

L'abeille, une architecte doublée d'une ingénieure

Qui n'a pas été émerveillé par les rayons de cire d'un nid d'abeille, qui traduisent les aptitudes architecturales de l'hyménoptère. Pourtant, un examen approfondi de la structure microscopique de ces édifices en révèle un niveau d'ingénierie qui transcende le premier degré de fascination. Pour nous en convaincre, rappelons que la matière première mise en œuvre lors de la construction du nid, la cire, a tout d'une épée à double tranchant : sa malléabilité permet le façonnage des cellules mais, en même temps, fragilise le rayon en cas d'élévation de la température. Pour remédier à cet inconvénient, l'insecte fait appel à la science des matériaux : chose que les microscopes permettent de vérifier. L'abeille a effectivement la capacité de sécréter des fibres de soie aux usages multiples, comme nous le verrons plus loin.

Or, elle se servira de ce matériau fibrillaire pour fabriquer, entre autres, un matériau composite (assemblage de deux matériaux non miscibles) destiné à renforcer la tenue mécanique des rayons de cire (*figure 1*). À l'intérieur des cellules de couvain, là où la température optimale se situe entre 34 et 35 °C, des fibres de soie sont noyées dans la matrice de cire. Ce renfort fibrillaire (matériau résistant) constitue l'ossature d'un chemisage des alvéoles de cire et en assure l'essentiel des propriétés mécaniques. Si le côté « ingénieure » de l'abeille ne saute pas d'emblée aux yeux, c'est parce que cette faculté s'exprime au stade larvaire et, de surcroît, sous un opercule, dans l'intimité de la cellule... Mais avant de considérer l'ingéniosité de ce procédé de consolidation, commençons par nous intéresser aux organes qui synthétisent et sécrètent les fibres de soie.

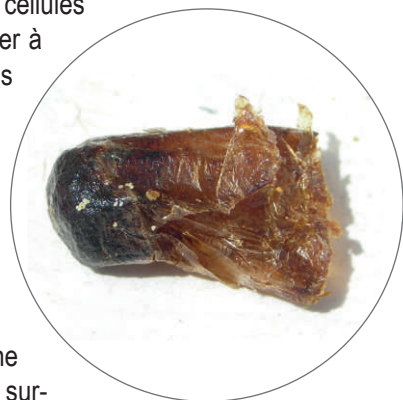


Figure 1 : Revêtement feuilleté retiré d'une cellule de couvain

Les glandes séricigènes

À l'intérieur du corps larvaire de l'abeille en développement, sous le ventricule, se trouvent deux glandes séricigènes (productrices de soie) semblables à des manchons sinueux, qui rejoignent la filière située au niveau labial (*figure 2*).

Larve d'abeille

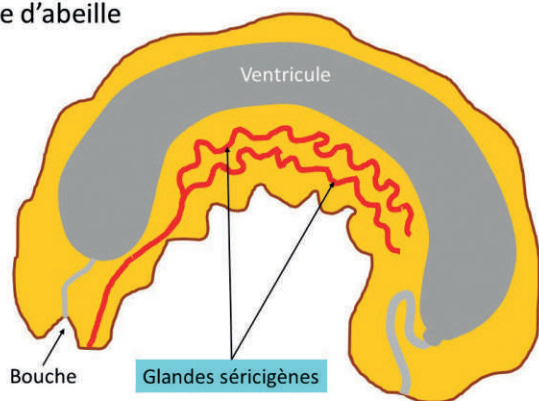


Figure 2 : Glandes séricigènes dans la larve d'abeille

Ces glandes sont composées d'amas cellulaires qui synthétisent et sécrètent des protéines polymérisables. Ces dernières sont maintenues sous la forme d'un gel hydraté dans la lumière de la cavité glandulaire. La polymérisation de ces sécrétions se produit en quelques secondes à température et pression ambiantes, lors du passage à travers la filière vers

le milieu extérieur. Pour pouvoir produire des fibres de soie à température ambiante, l'abeille doit contrôler rigoureusement l'hydratation et les conditions ioniques du fluide visqueux sécrété. La solution aqueuse produite se transforme en un filament insoluble. La soie filée au milieu du cinquième stade larvaire sert à tisser un cocon protecteur pour la toute future nymphe. Pour ce faire, la larve tapisse son alvéole fraîchement operculée d'un mince revêtement de soie. Après la métamorphose de l'insecte, les glandes séricigènes larvaires involuent, puis sont converties en glandes salivaires thoraciques chez l'abeille adulte.

