédiaire d'autres structures, nombre d'entre elles possèdent des neurones avec des activités modulées spatialement et sont donc à ce titre, elles aussi, impliquées dans le circuit de la mémoire spatiale.

– COL n. : déficit de *, consolidation, développement, expression, localisation de la *

– ID ESIT MEM19 CDU

– RF NYS M., Développement des représentations spatiales d'itinéraires virtuels : composantes cognitives et langagières [en ligne]. Thèse de doctorat Psychologie. Paris : Université René Descartes, 2015, 284 p. Disponible sur : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01410035/document> (consulté le 01.04.2019) [1] [2] [SEC DF] ; BERTHOZ A., *Le Sens du mouvement*. Paris : Odile Jacobs, 1997, 331 p. (Poches Odile Jacobs) [3] ; RENAUDINEAU S., Flexibilité fonctionnelle des cellules de lieu et mémoire spatiale : étude des mécanismes d'adaptation et des aspects moléculaires [en ligne]. Thèse de doctorat Neurosciences. Aix-Marseille : Université d'Aix-Marseille I, 2008, 346 p. Disponible sur : https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00526192/file/these.pdf (consulté le 01.04.2019) [CTX]

Fiche 7 allemand

– VE DE Routengedächtnis

– DOM psychologie

- DF Kette von einzelnen Wegweisungen, die auf der Wegweisefunktion einzelner Landmarken aufbaut.

- CTX Dadurch ist das Verfahren für zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten geeignet und ist zudem vereinbar mit Theorien der Raumkognition, die das Routengedächtnis in seiner Struktur als Folge von diskreten Richtungsentscheidungen betrachten.

- COL v. : ein * folgen, nutzen

adj. : visuelles, kognitives *

- ID ESIT MEM19 CDU

– RF MALLOT H.A., Sehen und die Verarbeitung visueller Information: Eine Einführung [online]. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer-Verlag, 2000, 286 S. Verfügbar unter: <https://books.google.fr/books?id=-2omBgAAQBAJ&pg=PA235&lpg=PA235&dq=%22routenged%C3%A4chtnis%22&source=bl&ots=dk6qZkFAmt&sig=ACfU3U2LirzL31fpdSPnYCyT4A55TEonBw&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKEwjW3rnajsrhAhWM1eAKHZ0aDMMQ6AEwDXoECAYQAQ#v=onepage&q=%22routenged%C3%A4chtnis%22&f=false> (abgerufen am 01.04.2019) [VE] [SEC DF]; BASTEN K., Orte – Routen – Karten : Aufbau, Struktur und Gebrauch von Ortsrepräsentationen in der Raumkognition [online]. Doktorarbeit Naturwissenschaften. Tübingen: Eberhard Karls Universität, 2010, 115 S. Verfügbar unter: <https://publikationen.uni-tuebingen.de/xmlui/bitstream/handle/10900/49413/pdf/NeuFinalonline.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (abgerufen am 01.04.2019) [CTX]

Fiche 7 français

– VE FR mémoire des trajets [1], mémoire du trajet [2], mémoire de route [3]

– DOM psychologie

– DF Mémoire ayant pour fonction de stocker des informations sur la trajectoire comme la longueur des segments et les angles qu'ils forment et permettant, notamment, de se souvenir de lieux, de leurs successions et de décrire des itinéraires.

– CTX La mémoire des trajets peut donc utiliser les kinesthèses dans un mécanisme cognitif de haut niveau que guide l'exécution de l'action à partir d'une mémoire des mouvements.

– COL v. : utiliser la *

n. : bases neuronales, mécanismes de la *

– ID ESIT MEM19 CDU

– RF NEROU-LABRE M., L'orientation spatiale chez les enfants atteints d'un trouble spécifique du langage oral [en ligne]. Thèse de doctorat Médecine. Toulouse : Université Paul Sabatier, 2015, 82 p. Disponible sur : <http://www.psychomot.ups-tlse.fr/Nerou2015.pdf> (consulté le 01.04.2019) [1] [SEC DF] ; BERTHOZ A., Stratégies cognitives et mémoire spatiale. In : BOUVERESSE J., ROSAT J.-J., *Philosophies de la perception : Phénoménologie, grammaire et sciences cognitives* [en ligne]. Paris : Odile Jacob, 2003, p. 101-132. Disponible sur : <https://books.google.fr/books?id=sfNhBQAAQBAJ&pg=PA104&lpg=PA104&dq=%22m%C3%A9moire+des+trajets%22&source=bl&ots=H2xMrsASvk&sig=ACfU3U23VAyyxeG-niho9oRlgEEHJzHAbQ&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKEwiQ-LCPodLhAhUvBGMBHYSoDLUQ6AEwAXoECAcQAQ#v=onepage&q=%22m%C3%A9moire%20des%20trajets%22&f=false> (consulté le 01.04.2019) [CTX] ; GAILLARD M., Étude du rôle d'un amorçage et de règles de simplification dans l'intégration kinesthésique d'un trajet sans vision[en ligne]. Mémoire de master Sciences cognitives. Paris : Collège de France, 2007, 63 p. Disponible sur : <http://sapience.dec.ens.fr/cogmaster/www/doc/MEMOIRES/2007_GAILLARD.pdf> (consulté le 01.04.2019) [2] ; Taillade, M., N'Kaoua, B., Pala, P. et al. Cognition spatiale et vieillissement : les nouveaux éclairages offerts par les études utilisant la réalité virtuelle. *Revue de neuropsychologie* [en ligne]. 2014, vol. 6, n° 1, p. 36-47. Disponible sur : <https://www.cairn.info/revue-de-neuropsychologie-2014-1-page-36.html> (consulté le 01.04.2019) [3]

Fiche 8 allemand

- VE DE Wegintegration [1], Mechanismus der Wegintegration [2], Wegintegrationsmechanimus [3]

- DOM psychologie

- DF Mechanismus, mit dessen Hilfe sich sowohl Menschen als auch Tiere in ihrer Umwelt bewegen und orientieren können, indem sie die Veränderungen in der Orientierung und der Position durch die Beobachtung der Eigenbewegung feststellen.

- CTX Man kann durch entsprechend durchgeführte Experimente (Transport zum Auflaßort im verdeckten Käfig) ausschließen, daß Brieftauben auf dem Hinweg Wegintegration durchführen.

- COL v. : eine * durchführen, sich auf die * verlassen, die * verwenden

- ID ESIT MEM19 CDU

- RF DRESEL A.L., Kortikale Mechanismen der Wegintegration beim Menschen [online]. Doktorarbeit Naturwissenschaften. München: Ludwig-Maximilians-Universität, 2009, 162 S. Verfügbar unter: <https://core.ac.uk/download/pdf/11031573.pdf> (abgerufen am 01.04.2019) [1] [SEC DF]; MENZEL R., Von der reduktionistischen zur kognitiven Verhaltensbiologie. Wie Verhaltensbiologen über Kognition bei Tieren streiten – Forschungen über die Navigation bei Insekten. In: BÖHNERT M., KÖCHY K., WUNSCH M. *Philosophie der Tierforschung: Band 1: Methoden und Programme.* [online] Freiburg / München: Verlag Karl Alber, 2016, S. 341-369. Verfügbar unter: <https://books.google.fr/books?id=dR9hDgAAQBAJ&pg=PA342&lpg=PA342&dq=%22wegintegrationsmechanismus%22&source=bl&ots=G7Jm7q8-9J&sig=ACfU3U0x8NnuPQ_oDHo6Bh146eckgJDCAg&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKEwigj8Gk6MfhAhWly4UKHXw8AAEQ6AEwAHoECAMQAQ#v=onepage&q=%22wegintegrationsmechanismus%22&f=false> (abgerufen am 01.04.2019) [2] [3]; NEHMZOW U., *Mobile Robotik: Eine praktische Einführung* [online]. Berlin / Heidelberg: Springer-Verlag, 2002, 264 S. Verfügbar unter: <https://books.google.fr/books?id=pAogBgAAQBAJ&pg=PA108&lpg=PA108&dq=%22wegintegration%22&source=bl&ots=eZvb20iLBu&sig=ACfU3U0rMURXPJlBRri5oF28atwXCQcL5A&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKEwjR1Zyj_8nhAhVNDmMBHV3HDSY4ChDoATADegQICBAB#v=onepage&q=%22wegintegration%22&f=false> (abgerufen am 01.04.2019) [CTX]

Fiche 8 français

– VE FR intégration de trajet [1], intégration des trajets [2], intégration du trajet [3], intégration de chemin [4], intégration du chemin [5]

– DOM psychologie

– DF Stratégie de navigation dans laquelle l'information sur la position est continuellement mise à jour sur la base d'informations sur la vitesse et l'accélération, afin d'estimer la distance parcourue et les différentes orientations prises depuis un certain point de départ.

– CTX La plupart des recherches expérimentales sur l'intégration de trajet chez l'être humain impliquent des tâches dans lesquelles les sujets utilisent les informations basées sur le mouvement pour actualiser leurs estimations d'un ou plusieurs points rencontrés le long du trajet.

– COL n. : mécanisme, processus, stratégie, système, tâche d'*

v. : utiliser l'*

– ID ESIT MEM19 CDU

– Notes

– USG [4] et [5] principalement en Suisse francophone

– RF FAINETEAU H., La perception kinesthésique des distances [en ligne]. Thèse de doctorat Psychologie. Genève : Université de Genève, 2004, 257 p. Disponible sur : <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:705> (consulté le 01.04.2019) [1] [SEC DF] [CTX] ; RENAUDINEAU S., Flexibilité fonctionnelle des cellules de lieu et mémoire spatiale : étude des mécanismes d'adaptation et des aspects moléculaires [en ligne]. Thèse de doctorat Neurosciences. Aix-Marseille : Université d'Aix-Marseille I, 2008, 346 p. Disponible sur : https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00526192/file/these.pdf (consulté le 01.04.2019) [2] ; SÉGUINOT V., L'intégration du trajet : approches théorique et expérimentale chez le hamster et le chien [en ligne]. Thèse de doctorat Psychologie. Genève : Université de Genève, 2000, 88 p. Disponible sur : <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:106> (consulté le 01.04.2019) [3] ; ROUGIER N.P., Modèles de mémoires pour la navigation autonome [en ligne]. Thèse de doctorat Informatique. Nancy : Université Henri Poincaré, 2000, 196 p. Disponible sur : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01746477v2/document> (consulté le 01.04.2019) [4] ; HACCOUN Y., L'intégration du chemin en environnement virtuel non immersif : influence d'une perspective incorrecte sur l'orientation spatiale [en ligne]. Thèse de maîtrise Psychologie. Genève : Université de Genève, 2018, 114 p. Disponible sur : <https://www.researchgate.net/profile/Yoav_Haccoun/publication/329988629_L'integration_du_chemin_en_environnement_virtuel_non_immersif_influence_d'une_perspective_incorrecte_sur_l'orientation_spatiale/links/5c279a30299bf12be3a1967f/Lintegration-du-chemin-en-environnement-virtuel-non-immersif-influence-dune-perspective-incorrecte-sur-lorientation-spatiale.pdf> (consulté le 01.04.2019) [5]

II. Glossaire

abeille mellifère, abeille domestique	Honigbiene
Insecte originaire d'Inde, désormais présent sur tous les continents, vivant en sociétés organisées, au sein d'une ruche, et récoltant du nectar et du pollen pour produire du miel. EXP : Elle mesure un peu plus d'un centimètre et est de couleur plutôt brune. Seuls les premiers segments de l'abdomen sont jaune-orangé et le thorax est jaune-brun. RF : Encyclopædia Universalis, Abeille [en ligne]. Disponible sur : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/abeille/> (consulté le 20.04.2019) [SEC DF] ; Le Monde, L'abeille, l'insecte pollinisateur indispensable à la vie [en ligne]. Disponible sur : <https://jardinage.lemonde.fr/dossier-1091-abeille-insecte-pollinisateur-indispensable.html> (consulté le 20.04.2019) [SEC EXP]	
azimut solaire	Sonnenazimut
Angle créé entre le plan vertical passant à la fois par le Soleil et par le lieu considéré, et le plan vertical N-S. EXP : Cet angle vaut 0° au sud et est conventionnellement positif vers l'ouest et négatif vers l'est. RF : Énergie +, L'ensoleillement [en ligne]. Disponible sur : <h https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16759&L=0#c6054> (consulté le 20.04.2019) [SEC DF] [EXP]	
corps pédonculé	Pilzkörper
Chez les Euarthropodes, centre nerveux pair relié aux lobes optiques et antennaires, représentant le siège des intégrations nerveuses et de la mémoire notamment olfactive. EXP : Chaque corps pédonculé est constitué de deux parties : un calice plus ou moins hémisphérique regroupant les noyaux de plusieurs milliers de neurones appelés cellules de Kenyon, et un pédoncule constitué des fibres nerveuses motrices, sensitives ou associatives. RF : FORÊT R., *Dictionnaire des sciences de la vie* [en ligne]. Louvain-la-Neuve : De Boeck Supérieur, 2018, 1424 p. Disponible sur : <https://books.google.fr/books?id=Z8J3DwAAQBAJ&hl=fr&source=gbs_navlinks_s> (consulté le 20.04.2019) [DF] [SEC EXP]	
flux optique	optischer Fluss
Pattern de mouvement présent au niveau de l'œil d'un observateur en mouvement et contenant des informations sur le mouvement propre de l'observateur, sur les objets en mouvement, et sur la disposition en trois dimensions de l'environnement, ce qui peut être exploité pour la perception et le contrôle de la locomotion. REL : parallaxe du mouvement RF : BOSSARD M., Perception visuelle du mouvement propre : effets des mouvements de la tête durant la marche sur l'estimation de la distance parcourue à partir du flux optique [en ligne]. Thèse Sciences du Mouvement humain. Marseille : Université d'Aix-Marseille, 2018, 230 p. Disponible sur : <http://www.theses.fr/2018AIXM0254> (consulté le 20.04.2019) [SEC DF]	

insecte social	soziales Insekt
Insecte vivant en société. EXP : Ce sont les termites (datant de plus de 150 millions d'années), des hyménoptères (abeilles, guêpes et bourdons) et les fourmis. RF : Dictionnaire des sciences animales, Insecte social [en ligne]. Disponible sur : <http://dico-sciences-animales.cirad.fr/liste-mots.php?fiche=14690&def=insecte+social> (consulté le 20.04.2019) [DF] [EXP]	
intégration	Integration, Integrieren
Renforcement des connaissances dans la mémoire à long terme. EXP : Cette phase est l'étape où l'information se range dans notre cerveau. C'est le moment où l'on va enregistrer une information dans notre mémoire. Les informations encodées seront gardées et réactivées au besoin et en fonction des situations. REL : perception, restitution RF : DE BARROS A., AISSANOU A., MELIS F., Comment le stress parvient-il à perturber notre processus de mémorisation [en ligne]. Disponible sur : <http://stress-et-memorisation.e-monsite.com/pages/la-memorisation/integration-d-une-information.html> (consulté le 20.04.2019) [DF] [EXP]	
polarisation de la lumière du ciel	polarisiertes Himmelslicht
Lumière polarisée par diffusion au sein d'une atmosphère selon le mécanisme de diffusion de Rayleigh. EXP : La lumière qui parvient à l'observateur depuis les centres de diffusion du ciel est polarisée perpendiculairement au plan formé par le rayon solaire incident et le rayon diffusé vers l'observateur. La vibration est d'autant plus intense que l'angle entre ces deux rayons est proche d'un angle droit. RF : Promenade dans le système solaire, Polarimétrie [en ligne]. Disponible sur : <https://promenade.imcce.fr/fr/pages4/496.html> (consulté le 20.04.2019) [SEC DF] ; ZUPPIROLI L., BUSSAC M.-N., *Traité de la lumière* [en ligne]. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 2009, 481 p. Disponible sur : <https://books.google.fr/books?id=tE2pJZ_u294C&printsec=frontcover&hl=fr&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false> (consulté le 20.04.2019) [EXP]	
ommatidie	Ommatidium
Élément de l'œil composé des arthropodes dit œil à facettes. EXP : L'œil composé avec des ommatidies formées de quatre cellules cristallines disposées en cône, huit cellules photoréceptrices et deux cellules cornéennes, existe probablement depuis plus de 380 millions d'années, et c'est de nos jours encore l'œil de la majorité des insectes et des crustacés, celui des abeilles, scarabées, sauterelles, fourmis, libellules, etc. RF : Dictionnaire des sciences animales, Ommatidie [en ligne]. Disponible sur : < http://dico-sciences-animales.cirad.fr/liste-mots.php?fiche=19399&def=ommatidie> (consulté le 20.04.2019) [SEC DF] ; LE MEN Y., *La vision dans le monde animal* [en ligne]. www.alterpublishing.com, 2015, 415 p. Disponible sur : <https://www.alterpublishing.com/media/wysiwyg/extrait/1144784-La-vision-dans-le-monde-animal-Yves-Le-Men-extrait.pdf> (consulté le 20.04.2019) [SEC EXP]	

parallaxe de mouvement, parallaxe du mouvement	Bewegungsparallaxe
Déplacement apparent de la position relative des objets dû au mouvement de l'observateur. REL : flux optique RF : Carnets2psycho, La définition de Parallaxe [en ligne]. Disponible sur : <https://carnets2psycho.net/dico/sens-de-parallaxe.html> (consulté le 20.04.2019) [SEC DF]	
pouvoir séparateur de l'œil, pouvoir de séparation de l'œil, pouvoir de résolution de l'œil	visuelle Auflösung
Aptitude de l'œil à distinguer des détails proches linéairement ou angulairement. EXP : Le pouvoir de résolution R ou P_r est l'inverse de la limite de résolution, c'est-à-dire la distance minimale d_r (ou l'angle minimal α_r) qui doit séparer deux points objets pour que le système en donne deux points images distincts : $R = 1/d_r$. RF : BRUNEL M., BURKE N., CHÉRIGIER-KOVACIC L. et al., *Physique L1 : cours complet avec exercices corrigés et vidéos* [en ligne]. Montreuil-sous-Bois : Pearson France, 2015, 821 p. Disponible sur : <https://books.google.fr/books?id=9zsjBgAAQBAJ&dq=%22pouvoir+de+r%C3%A9solution%22+et+%22limite+de+r%C3%A9solution%22&hl=fr&source=gbs_navlinks_s> (consulté le 20.04.2019) [SEC EXP]	
proboscis, trompe	Proboscis, Rüssel
Partie piqueuse des pièces buccales des insectes piqueurs comme la glossine ou trompe des insectes suceurs comme les lépidoptères. RF : Dictionnaire des sciences animales, Proboscis [en ligne]. Disponible sur : <http://dico-sciences-animales.cirad.fr/liste-mots.php?fiche=22749&def=proboscis> (consulté le 20.04.2019) [SEC DF]	
radar harmonique	harmonisches Radar, harmonsicher Radar
Type de radar non-linéaire. EXP 1 : Le système est constitué d'une cible qui est fixée sur l'animal étudié et d'un récepteur. EXP 2 : La cible est un transpondeur harmonique qui est constitué d'un conducteur non linéaire, une diode dans ce cas précis, couplé à une antenne. Cet ensemble forme la balise, ou tag en anglais, qui sera identifiée par le récepteur. Quand cette cible est illuminée par un rayon radar, des courants de fréquences harmoniques du signal émetteur sont générés et sont réémis. Le signal retourné diffère des radiations des autres objets et de la végétation, et la balise peut alors être détectée. RF : MARTORELL A., Détection à distance d'électroniques par l'intermodulation [en ligne]. Thèse Électronique. Montpellier : Université de Montpellier, 2018, 172 p. Disponible sur : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02076357/document> (consulté le 20.04.2019) [SEC DF] ; PERRIER L., Le radar harmonique comme technique de pistage des petits animaux [en ligne]. Rapport de recherche bibliographique Ingénerie Documentaire. Lyon : Université Claude Bernard – Lyon 1, 2001, 42 p. Disponible sur : <http://enssibal.enssib.fr/bibliotheque/documents/dessid/rrbperrier.pdf > [EXP 1] [SEC EXP 2]	