La soie

Le mot « soie » désigne toutes fibres protéiques sécrétées par des arthropodes. Il évoque bien sûr la matière filamenteuse et souple sécrétée par le ver à soie (*Bombyx mori* ou Bombyx du mûrier) qui sert à produire des étoffes nobles depuis près de quatre millénaires. Mais beaucoup d'autres insectes sont capables de filer de la soie. Elle constitue d'ailleurs un élément clé de l'eusocialité de certains hyménoptères : le matériau fibrillaire étant intégré dans la structure du nid où il protège les juvéniles qui se développent dans les cellules de ponte (*figure 3*).

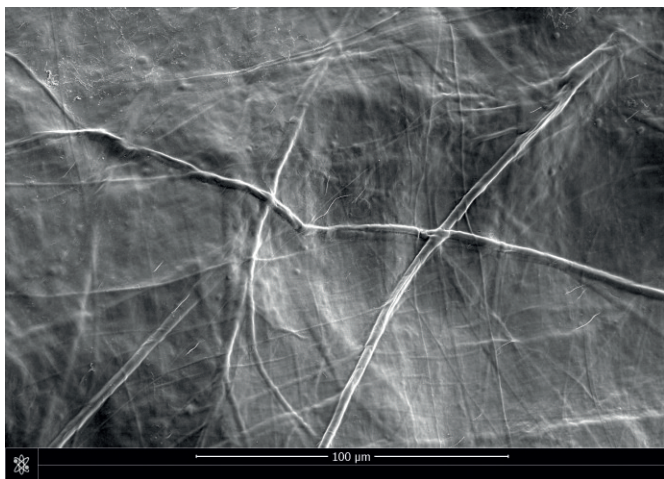


Figure 3 : Fibres de soie noyées dans la matrice de cire

Les glandes séricigènes synthétisent et sécrètent une solution aqueuse riche en fibroïne. Il s'agit d'une macromolécule dont les chaînes polypeptidiques varient grandement d'une soie à l'autre. La soie des hyménoptères sociaux est constituée de protéines hélicoïdales assemblées dans une conformation tétramérique en spirale : une conformation fondamentalement différente des feuillets- β (domaines cristallins) qui caractérisent la soie du bombyx et celle de l'araignée. On note, par ailleurs, que la masse moléculaire des protéines de la soie de l'abeille est 5 à 10 fois plus faible que celles du ver à soie et de l'araignée.

La soie d'abeille est filée à partir de quatre protéines qui s'auto-assemblent en s'enroulant pour former des fibrilles d'un diamètre de 4 nm environ. Ces fibrilles s'organisent ensuite en des genres de bâtonnets mesurant entre 1 et 3 μm en diamètre et jusqu'à 40 μm de long. Il en résulte une solution de cristaux liquides. Les « bâtonnets » protéiques s'alignent, lors de l'extrusion, dans le sens d'écoulement de la solution à travers la filière. Finalement, les fils de soie produits auront un diamètre oscillant autour de 3 μm (figure 4).

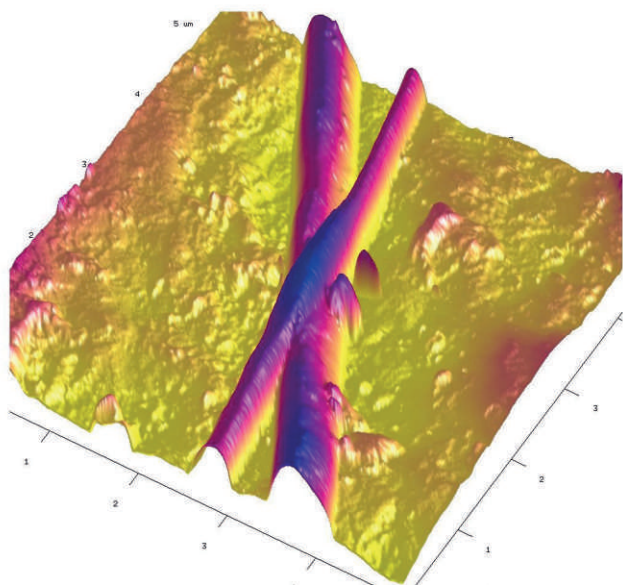


Figure 4 : Fibres de soie en voie d'intégration dans la cire

La soie est une fibre protéique hygroscopique. Les protéines fibreuses sont des molécules allongées qui ont des fonctions essentiellement architecturales. Les propriétés mécaniques de la soie sont liées à la nano- et microstructure du matériau extrudé ; celle que nous venons de décrire. Comparé aux soies du bombyx et de l'araignée, celle produite par l'abeille est moins résistante à la traction, mais plus élastique : elle est étirable à 200 %. La soie d'abeille est une fibre monobrin ayant une section circulaire. Elle est plus fine et a une texture beaucoup plus lisse que celle du ver à soie. De plus, la soie filée par la larve d'abeille est beaucoup moins anisotrope que celle du bombyx : en d'autres termes ses propriétés varient moins selon la direction considérée. Ces différences sont très probablement liées à leurs fonctions biologiques spécifiques. Les fonctions de la soie que produit l'abeille sont de contribuer à un environnement favorable à l'étape de nymphose, de participer à la régulation thermique et hygrométrique du nid et... de consolider le rayon de cire abritant le couvain, comme nous le verrons plus loin.

La structure multi-échelles des rayons

Dans la ruche, certaines zones sont dévolues à l'élevage de la progéniture (couvain) et d'autres au stockage des réserves alimentaires (miel et pain d'abeille). Le matériau de base des rayons (plateaux d'alvéoles ou de cellules) est de la cire d'abeille (figure 5).



Figure 5 : Construction initiale faite de cire blanche

Les constructions initiales de cire sont ensuite modifiées par l'ajout de soie, de pollen et de propolis. La matière monophasée de base (cire) évolue donc progressivement vers un matériau composite (soie/cire).

La soie filée par la larve en voie de métamorphose est pressée dans la cire de la paroi cellulaire. Ce chemisage de la cellule intègre aussi des sécrétions anales. Les fibres de soie sont disposées de manière aléatoire dans la paroi cellulaire (figure 6) ; ce qui confère à cette dernière les mêmes propriétés physiques dans toutes les directions (isotropie).

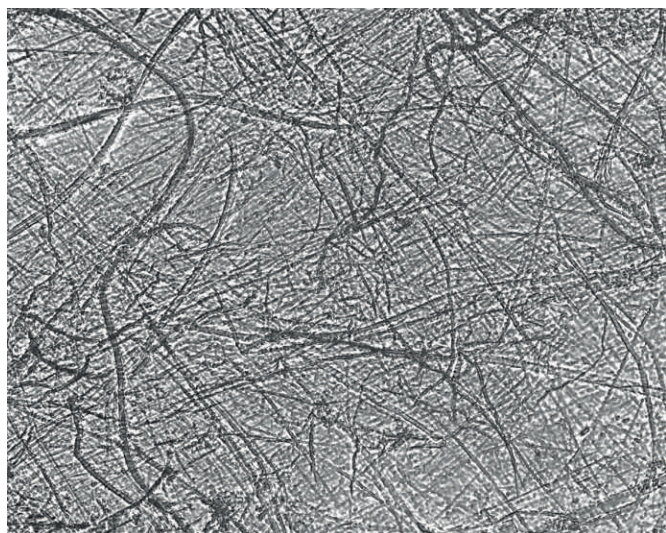


Figure 6 : Distribution aléatoire des fibres de soie dans la paroi d'une cellule

Une nouvelle strate de soie est ajoutée à chaque génération de couvain ; ce qui a pour corollaire une réduction progressive du diamètre de la cellule et une augmentation graduelle du rapport massique soie/cire. Les rayons de cire évoluent ainsi vers un matériau composite stratifié (figure 7).