rayon	Wabe
Gâteau de cire comportant une double rangée d'alvéoles tassées les unes contre les autres en couches régulières, et dans lesquelles les abeilles élèvent leurs jeunes et emmagasinent miel et pollen. RF : LES AVETTES DU MONT DES FRÊNES, Dico apicole [en ligne]. Disponible sur : <https://les-avettes-du-mont-des-frenes.be/wp-content/uploads/2010/01/dico-apicole-doc.pdf>(consulté le 20.04.2019) [SEC DF]	
stratégie de navigation basée sur un référentiel allocentré, stratégie de navigation basée sur un référentiel allocentrique, stratégie de navigation basée sur un référentiel exocentré	allozentrisches Orientierungssystem
Stratégie de navigation pour laquelle la localisation se fait par rapport à un référentiel centré sur un élément du monde extérieur. EXP : Le référentiel allocentré peut être divisé en deux sous-systèmes : un local et un global (Benhamou, 1997). Le référentiel allocentré local représente les relations entre les indices directement perçus dans l'environnement. Dans ce cas, un but ou un objet peut être localisé par rapport à ces indices dès lors que l'animal se trouve à proximité de ces indices. Dans le référentiel allocentré global, l'animal met en relation au sein d'une représentation unique les différents lieux qui ne sont pas perceptibles simultanément. REL : stratégie de navigation basée sur un référentiel égocentré, stratégie de navigation basée sur un référentiel égocentrique, stratégie de navigation basée sur un référentiel autocentré RF : BURGUIÈRE E., Rôle du cervelet dans la navigation : étude du mécanisme cellulaire de dépression synaptique à long terme des fibres parallèles [en ligne]. Thèse Sciences cognitives. Paris : Université Paris 6, 2006, 236 p. Disponible sur : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00129346/document> (consulté le 20.04.2019) [SEC DF] ; JACOB P.-Y., Rôle du cortex entorhinal médian dans le traitement des informations spatiales : études comportementales et électrophysiologiques [en ligne]. Thèse Neurosciences. Marseille : Université d'Aix-Marseille, 2014, 293 p. Disponible sur <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/tel-01446689/document> (consulté le 03.03.2019) [EXP]	
stratégie de navigation basée sur un référentiel égocentré, stratégie de navigation basée sur un référentiel égocentrique, stratégie de navigation basée sur un référentiel autocentré	egozentrisches Orientierungssystem, egozentrische Orientierungsweise
Stratégie de navigation pour lequel la localisation se fait par rapport à un référentiel centré sur le sujet. REL : stratégie de navigation basée sur un référentiel allocentré, stratégie de navigation basée sur un référentiel allocentrique, stratégie de navigation basée sur un référentiel exocentré RF : BURGUIÈRE E., Rôle du cervelet dans la navigation : étude du mécanisme cellulaire de dépression synaptique à long terme des fibres parallèles [en ligne]. Thèse Sciences cognitives. Paris : Université Paris 6, 2006, 236 p. Disponible sur : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00129346/document> (consulté le 20.04.2019) [SEC DF]	

transpondeur	Transponder
Système qui, lorsqu'il est interrogé par une borne interrogatrice, permet l'identification à distance de personnes ou d'objets en lui renvoyant une réponse codée. EXP : Les éléments de base constituant un transpondeur RFID sont une puce électronique et une antenne (qui se présente généralement sous la forme d'une bobine). RF : LUXEY C., Solutions antennaires pour petits objets communicants et techniques de caractérisation associées [en ligne]. Thèse Électronique. Nice : Université Sophia Antipolis, 2008, 224 p. Disponible sur : <https://www.researchgate.net/profile/Cyril_Luxey/publication/30515108_Solutions_antennaires_pour_petits_objets_communicants_et_techniques_de_caracterisation_associees/links/00b7d52def2f6e2ca0000000/Solutions-antennaires-pour-petits-objets-communicants-et-techniques-de-caracterisation-associees.pdf> (consulté le 20.04.2019) [SEC DF] ; DIGITAL GUIDE, Qu'est-ce que la RFID ? [en ligne]. Disponible sur : <https://www.ionos.fr/digitalguide/serveur/know-how/rfid/> (consulté le 20.04.2019) [EXP]	

vol d'orientation	Orientierungsflug
Vol d'avant en arrière exécuté en face de la ruche et dans ses environs par les jeunes abeilles pour s'accoutumer à leur environnement. EXP : L'abeille effectue d'abord des allées et venues à une faible distance de la ruche (0,50 à 2 m) au niveau du trou d'envol, la tête tournée vers celle-ci. Ce manège ne dure que quelques seconde. L'insecte part alors en ligne droite et à toute vitesse dans une direction quelconque, revient aux abords de la ruche au bout de 3 à 7 mn (sic) et reprend ses vols balancés autour de la planchette d'envol pendant 2 mn environ. RF : LEROY E., *Lexique apicole : les principaux termes utilisés en apiculture* [en ligne]. Books on demand, 2018, 78 p. Disponible sur : <https://books.google.fr/books?id=vv1dDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=fr&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false> (consulté le 20.04.2019) [SEC DF] ; L'orientation. L'année psychologique [en ligne]. 1959, vol.59, n° 2, p. 493-497. Disponible sur : <https://www.persee.fr/doc/psy_0003-5033_1959_num_59_2_8967> (consulté le 20.04.2019) [SEC EXP]	

III. Lexiques

Avertissement au lecteur

Les termes faisant l'objet d'une fiche terminologique sont indiqués en caractères gras.

Les mots et expressions du glossaire sont soulignés.

Lexique allemand-français		
Vedette allemand	**Synonymes**	**Vedette français**
Abkürzung		raccourci
Abstand	Entfernung	distance
aktives Gedächtnis		mémoire active
allozentrisch	exozentrisch	allocentré, allocentrique, exocentré
allozentrische Orientierungsweise		représentation spatiale allocentrée
allozentrisches Orientierungssystem		stratégie de navigation basée sur un référentiel allocentré, stratégie de navigation basée sur un référentiel allocentrique, stratégie de navigation basée sur un référentiel exocentré
angeboren		inné
Areal		parcelle
Assoziation	Verknüpfung	association
assoziatives Gedächtnis		**mémoire associative, mémoire par association**
Auflassstelle		lieu de relâcher, point de relâcher
Ausgangspunkt		point de départ
Bedingung		condition

Belohnung		récompense
Bewegung		Déplacement, mouvement
Bewegungsparallaxe		parallaxe de mouvement, parallaxe du mouvement
Bezugspunkt		repère
Bezugsquelle	Orientierungsmarke	repère
Biene		abeille
Bildgedächtnis	**visuelles Gedächtnis**	**mémoire visuelle**
Blume		fleur
dressieren		dresser
Duft		odeur
Duftmarke	Duftspur	trace odorante
Duftspur	Duftmarke	trace odorante
egozentrisch		égocentré, égocentrique
egozentrische Orientierungsweise	egozentrisches Orientierungssystem	stratégie de navigation basée sur un référentiel égocentré, stratégie de navigation basée sur un référentiel égocentrique, stratégie de navigation basée sur un référentiel autocentré, représentation spatiale allocentrée
egozentrisches Orientierungssystem	egozentrische Orientierungsweise	stratégie de navigation basée sur un référentiel égocentré, stratégie de navigation basée sur un référentiel égocentrique, stratégie de navigation basée sur un référentiel autocentré, représentation spatiale allocentrée
Eingang		entrée
Engramm	**Gedächtnisspur**	**engramme, trace mnésique, trace mémorielle**
Entfernung	Abstand	distance
Entscheiden		prise de décision

Entscheidungsstelle		lieu de prise de décision
Erdmagnetfeld		champ magnétique terrestre
Erfahrung		expérience
Ergiebigkeit		rendement
Erkunden		exploration
erkunden		explorer
Erwartung		attente
exozentrisch	allozentrisch	allocentré, allocentrique, exocentré
Farbe		couleur
Flug		vol
Flugstrecke	Strecke, Wegstrecke, Weg, Route	trajet, chemin, route, itinéraire
Flugvektor		vecteur de vol
freisetzen		libérer
Futterplatz	Futterstelle	lieu de butinage, lieu de nourrissage, point de nourrissage
Futterstelle	Futterplatz	lieu de butinage, lieu de nourrissage, point de nourrissage
Gebiet		territoire
Gedächtnis		mémoire
Gedächtnisform		forme de mémoire
Gedächtnisspur	**Engramm**	**trace mnésique, engramme, trace mémorielle**
Gedächtnisstruktur		structure de mémoire
Gehirn		cerveau
Gehirnbereich		région du cerveau, région de l’encéphale