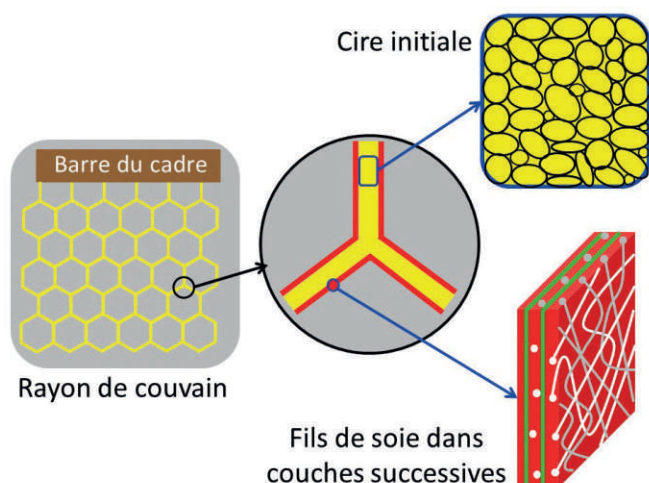


Figure 7 : Schématisation du chemisage des cellules de cire

L'incorporation de fils de soie dans des alvéoles de cire empêche la déformation plastique des rayons et fait obstacle à leur effondrement lorsque la température augmente. Grâce à ce chemisage, la résistance et l'élasticité des rayons ne varient quasiment pas entre 25 et 40 °C. Notons que les opercules

des cellules de couvain sont rugueux sur leurs deux faces ; la rugosité interne permettant à la larve de se repérer dans sa cellule. Ce repérage est essentiel pour la larve avant son entrée en nymphose, car la tête doit se trouver du côté opercule pour rendre possible l'émergence de l'imago. Contrairement aux opercules des alvéoles contenant du miel, les opercules des cellules de couvain sont poreux (\varnothing entre quelques micromètres et quelques dizaines de micromètres) pour permettre les échanges gazeux et le contrôle de l'hygrométrie nécessaires à un développement adéquat de la nymphe. La larve garnit également l'opercule de fils de soie.

L'architecture des rayons de cire est donc bien plus élaborée qu'il y paraît à première vue. Elle présente différents niveaux de structuration. La cire blanche de l'alvéole fraîchement façonnée par l'abeille a un aspect granuleux avec des grains mesurant entre 0,5 et 1,5 μm (figure 8).

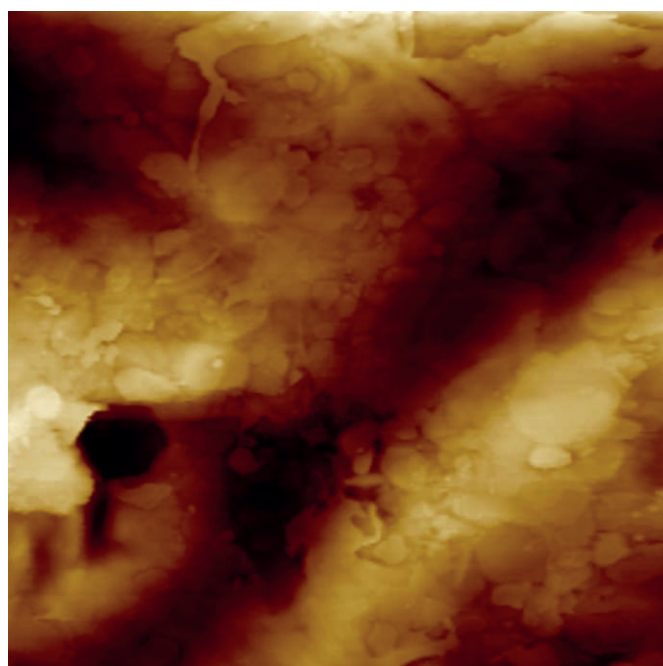


Figure 8 : Aspect granuleux de la cire blanche

Quel que soit l'âge d'un rayon, l'épaisseur des côtés des cellules est uniforme sur toute leur longueur, mis à part un léger renflement sur le pourtour de l'ouverture de l'alvéole. Mais, après chaque nymphose, les parois des cellules de couvain sont épaissies et renforcées avec la soie du cocon de nymphose. L'épaisseur de la charpente de cire augmente donc avec le temps : à titre indicatif, les côtés d'une cellule de couvain mesurent 90 μm au moment de leur édification, 120 μm après 5 mois, 250 μm après 12 mois et 300 μm après 24 mois. Les couches successives qui tapissent l'intérieur des cellules sont plus minces que du papier à cigarette (figure 9). Le diamètre des fils de soie se situe entre 2 et 4 μm . La soie des cocons qui garnit les cellules peut représenter jusqu'à un tiers de la masse d'un rayon âgé d'un an. La matrice de cire transmet aux fils de soie les sollicitations mécaniques auxquelles elle est soumise ; ce qui permet au matériau de rester ductile tout en résistant mieux à la rupture.