Gestalt		forme
Handlung		action
harmonischer Radar	harmonisches Radar	radar harmonique
harmonisches Radar	harmonischer Radar	radar harmonique
Harz		résine
Heimflug		vol de retour à la ruche
Hinflug		vol d'aller
Honigbiene		abeille mellifère, abeille domestique
Integration	Integrieren	intégration
Integrieren	Integration	intégration
kognitive Karte	**mentale Karte**	**carte cognitive, carte mentale**
Kommunikation		communication
Kropf		jabot
kurvenreich		sinueux
Landmarke		repère terrestre
Landschaft		paysage
Landschaftsgedächtnis		**mémoire du paysage**
latentes Lernen		**apprentissage latent**
Lernvermögen		capacités d'apprentissage
Lernvorgang		processus d'apprentissage
linear polarisiert		polarisation rectiligne
Manipulierbarkeit		accessibilité
Mechanismus der Wegintegration	**Wegintegration, Wegintegrationsmechanismus**	**intégration de trajet, intégration des trajets, intégration du trajet, intégration de chemin, intégration du chemin**
mentale Karte	**kognitive Karte**	**carte cognitive, carte mentale**

messen		mesurer
Motivation		motivation
Muster		modèle, schéma
Nahrung		nourriture
Nahrungsquelle		source de nourriture
natürliche Tracht		sources naturelles de nectar et de pollen
Navigation		navigation
Navigationsgedächtnis		mémoire de navigation
Navigationsleistung	Navigationsvermögen	capacités de navigation
Navigationsmechanismus		mécanisme de navigation
Navigationsvermögen	Navigationsleistung	capacités de navigation
Nektar		nectar
Nervensystem		système nerveux
Nesthöhle	Niststelle	nid
Neuron		neurone
Nistort		emplacement pour le nid
Niststelle	Nesthöhle	nid
Nummernschild		pastille numérotée
Ommatidium		ommatidie
optischer Fluss		flux optique
Orienterungsmarke	Bezugsquelle	repère
Orientierungsflug		vol d’orientation
Orientierungsvermögen		capacités d’orientation
Orientierungsvermögen		sens de l’orientation
Ort		lieu

Ortsbestimmung		localisation
Pilzkörper		corps pédonculé
polarisiertes Himmelslicht		polarisation de la lumière du ciel
Pollen		pollen
Proboscis	Rüssel	proboscis, trompe
Produktivität		productivité
Raum		espace
Raumgedächtnis	**räumliches Gedächtnis, topographisches Gedächtnis**	**mémoire spatiale, mémoire topograhique, mémoire des lieux**
räumliches Gedächtnis	**Raumgedächtnis, topographisches Gedächtnis**	**mémoire spatiale, mémoire topograhique, mémoire des lieux**
rekrutierte Biene		abeille recrutée
Richtung		direction
Rotationsbiene		abeille à source tournante
rotatorische Komponente		composante rotationnelle
Route	Flugstrecke, Strecke, Weg, Wegstrecke,	route, trajet, chemin, itinéraire
Routenbiene		abeille à route
Routengedächtnis		**mémoire des trajets, mémoire du trajet, mémoire de route**
Rüssel	Proboscis	proboscis, trompe
sammeln		récolter
Schwänzeltanz		danse en huit, danse frétillante, danse oscillante
schwärmen		essaimer
sich orientieren		s'orienter
Signal		signal
Sinnesleistung		sensorialité

Sonne		soleil
Sonnenazimut		azimut solaire
Sonnenbewegung		mouvement du soleil
Sonnenkompass		boussole solaire, compas solaire
soziales Insekt		insecte social
speichern		enregistrer, stocker
Stelle		lieu, endroit
Stock		ruche
Strecke	Wegstrecke, Flugstrecke, Weg, Route	trajet, chemin, route, itinéraire
Suchflug		vol de repérage
Suchphase		phase de repérage
Tanz		danse
Tänzerin		danseuse
Teilvektor		vecteur local
topographisches Gedächtnis	**Raumgedächtnis, topographisches Gedächtnis**	**mémoire spatiale, mémoire topograhique, mémoire des lieux**
translatorische Komponente		composante translationnelle
Transponder		transpondeur
Umgebung		environnement
Umweg		détour
Untersuchung		étude
Vektorgedächtnis		mémoire vectorielle
Verhalten		comportement
Verknüpfung	Assoziation	association
versetzen		déplacer

visuelle Auflösung		pouvoir de séparation de l'œil, pouvoir de résolution de l'œil, pouvoir séparateur de l'œil
visuelle Bestimmung		estimation visuelle
visuelles Gedächtnis	**Bildgedächtnis**	**mémoire visuelle**
Volk		colonie
Wabe		rayon
Wahrnehmungsleistung		faculté de perception
Wahrnehmungssystem		système de perception
Wasser		eau
Weg	Wegstrecke, Strecke, Flugstrecke, Route	trajet, chemin, route, itinéraire
Wegintegration	**Mechanismus der Wegintegration, Wegintegrationsmechanismus**	**intégration de trajet, intégration des trajets, intégration du trajet, intégration de chemin, intégration du chemin**
Wegintegrationsmechanismus	**Wegintegration, Mechanismus der Wegintegration**	**intégration de trajet, intégration des trajets, intégration du trajet, intégration de chemin, intégration du chemin**
Wegstrecke	Strecke, Flugstrecke, Weg, Route	trajet, chemin, route, itinéraire
Zeitsinn		notion du temps
Zielort		destination

Lexique français-allemand		
Vedette français	**Synonymes**	**Vedette allemand**
abeille		Biene
abeille à route		Routenbiene
abeille à source tournante		Rotationsbiene
abeille domestique	abeille mellifère	Honigbiene
abeille mellifère	abeille domestique	Honigbiene
abeille recrutée		rekrutierte Biene
accessibilité		Manipulierbarkeit
action		Handlung
allocentré	allocentrique, exocentré	allozentrisch, exozentrisch
allocentrique	allocentré, exocentré	allozentrisch, exozentrisch
apprentissage latent		**latentes Lernen**
association		Assoziation, Verknüpfung
attente		Erwartung
azimut solaire		Sonnenazimut
boussole solaire	compas solaire	Sonnenkompass
capacités d'apprentissage		Lernvermögen
capacités de navigation		Navigationsvermögen, Navigationsleistung
capacités d'orientation		Orientierungsvermögen
carte cognitive	**carte mentale**	**kognitive Karte, mentale Karte**
carte mentale	**carte cognitive**	**kognitive Karte, mentale Karte**
cerveau		Gehirn
champ magnétique terrestre		Erdmagnetfeld

chemin	trajet, route, itinéraire	Strecke, Weckstrecke, Flugstrecke, Route
colonie		Volk
communication		Kommunikation
compas solaire	boussole solaire	Sonnenkompass
comportement		Verhalten
composante rotationnelle		rotatorische Komponente
composante translationnelle		translatorische Komponente
condition		Bedingung
corps pédonculé		Pilzkörper
couleur		Farbe
danse		Tanz
danse en huit	danse frétillante, danse oscillante	Schwänzeltanz
danse frétillante	danse en huit, danse oscillante	Schwänzeltanz
danse oscillante	danse frétillante, danse en huit	Schwänzeltanz
danseuse		Tänzerin
déplacement		Bewegung
déplacer		versetzen
destination		Zielort
détour		Umweg
direction		Richtung
distance		Abstand, Entfernung
dresser		dressieren
eau		Wasser
égocentré	égocentrique	egozentrisch

égocentrique	égocentré	egozentrisch
emplacement pour le nid		Nistort
endroit	lieu	Stelle
engramme	**trace mnésique, trace mémorielle**	**Gedächtnisspur**
enregistrer		speichern
entrée		Eingang
environnement		Umgebung
espace		Raum
essaimer		schwärmen
estimation visuelle		visuelle Bestimmung
étude		Untersuchung
exocentré	allocentrique, allocentré	allozentrisch, exozentrisch
expérience		Erfahrung
exploration		Erkunden
explorer		erkunden
faculté de perception		Wahrnehmungsleistung
fleur		Blume
flux optique		optischer Fluss
forme		Gestalt
forme de mémoire		Gedächtnisform
inné		angeboren
insecte social		soziales Insekt
intégration		Integrieren, Integration

intégration de chemin		**Wegintegration, Mechanismus der Wegintegration, Wegintegrationsmechanismus**
intégration de trajet		**Wegintegration, Mechanismus der Wegintegration, Wegintegrationsmechanismus**
intégration des trajets		**Wegintegration, Mechanismus der Wegintegration, Wegintegrationsmechanismus**
intégration du chemin		**Wegintegration, Mechanismus der Wegintegration, Wegintegrationsmechanismus**
intégration du trajet		**Wegintegration, Mechanismus der Wegintegration, Wegintegrationsmechanismus**
itinéraire	trajet, chemin, route	Weg, Strecke, Weckstrecke, Flugstrecke, Route
jabot		Kropf
libérer		freisetzen
lieu	endroit	Ort, Stelle
lieu de butinage	lieu de nourrissage, point de nourrissage	Futterstelle, Futterplatz
lieu de nourrissage	lieu de butinage, point de nourrissage	Futterstelle, Futterplatz
lieu de relâcher		Auflassstelle
localisation		Ortsbestimmung
mécanisme de navigation		Navigationsmechanismus
mémoire		Gedächtnis
mémoire active		aktives Gedächtnis
mémoire associative		**assoziatives Gedächtnis**
mémoire de navigation		Navigationsgedächtnis

mémoire de route	**mémoire des trajets, mémoire du trajet**	**Routengedächtnis**
mémoire des lieux	**mémoire topographique, mémoire spatiale**	**Raumgedächtnis, räumliches Gedächtnis, topographisches Gedächtnis**
mémoire des trajets	**mémoire du trajet, mémoire de route**	**Routengedächtnis**
mémoire du paysage		**Landschaftsgedächtnis**
mémoire du trajet	**mémoire des trajets, mémoire de route**	**Routengedächtnis**
mémoire par association		**assoziatives Gedächtnis**
mémoire spatiale	**mémoire topographique, mémoire des lieux**	**Raumgedächtnis, räumliches Gedächtnis, topographisches Gedächtnis**
mémoire topographique	**mémoire spatiale, mémoire des lieux**	**Raumgedächtnis, räumliches Gedächtnis, topographisches Gedächtnis**
mémoire vectorielle		Vektorgedächtnis
mémoire visuelle		**Bildgedächtnis, visuelles Gedächtnis**
mesurer		messen
modèle	schéma	Muster
motivation		Motivation
mouvement		Bewegung
mouvement du soleil		Sonnenbewegung
navigation		Navigation
nectar		Nektar
neurone		Neuron
nid		Nesthöhle, Niststelle
notion du temps		Zeitsinn

nourriture		Nahrung
odeur		Duft
ommatidie		Ommatidium
parallaxe de mouvement	parallaxe du mouvement	Bewegungsparallaxe
parallaxe du mouvement	parallaxe de mouvement	Bewegungsparallaxe
parcelle		Areal
pastille numérotée		Nummernschild
paysage		Landschaft
phase de repérage		Suchphase
point de départ		Ausgangspunkt
point de nourrissage	lieu de nourrissage, lieu de butinage	Futterstelle, Futterplatz
point de relâcher		Auflassstelle
polarisation de la lumière du ciel		polarisiertes Himmelslicht
polarisation rectiligne		linear polarisiert
pollen		Pollen
pouvoir de résolution de l'œil	pouvoir de séparation de l'œil, pouvoir séparateur de l'œil	visuelle Auflösung
pouvoir de séparation de l'œil	pouvoir de résolution de l'œil, pouvoir séparateur de l'œil	visuelle Auflösung
pouvoir séparateur de l'œil	pouvoir de résolution de l'œil, pouvoir de séparation de l'œil	visuelle Auflösung
prise de décision		Entscheiden
proboscis	trompe	Proboscis, Rüssel
processus d'apprentissage		Lernvorgang
productivité		Produktivität
raccourci		Abkürzung

radar harmonique		harmonischer Radar , harmonisches Radar
rayon		Wabe
récolter		sammeln
récompense		Belohnung
région de l'encéphale		Gehirnbereich
région du cerveau		Gehirnbereich
rendement		Ergiebigkeit
repère		Bezugspunkt
repère		Bezugsquelle, Orientierungsmarke
repère terrestre		Landmarke
représentation spatiale allocentrée		allozentrische Orientierungsweise
représentation spatiale allocentrée	stratégie de navigation basée sur un référentiel égocentrique, stratégie de navigation basée sur un référentiel égocentré, stratégie de navigation basée sur un référentiel autocentré	egozentrisches Orientierungssystem, egozentrische Orientierungsweise
résine		Harz
route	trajet, chemin, itinéraire	Route, Weg, Strecke, Weckstrecke, Flugstrecke
ruche		Stock
schéma	modèle	Muster
sens de l'orientation		Orientierungsvermögen
sensorialité		Sinnesleistung
signal		Signal
sinueux		kurvenreich
soleil		Sonne

s'orienter		sich orientieren
source de nourriture		Nahrungsquelle
sources naturelles de nectar et de pollen		natürliche Tracht
stocker		speichern
stratégie de navigation basée sur un référentiel allocentré	stratégie de navigation basée sur un référentiel allocentrique, stratégie de navigation basée sur un référentiel exocentré	allozentrisches Orientierungssystem
stratégie de navigation basée sur un référentiel allocentrique	stratégie de navigation basée sur un référentiel allocentré, stratégie de navigation basée sur un référentiel exocentré	allozentrisches Orientierungssystem
stratégie de navigation basée sur un référentiel autocentré	stratégie de navigation basée sur un référentiel égocentrique, stratégie de navigation basée sur un référentiel égocentré, représentation spatiale allocentrée	egozentrisches Orientierungssystem, egozentrische Orientierungsweise
stratégie de navigation basée sur un référentiel égocentré	stratégie de navigation basée sur un référentiel égocentrique, stratégie de navigation basée sur un référentiel autocentré, représentation spatiale allocentrée	egozentrisches Orientierungssystem, egozentrische Orientierungsweise
stratégie de navigation basée sur un référentiel égocentrique	stratégie de navigation basée sur un référentiel égocentré, stratégie de navigation basée sur un référentiel autocentré, représentation spatiale allocentrée	egozentrisches Orientierungssystem, egozentrische Orientierungsweise
stratégie de navigation basée sur un référentiel exocentré	stratégie de navigation basée sur un référentiel allocentré, stratégie de navigation basée sur un référentiel allocentrique	allozentrisches Orientierungssystem
structure de mémoire		Gedächtnisstruktur
système de perception		Wahrnehmungssystem
système nerveux		Nervensystem
territoire		Gebiet
trace mémorielle	**engramme, trace mnésique**	**Gedächtnisspur**

trace mnésique	**engramme, trace mémorielle**	**Gedächtnisspur**
trace odorante		Duftmarke, Duftspur
trajet	chemin, route, itinéraire	Weg, Strecke, Weckstrecke, Flugstrecke, Route
transpondeur		Transponder
trompe	proboscis	Proboscis, Rüssel
vecteur de vol		Flugvektor
vecteur local		Teilvektor
vol		Flug
vol d'aller		Hinflug
vol de repérage		Suchflug
vol de retour à la ruche		Heimflug
vol d'orientation		Orientierungsflug

BIBLIOGRAPHIES

I. Bibliographie des ouvrages cités dans l'exposé

AVARGUÈS-WEBER A., GIURFA M., Conceptual learning by miniature brain. *Proceedings of The Royal Society B.* [en ligne]. 2013, vol. 280, n° 43, p. 1-8. Disponible sur : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3813328/pdf/rspb20131907.pdf> (consulté le 01.04.2019)

AVARGUÈS-WEBER A., PORTELLI G., BERNARD J. et al., Configural processing enables discrimination and categorization of face-like stimuli in honeybees. *Journal of Experimental Biology.* [en ligne]. 2010, n° 213, p. 593-601. Disponible sur : <http://jeb.biologists.org/content/jexbio/213/4/593.full.pdf> (consulté le 01.04.2019)

BOSSARD M., Perception visuelle du mouvement propre : effets des mouvements de la tête durant la marche sur l'estimation de la distance parcourue à partir du flux optique [en ligne]. Thèse Sciences du Mouvement Humain. Marseille : Université d'Aix-Marseille, 2018, 230 p. Disponible sur : <http://www.theses.fr/2018AIXM0254> (consulté le 20.04.2019)

CHEESEMAN J.F., MILLAR C.D., REGGERS U. et al. Way-finding in displaced clock-shifted bees proves bees use a cognitive map. Proceedings of the National Academy of Sciences. [en ligne]. 2014, vol. 111, n° 24, p. 8949–8954. Disponible sur : <https://www.pnas.org/content/111/24/8949> (consulté le 01.04.2019)

CHITTKA L., GEIGER K., Can honey bees count landmarks, *Animal Behaviour.* [en ligne]. 1995, vol. 49, p. 159-164. Disponible sur : <http://chittkalab.sbcs.qmul.ac.uk/1995/ChittkaGeiger_AnBehav95.pdf> (consulté le 01.04.2019)

COLLETT M., CHITTKA L., COLLETT T.S., Spatial Memory in Insect Navigation. *Current Biology* [en ligne]. 2013, vol 23, n° 17, p. R789-R800. Disponible sur : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960982213008439> (consulté le 01.04.2019)

DEBROISE A., Les abeilles jouent-elles collectif ? *La Recherche*. [en ligne]. 2016, Hors-série n° 18, p. 70-73. Disponible sur : <https://www.larecherche.fr/les-abeilles-jouent-elles-collectif> (consulté le 01.04.2019)

DEVAUD J.-M., PAPOUIN T., CARCAUD J. et al., Neural substrate for higher order learning in an insect: Mushroom bodies are necessary for configural discriminations. *Proceedings of The National Academy of Sciences USA*. [en ligne]. 2015 vol 112, n° 43, p. E58541-E5862. Disponible sur : <https://www.pnas.org/content/112/43/E5854.abstract> (consulté le 01.04.2019)

FAYET A., Intelligence de l'abeille. *Abeilles & C^ie^*. [en ligne]. 2014, n° 158, p. 25-28. Disponible sur : <http://www.cari.be/medias/abcie_articles/biologie_158.pdf> (consulté le 01.04.2019)

GIURFA M., Mini cerveau et méga performances : Comprendre la cognition à partir d'une abeille. 04.02.2015, Poitiers [vidéo] [en ligne]. Disponible sur : <https://uptv.univ-poitiers.fr/program/les-amphis-du-savoir-2015/video/4616/mini-cerveau-et-mega-performances-comprendre-la-cognition-a-partir-d-une-abeille/index.html> (consulté le 01.04.2019)

GREGGERS U., KOCH G., SCHMIDT V. et al. Reception and learning of electric fields in bees. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Science.* [en ligne]. 2013, n° 274, p. 1–8. Disponible sur : < https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rspb.2013.0528> (consulté le 01.04.2019)

HOWARD S., AVARGUÈS-WEBER A., GARCIA J.E. et al., Numerical cognition in honeybees enables addition and subtraction. *Science Advances* [en ligne]. 2019, vol 5, n° 2, p. 1–6. Disponible sur : <http://advances.sciencemag.org/content/5/2/eaav0961/tab-pdf> (consulté le 01.04.2019)

HOWARD S., AVARGUÈS-WEBER A, GARCIA J.E. et al., Numerical ordering of zero in honey bees. *Science*. [en ligne]. 2018, vol 360, n° 6393, p. 1124-1126. Disponible sur :

<https://www.researchgate.net/publication/325684091_Numerical_ordering_of_zero_in_honey_bees> (consulté le 01.04.2019)

KIEVITS J., La carte et la boussole (1). *Abeilles & C^ie^*. [en ligne]. 2010a, n° 135, p. 11-14. Disponible sur : <http://www.cari.be/medias/abcie_articles/135_bio.pdf> (consulté le 01.04.2019)

KIEVITS J., La carte et la boussole (2). *Abeilles & C^ie^*. [en ligne]. 2010b, n° 136, p. 30-32. Disponible sur : <http://www.cari.be/medias/abcie_articles/136_bio.pdf> (consulté le 01.04.2019)

KIEVITS J., L'intelligence individuelle de l'abeille. *Labyrinthe.* [en ligne]. 2013, n° 40, p. 43-45. Disponible sur : <https://journals.openedition.org/labyrinthe/4308> (consulté le 01.04.2019)

KIEVITS J., Une petite tête bien faite. *Abeilles & C^ie^*. [en ligne]. 2009, n° 133, p. 21–23. Disponible sur : < http://www.cari.be/medias/abcie_articles/133_bio.pdf> (consulté le 01.04.2019)

KLEIN A.M., VAISSIERE B.E. CANE J. et al., Importance of pollinisators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences.* [en ligne]. 2007, vol. 274, n° 1608, p. 303-313. Disponible sur : <https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rspb.2006.3721> (consulté le 01.04.2019)

MACQUART D., Cognition spatiale chez la fourmi *Gigantiops destructor* (Hymenopter, Formicidae) : étude expérimentale du suivi de route [en ligne]. Thèse Neurosciences. Toulouse : Université Paul Sabatier – Toulouse III, 2008, 157 p. Disponible sur <http://thesesups.ups-tlse.fr/1211/1/Macquart_David.pdf> (consulté le 03.03.2019)

MAIROT J. et P., Bio propolis : Mieux connaitre les vertus de la propolis [en ligne]. Disponible sur : <https://www.biopropolis.fr/les-produits-de-la-ruche/> (consulté le 01.04.2019)

MENZEL R., ECKOLDT M., *Die Intelligenz der Bienen: Wie sie denken, planen, fühlen und was wir daraus lernen können.* 3e éd. Münich : Albrecht Knaus Verlag, 2016, p. 245-263.

QUENDOLO, D., *Les abeilles : biologie et comportement.* Paris : Éditions Frison-Roche, 2016, 464 p.

ROUGIER N. Modèles de mémoire pour la navigation autonome [en ligne]. Thèse Informatique. Nancy : Université Henri Poincaré – Nancy 1, 2011, 181 p. Disponible sur <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01746477v2/document> (consulté le 03.03.2019)

TAUTZ J., *L'étonnante abeille*. Bruxelles : Éditions De Boeck Université, 2009, 278 p.

VON FRISCH K., *Vie et mœurs des abeilles*. 3e éd. Paris : Éditions Albin Michel, 2011, p. 133-154. (Bibliothèque Sciences)

II. Bibliographie des ouvrages cités dans la stratégie de traduction

BOUGUET N., JOYEUX H., Les abeilles et le chirurgien [en ligne]. 2e éd. Monaco : Éditions du Rocher, 2014, 310 p. (Ouvertures Psychologiques) Disponible sur : <https://books.google.fr/books?id=yhnSDQAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=fr&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false> (consulté le 01.04.2019)

Duden, Tracht [en ligne]. Disponible sur : <https://www.duden.de/rechtschreibung/Tracht> (consulté le 01.04.2019)

Enzyklo, Bildgedächtnis [en ligne]. Disponible sur : <http://www.enzyklo.de/Begriff/Bildged%C3%A4chtnis> (consulté le 01.04.2019)

EHRLICH A., Terminologie der Chiroptera Deutsch-Französisch [en ligne]. Thèse Philosophie. Vienne: Universität Wien, 2009, 291 p. Disponible sur : <https://core.ac.uk/download/pdf/11587672.pdf> (consulté le 01.04.2019)

MENZEL R., BRANDT R., GUMBERT A. et al., Two spatial memories for honeybee navigation. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences.* [en ligne]. 2000, vol. 267 n° 1447, p. 961-968. Disponible sur : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1690634/ > (consulté le 01.04.2019)

MENZEL R., ECKOLDT M., *Die Intelligenz der Bienen: Wie sie denken, planen, fühlen und was wir daraus lernen können.* 3e éd. Munich : Albrecht Knaus Verlag, 2016, 366 p.

Spektrum, Räumliches Gedächtnis [en ligne]. Disponible sur : <https://www.spektrum.de/lexikon/neurowissenschaft/raeumliches-gedaechtnis/10754> (consulté le 01.04.2019)

III. Bibliographie critique et sélective

Avertissement au lecteur

Les sources considérées comme incontournables sont précédées d'un *.

1. Sources en français

OUVRAGES :

*DARMAILLACQ S., LÉVY F., *Éthologie animale : une approche biologique du comportement* [en ligne]. Paris : De Boeck Supérieur, 2015, 248 p. (Ouvertures Psychologiques) Disponible sur : <https://books.google.fr/books?id=ENLRDgAAQBAJ&pg=PA58&lpg=PA58&dq=navigation+%22int%C3%A9gration+de%22+%22translation%22+abeilles&source=bl&ots=iStukXxOOJ&sig=ACfU3U3ZAw1cGzHgWdwNVnxHa8KTFWKcWA&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKEwiDtZ3Z5rrgAhWGEBQKHVjMAPEQ6AEwAHoECAQ

QAQ#v=onepage&q=navigation%20%22int%C3%A9gration%20de%22%20%22translation%22%20abeilles&f=false> (consulté le 01.04.2019)

Cet ouvrage présente les connaissances actuelles en matière d'éthologie animale. Il n'est donc pas spécifiquement consacré aux abeilles, mais certains chapitres s'appuient sur des découvertes réalisées en apidologie.

Le chapitre 2, intitulé « L'utilisation de l'espace », m'a été particulièrement utile pour comprendre les différents mécanismes de navigation utilisés par les abeilles et a ainsi grandement amélioré ma compréhension et ma traduction du texte-support.

*TAUTZ J., *L'étonnante abeille*. Bruxelles : Éditions De Boeck Université, 2009, 278 p.

Plus récent, cet ouvrage approfondit, à la lumière des nouvelles découvertes, les informations fournies par le livre de Karl von Frisch et présente, en outre, de très belles photographies de Helga Heilmann.

Il s'agit d'un ouvrage très complet et accessible permettant de comprendre le fonctionnement d'une colonie d'abeilles et les caractéristiques physiques et cognitives de ces insectes. Je me suis principalement appuyée sur les chapitres 4 (« Ce que les abeilles savent des fleurs ») et 8 (« Une intelligence programmée ») lors de la rédaction de mon mémoire.

*VON FRISCH K., *Vie et mœurs des abeilles*. 3e éd. Paris : Éditions Albin Michel, 2011, 250 p. (Bibliothèque Sciences)

Publié pour la première fois en allemand (sous le titre *Aus dem Leben der Bienen*) en 1927, cet ouvrage est aujourd'hui encore une référence pour les apidologues et les amoureux des abeilles. C'est dans ce livre que Karl von Frisch expose pour la première fois sa théorie sur la communication des abeilles, une théorie qui reste incontestée.

L'ouvrage, très bien structuré (en quinze chapitres portant chacun sur un point précis), présente l'avantage de comporter de nombreux schémas et photos, qui clarifient les passages les plus complexes. Bien que l'ensemble du livre soit extrêmement intéressant, les chapitres 9, 10 et 11, portant respectivement sur la vision des abeilles, leur sens de l'orientation et leur mode de communication, m'ont été particulièrement utiles lors de la rédaction de ce mémoire.

ZUPPIROLI L., BUSSAC M.-N., *Traité de la lumière* [en ligne]. 1re éd. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 2009, 481 p. Disponible sur : <https://books.google.fr/books?id=tE2pJZ_u294C&printsec=frontcover&dq=trait%C3%A9+de+la+lumi%C3%A8re+zuppiroli&hl=fr&sa=X&ved=0ahUKEwic_ffG5brgAhWkAGMBHSR5BrYQ6AEIKTAA#v=onepage&q=polaris%C3%A9e&f=false> (consulté le 01.04.2019)

Ouvrage exhaustif sur les phénomènes physiques se rapportant à la lumière. Il débute par une introduction sur l'origine de la lumière, puis comprend plusieurs chapitres consacrés à un type de lumière ou des phénomènes physiques.

Pour la rédaction de l'exposé du sujet, le chapitre intitulé « Lumière hertzienne », et plus précisément la sous-partie consacrée à la polarisation de la lumière, a été particulièrement utile, car, si le langage était parfois assez technique, les nombreux schémas facilitaient la compréhension. En outre, plusieurs pages de ce chapitre sont consacrées à l'utilisation de la lumière polarisée par les abeilles.

ARTICLES :

AVARGUÈS-WEBER A., L'intelligence des abeilles. *Pour la Science.* [en ligne]. 2013, no 429, p. 20-27.

Article consacré aux facultés cognitives des abeilles, décrivant plusieurs expériences réalisées dans ce domaine.

Cet article m'a servi principalement pour la rédaction de l'exposé du sujet. Il reprend, de manière simplifiée, les expériences et les résultats décrits dans les publications scientifiques (en anglais) d'Aurore Avarguès-Weber et de son équipe, ce qui m'a permis de mieux comprendre certains points très techniques et de dégager l'essentiel.

*KIEVITS J., Une petite tête bien faite. *Abeilles & C^ie^*. [en ligne]. 2009, n° 133, p. 21-23. Disponible sur : < http://www.cari.be/medias/abcie_articles/133_bio.pdf> (consulté le 01.04.2019) ; KIEVITS J., La carte et la boussole (1). *Abeilles & C^ie^*. [en ligne]. 2010a, n° 135, p. 11-14. Disponible sur : <http://www.cari.be/medias/abcie_articles/135_bio.pdf> (consulté le 01.04.2019) ; KIEVITS J., La carte et la boussole (2). *Abeilles & C^ie^*. [en ligne]. 2010b, n° 136, p. 30-32. Disponible sur : <http://www.cari.be/medias/abcie_articles/136_bio.pdf> (consulté le 01.04.2019) ; KIEVITS J., L'intelligence individuelle de l'abeille. *Labyrinthe.* [en ligne]. 2013, n° 40, p. 43-45. Disponible sur : <https://journals.openedition.org/labyrinthe/4308> (consulté le 01.04.2019)

Ces différents articles de vulgarisation, rédigés par Janine Kievits pour les revues *Abeilles & C^ie^* et *Labyrinthe* présentent l'état de la recherche concernant les capacités d'apprentissage, de mémorisation et de navigation des abeilles.

Le grand avantage de ces articles est qu'ils sont rédigés en français par une spécialiste du domaine, Janine Kievits étant apicultrice, ancienne chargée de mission de la Fédération wallonne des associations environnementales, et conférencière spécialisée dans la disparition des abeilles. En outre, elle s'appuie directement sur les publications de l'auteur du texte-support du mémoire et cela m'a donc permis à la fois de mieux comprendre celui-ci, et de trouver des équivalents en français des termes allemands.

THÈSES :

JACOB P.-Y., Rôle du cortex entorhinal médian dans le traitement des informations spatiales : études comportementales et électrophysiologiques [en ligne]. Thèse Neurosciences. Marseille : Université d'Aix-Marseille, 2014, 293 p. Disponible sur <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/tel-01446689/document> (consulté le 03.03.2019)

Thèse de neurosciences portant sur la mémoire, la mémoire spatiale et leur utilisation.

Outre sa structuration claire, son traitement exhaustif du sujet, et sa rédaction agréable à lire, cette thèse présente de nombreux schémas, dont j'ai repris certains dans mon exposé du sujet. Elle m'a également été utile pour la traduction, puisqu'elle porte sur le même sujet que mon texte-support, à savoir l'orientation spatiale et la navigation.

MACQUART D., Cognition spatiale chez la fourmi *Gigantiops destructor* (Hymenopter, Formicidae) : étude expérimentale du suivi de route [en ligne]. Thèse Neurosciences. Toulouse : Université Paul Sabatier – Toulouse III, 2008, 157 p. Disponible sur <http://thesesups.ups-tlse.fr/1211/1/Macquart_David.pdf> (consulté le 03.03.2019)

Thèse de neurosciences sur la cognition spatiale d'une espèce de fourmi, *Gigantiops destructor*, comprenant une introduction générale sur la représentation spatiale et la navigation chez les hyménoptères.

Les mécanismes de navigation et d'orientation étant similaires chez de nombreuses espèces animales (hommes, oiseaux, insectes, etc.), l'introduction générale de cette thèse m'a fourni des informations utiles pour la rédaction de l'exposé et la traduction du texte-support.

VIDÉOS :

*GIURFA M., Mini cerveau et méga performances : Comprendre la cognition à partir d'une abeille. 04.02.2015, Poitiers [vidéo] [en ligne]. Disponible sur : <https://uptv.univ-poitiers.fr/program/les-amphis-du-savoir-2015/video/4616/mini-cerveau-et-mega-performances-comprendre-la-cognition-a-partir-d-une-abeille/index.html> (consulté le 01.04.2019)

Martin Giurfa est l'un des spécialistes français des abeilles. Dans cette conférence du 4 février 2015, filmée puis diffusée sur le site internet de l'université de Poitiers, il expose les différentes capacités cognitives des abeilles, notamment leurs facultés en matière d'apprentissage et de mémorisation, et évoque les zones du cerveau possiblement impliquées dans ces facultés.

Martin Giurfa connaît très bien son sujet, il en parle de façon à la claire, précise et intéressante. Il explique les méthodes utilisées par les chercheurs pour étudier les abeilles et donne de nombreux exemples concrets, dont j'ai repris certains dans l'exposé du sujet.

2. Sources en allemand et en anglais

OUVRAGES :

BÖHNERT M., KÖCHY K., WUNSCH M., *Philosophie der Tierforschung: Band 1: Methoden und Programme* [en ligne].Fribourg/ Münich : Verlag Karl Alber, 2016, 376 p. Disponible sur : <https://books.google.fr/books?id=dR9hDgAAQBAJ&pg=PA342&lpg=PA342&dq=%22wegintegrationsmechanismus%22&source=bl&ots=G7Jm7q8-9J&sig=ACfU3U0x8NnuPQ_oDHo6Bh146eckgJDCAg&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKEwigj8Gk6MfhAhWly4UKHXw8AAEQ6AEwAHoECAMQAQ#v=onepage&q=%22wegintegrationsmechanismus%22&f=false> (abgerufen am 01.04.2019)

Cet ouvrage contient des articles rédigés par différents scientifiques sur la recherche animale.

Je me suis principalement appuyée sur le chapitre de Randolf Menzel, intitulé « Von der reduktionistischen zur kognitiven Verhaltensbiologie. Wie Verhaltensbiologen über Kognition bei Tieren streiten – Forschungen über die Navigation bei Insekten », que l'auteur lui-même m'a envoyé par courriel au début de notre correspondance, lorsque je cherchais un texte-support. Il reprend des éléments de ce dernier, avec une approche plus philosophique certes, mais apportant tout de même des clarifications.

GERRIG R.J., ZIMBARDO P.G., *Psychologie* [en ligne]. 18e éd. Münich : Pearson Studium, 2008, 830 p. Disponible sur : < https://books.google.fr/books?id=NWgpf2IG12IC&pg=PA258&lpg=PA258&dq=%22ged%C3%A4chtnisstrukturen%22+psychologie&source=bl&ots=gGMn_UNn0U&sig=ACfU3U2eomWIyEY3QhVJ5wqD6sSKNJrVXQ&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKEwjHp9--zaLhAhWx5OAKHSUrCDQQ6AEwBnoECAcQAQ#v=onepage&q=%22ged%C3%A4chtnisstrukturen%22%20psychologie&f=false> (consulté le 01.04.2019)

Ouvrage traduit de l'américain et considéré comme l'un des plus complets sur la psychologie. Destiné à des étudiants en psychologie, il traite, entre autres, de la psychologie en tant que science, du comportement, des sens et de la perception, de la conscience, de l'apprentissage, de la mémoire, de l'intelligence, du développement, de la motivation, des émotions, ou encore des troubles psychiques.

Ce livre, et plus particulièrement les chapitres sur la mémoire et l'apprentissage, m'ont fourni des précisions sur les différents mécanismes d'apprentissage et de mémorisation évoqués dans l'article de Randolf Menzel, me permettant ainsi de mieux comprendre les concepts et donc de trouver plus facilement leur équivalent en français.

*MENZEL R., ECKOLDT M., *Die Intelligenz der Bienen: Wie sie denken, planen, fühlen und was wir daraus lernen können.* 3e éd. Munich : Albrecht Knaus Verlag, 2016, 366 p.

L'ouvrage allemand de vulgarisation le plus récent sur les abeilles. Comme les ouvrages de Karl von Frisch et de Jürgen Tautz, il est très complet et comprend de nombreuses illustrations. Randolf Menzel y évoque à la fois sa rencontre avec les abeilles, son travail de scientifique et ses connaissances dans ses domaines de spécialité, l'apidologie et la neurobiologie.

Si certains passages de ce livre sont très techniques et rappellent plus la publication scientifique que l'article de vulgarisation, il a l'avantage d'avoir été écrit par le même auteur que le texte-support de mon mémoire, et le sujet de l'article y est donc expliqué de façon un peu moins détaillée, dans la première partie du chapitre 5 (« Navigation: Wie kommen Bienen ans Ziel? »). Cela m'a permis de mieux comprendre certains passages de l'article. Ce livre m'a également aidée à enrichir l'exposé du sujet des découvertes les plus récentes sur les abeilles.

ARTICLES :

COLLETT M., CHITTKA L., COLLETT T.S., Spatial Memory in Insect Navigation. *Current Biology* [en ligne]. 2013, vol 23, no 17, p. R789-R800. Disponible sur : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960982213008439> (consulté le 01.04.2019)

Article scientifique présentant les différents types de mémoire spatiale utilisés par les insectes, notamment les abeilles et les fourmis, pour leur navigation.

Si cet article met en doute la théorie de Randolf Menzel, selon laquelle les abeilles utiliseraient une carte cognitive pour s'orienter dans l'espace, les informations fournies sur l'intégration de trajet m'ont été utiles pour la traduction.

*MENZEL R., BRANDT R., GUMBERT A. et al., Two spatial memories for honeybee navigation. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences.* [en ligne]. 2000, vol. 267 n° 1447, p. 961-968. Disponible sur : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1690634/ > (consulté le 01.04.2019)

Article de Randolf Menzel et son équipe présentant leurs découvertes en matière de navigation spatiale de l'abeille, et notamment leur recours à deux types de mémoires spatiales : la « specialized route memory » et la « general landscape memory ».

C'est grâce à cet article que j'ai pu comprendre les nuances dans l'article de Monsieur Menzel et résoudre certains problèmes terminologiques. Le texte-support, plus récent, apporte des précisions absentes dans l'article, mais l'hypothèse de base des chercheurs n'a pas changé.

THÈSES :

CHATZIASTROS A., Visuelle Kontrolle der Lokomotion [en ligne]. Thèse Sciences naturelles. Giessen : : Justus-Liebig-Universität, 2003, 243 p. Disponible sur < http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/2004/1643/pdf/ChatziastrosAstros-2003-05-27.pdf (consulté le 03.03.2019)

Thèse de sciences naturelles sur le lien entre vision et navigation. Elle ne porte pas spécifiquement sur l'abeille, mais une grande partie de l'argumentation s'appuie sur des expériences réalisées auprès d'abeilles.

L'introduction de cette thèse est consacrée au flux optique et m'a ainsi permis de mieux saisir ce phénomène ainsi que la différence existant avec la parallaxe de mouvement.

VIDÉOS :

*dasGehirnInfo, Randolf Menzel über die Intelligenz der Bienen. 02.05.2012 [vidéo] [en ligne]. Disponible sur : <https://www.youtube.com/watch?v=NG7Ih_jO_-k> (consulté le 01.04.2019)

Interview de Randolf Menzel réalisée pour le site internet dasgehirn.info, dans laquelle le chercheur évoque sa rencontre avec les abeilles et l'objet de ses recherches. Il décrit notamment brièvement certaines caractéristiques du cerveau de l'abeille et leurs facultés cognitives, ainsi que leurs capacités d'apprentissage, de mémorisation et de navigation.

Dans cette vidéo sont reprises et expliquées les grandes lignes du texte-support. Grâce à elle, il est en outre possible d'entendre, et de voir, un homme passionné parler de son travail.

DICTIONNAIRES, GLOSSAIRES :

Spektrum, Online-lexika [en ligne]. Disponible sur : <https://www.spektrum.de/lexikon/> (consulté le 01.04.2019)

Lexiques de la maison d'édition Springer Nature, accessibles sur le site internet du magazine scientifique Spektrum.

Ce lexique comprend des définitions fiables et claires de termes issus de divers domaines scientifiques tels que les neurosciences, la biochimie, l'astronomie ou encore la géologie. J'y ai trouvé la définition de plusieurs termes employés dans le texte-support, et je m'en suis également servie lors de la rédaction des fiches terminologiques.

ANNEXES

Correspondance électronique avec Monsieur Menzel :

DOCUMENTS SOUS DROITS NON DIFFUSABLES

INDEX

A

abeille: abeille domestique, 0, 3, 5, 6, 7, 10, 12, 13, 15, 16, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 27, 30, 33, 36, 39, 41, 42, 45, 48, 50, 56, 59, 62, 63, 65, 70, 75, 76, 78, 81, 84, 87, 92, 96, 98, 120, 142, 146, 149, 151, 154, 158, 173, 174, 175, 177, 179, 181, 184, 185; abeille mellifère, 92, 142, 151, 158; abeilles à route, 70, 75, 81, 84, 92, 98, 107, 110, 118; abeilles à source tournante, 70, 75, 81, 107; abeilles recrutées, 45

addition, 30, 84, 173

angle, 7, 45, 142, 143, 144

apprentissage, 5, 20, 21, 22, 24, 39, 50, 59, 65, 87, 90, 92, 113, 124, 125, 135, 152, 158, 159, 164, 179, 181, 183, 185; apprentissage associatif, 21, 22; apprentissage exploratoire, 20

association, 21, 22, 23, 24, 27, 87, 127, 148, 156, 158, 163

azimut solaire, 62, 78, 142, 155, 158

B

boussole solaire, 15, 18, 20, 59, 63, 65, 78, 87, 155, 158, 159

C

capacités, 3, 12, 20, 36, 41, 50, 56, 59, 82, 87, 125, 152, 153, 159, 179, 181, 185

carte cognitive, 12, 18, 36, 50, 81, 84, 90, 92, 113, 118, 124, 131, 151, 152, 159, 184

colonie, 41, 45, 56, 68, 70, 87, 156, 159, 177

communication, 3, 5, 40, 41, 43, 50, 65, 151, 159, 178

connaissances, 2, 5, 12, 39, 41, 59, 143, 177, 183; connaissances acquises, 5; connaissances innées, 5

consolidation, 27, 137

corps pédonculés, 50, 142, 153, 159

D

danse, 12, 39, 40, 41, 43, 45, 48, 59, 71, 73, 78, 154, 155, 159, 160; danse en huit, 42, 43, 45, 59, 78, 154, 159, 160; danse en rond, 40, 45

danseuse, 41, 45, 48, 70, 155, 160

décision, 29, 39, 87, 90, 92, 150, 164

direction, 0, 7, 10, 12, 15, 19, 36, 45, 48, 59, 62, 65, 75, 78, 84, 90, 133, 146, 154, 160

distance, 10, 12, 15, 27, 39, 41, 45, 59, 62, 65, 75, 81, 90, 115, 141, 143, 144, 145, 146, 148, 150, 160, 172

E

environnement, 5, 10, 13, 16, 17, 18, 39, 59, 62, 68, 131, 141, 142, 145, 146, 155, 160

espèce florale, 24, 27, 36

F

facultés, 3, 10, 78, 179, 181, 185

fleur, 22, 24, 27, 42, 149, 161; fleurs, 36

flux optique, 39

I

information, 6, 7, 24, 42, 73, 129, 141, 143; informations, 5, 10, 13, 27, 41, 45, 48, 65, 66, 71, 73, 81, 90, 115, 118, 120, 137, 139, 141, 142, 143, 145, 177, 180, 181, 184
intégration de trajet, 15, 48, 59, 62, 65, 78, 82, 84, 90, 110, 117, 124, 141, 152, 156, 161, 184

J

jabot, 42, 75, 152, 162

K

Kievits: Kievits, Janine, 7, 10, 27, 28, 36, 39, 179

L

labyrinthe en Y, 30, 33, 39
lieu, 10, 16, 18, 24, 36, 39, 41, 56, 59, 62, 65, 68, 70, 71, 73, 75, 78, 81, 84, 92, 96, 98, 111, 113, 137, 141, 142, 149, 150, 153, 155, 160, 162, 164; lieu de butinage, 39, 65, 114, 150, 162, 164; lieu de nourrissage, 68, 70, 71, 73, 75, 78, 81, 84, 92, 96, 98, 113, 150, 162, 164
lumière, 5, 6, 7, 10, 46, 62, 78, 116, 143, 153, 164, 177, 178

M

mémoire, 0, 1, 3, 6, 17, 24, 27, 29, 30, 32, 50, 56, 59, 63, 65, 68, 75, 78, 79, 81, 82, 84, 87, 90, 92, 98, 105, 106, 108, 109, 110, 112, 117, 118, 119, 124, 125, 127, 129, 133, 135, 137, 139, 141, 143, 148, 149, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 161, 162, 163, 167,175, 177, 178, 180, 183, 184; mémoire à court terme, 24, 30; mémoire à long terme, 24, 25, 27, 30, 50, 143; mémoire à moyen terme, 24; mémoire associative, 87, 90, 124, 127, 148, 162; mémoire du paysage, 56, 63, 68, 76, 78, 81, 108, 124, 133, 152, 162
Menzel: Menzel, Randolf, 1, 10, 18, 24, 27, 41, 105, 107, 108, 109, 110, 112, 113, 114, 117, 118, 119, 120, 132, 133, 182, 183, 184, 185, 189
Mothe: Mothe, Philippe, 0, 1, 105, 106, 111, 115, 116, 118
motivation, 52, 68, 87, 90, 114, 118, 152, 163, 183

N

navigation, 3, 10, 12, 16, 18, 20, 50, 56, 59, 62, 65, 70, 78, 81, 82, 84, 87, 90, 92, 105, 108, 110, 112, 117, 118, 119, 125, 132, 141, 145, 146, 148, 149, 152, 153, 159, 162, 163, 165, 166, 167, 175, 176, 177, 179, 180, 181, 184, 185
nectar, 20, 21, 22, 24, 27, 36, 41, 42, 56, 65, 68, 75, 110, 120, 142, 152, 153, 163, 166
nid, 57, 59, 113, 153, 160, 163
nourrisseur, 27, 39
novel shortcut, 39; novel shorcuts, 18

O

ommatidie, 7, 143, 144, 153, 163

P

parallaxe de mouvement, 90, 112, 115, 144, 149, 163, 164, 185
polarisation, 7, 62, 78, 116, 143, 152, 153, 164, 178
pollen, 56, 65, 68, 110, 142, 145, 152, 154, 164, 166
pouvoir de séparation de l'œil, 81, 156, 164
proto-comptage, 27

R

radar harmonique, 70, 78, 81, 144, 151, 165
rayon, 13, 41, 48, 70, 81, 143, 145, 156, 165
récompense, 20, 24, 30, 33, 87, 90, 113, 149, 165
recruteuse, 48; recruteuses, 45
référentiel: référentiel allocentré, 18, 145, 146, 148, 166, 167
relâcher, 111
repère, 15, 59, 78, 81, 149, 152, 153, 165; repères, 15, 20, 62, 75, 78, 82, 84, 85, 87, 119
représentation spatiale, 16, 62, 117, 148, 149, 150, 165, 166, 167, 181; représentation spatiale allocentrée, 117; représentation spatiale égocentrée, 16, 62
route, 15, 52, 62, 66, 68, 70, 75, 98, 99, 108, 109, 110, 139, 150, 154, 155, 156, 158, 159, 161, 162, 163, 165, 167, 174, 180, 184
ruche, 10, 12, 15, 16, 18, 20, 25, 33, 36, 39, 41, 42, 45, 48, 52, 56, 59, 62, 65, 68, 70, 71, 73, 75, 78, 81, 84, 87, 92, 96, 98, 118, 142, 146, 151, 155, 165, 167, 175

S

sens de l'orientation, 5, 7, 56, 153, 165, 178
signal, 33, 36, 154, 166
soustraction, 30; soustractions, 29, 30
stimulus, 21, 22, 29, 30, 33, 127, 135
suiveuse: suiveuses, 41

T

Tautz: Tautz, Jürgen, 5, 23, 41, 45, 183
Tison: Tison, Léa, 1, 110, 111, 112, 114, 116, 119
Tolman: Tolman, Edward Chace, 18, 80, 81, 113, 130, 131
traces mnésiques, 56, 87
transpondeur, 70

V

vecteur: vecteur global, 15; vecteur local, 15, 155, 167; vecteurs, 15, 62, 78, 84, 85, 109
vol, 28, 36, 45, 48, 59, 65, 68, 70, 73, 75, 78, 81, 98, 132, 139, 146, 150, 151, 153, 155, 167, 168, 172, 173, 174, 176, 184; vols d'orientation, 12, 13, 18, 20, 25, 65, 66, 68, 70, 78, 81, 82
Von Frisch: Von Frisch, Karl, 10

Résumé : Les abeilles sont des insectes essentiels à la reproduction des plantes à fleurs, et donc, indirectement, à notre subsistance. Pourtant, nous savons peu de choses d'elles. Comment ces insectes, et plus précisément les abeilles domestiques, communiquent-ils entre eux ? Comment apprennent-ils ? Comment s'orientent-ils et comment interagissent-ils avec leur environnement ? Voici quelques-unes des questions auxquelles ce mémoire tente d'apporter des réponses, notamment grâce à la traduction d'un article scientifique sur la navigation chez l'abeille domestique, traduction complétée par une description méthodologique et une analyse terminologique.

Mots-clés : traduction, terminologie, allemand, abeille domestique, intelligence, communication, navigation, mémoire