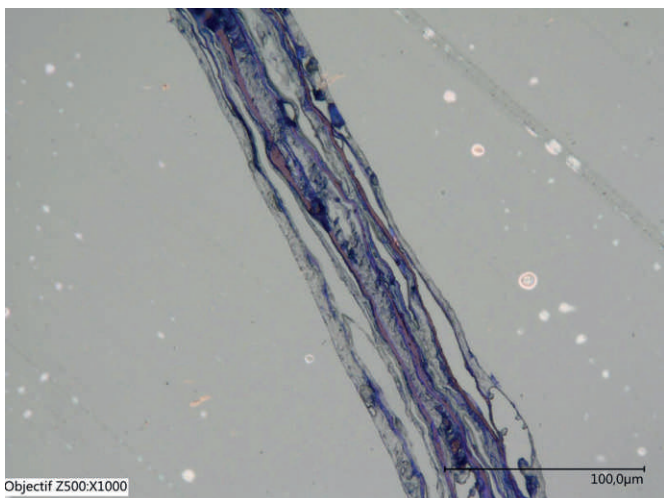


Figure 9 : Revêtement multicouche garnissant l'intérieur d'une cellule de couvain

Un sujet de biomimétisme

En termes d'innovations technologiques, il y a belle lurette que les ingénieurs imitent la géométrie macroscopique des rayons de cire (cellules hexagonales creuses entourées de minces parois) dans le but de minimiser la quantité de matière utilisée et, en même temps, de maximiser les propriétés mécaniques des matériaux. Des structures en nid d'abeille artificielles sont utilisées dans l'industrie aérospatiale, des articles de sport ou encore pour fabriquer du carton alvéolé. Mais depuis peu, les chercheurs en science des matériaux, qui cherchent à perfectionner les caractéristiques des architectures en nid d'abeille, se tournent vers un biomimétisme à l'échelle microscopique, en s'inspirant de la structure composite et stratifiée des alvéoles des rayons de cire des ruches. Ajoutons que les propriétés mécaniques, de biocompatibilité et de biodégradabilité de la fibroïne en font aussi un biomatériau de choix pour la médecine régénérative.

Pour finir

En fin de compte, la microstructure du rayon de cire, qui donne ses propriétés mécaniques et des caractéristiques thermiques à l'architecture, est autant l'œuvre des abeilles adultes que des juvéniles (figure 10).



Figure 10 : Cadre rempli de couvain

L'imago a la capacité de produire l'ossature de cire du nid qui abritera la progéniture de la colonie, tandis que l'abeille juvénile sait fabriquer la soie qui, après avoir accompagné sa nymphe, renforcera l'édifice. On peut donc dire que les larves parachèvent, en quelque sorte, le travail de construction des abeilles cirières. Quel extraordinaire exemple d'économie circulaire : la soie nécessaire au développement de l'insecte est recyclée comme élément de renfort intégré dans la charpente du nid ! Cela dit, maintenant que nous avons levé le voile sur la sophistication structurale du nid d'abeille, cela ne doit en aucun cas nous inciter à vouloir conserver ces ingénieuses constructions. Car, ce nid douillet l'est également pour toute une faune microbienne, parmi laquelle peuvent se cacher des agents pathogènes pour l'abeille ! Comme l'abeille n'a pas deux pattes dans le même sabot, elle bâtera, sans difficulté et sans attendre, de nouveaux rayons, gage d'un nid salubre. ◆

Photos et illustrations © Dr Joseph HEMMERLÉ

Bibliographie

- HEPBURN H. et coll. Physical properties of honeybee silk : a review. *Apidologie* 44(5) : 600-610, 2013.
- KUBASEK J. et coll. Honeybees control the gas permeability of brood and honey cappings. *iScience* 25 : 105445, 2022.
- SUTHERLAND T. et coll. Single honeybee silk protein mimics properties of multi-protein silk. *PLoS ONE* 6(2) : e16489, 2011.
- ZHANG K. et coll. Hierarchical, multilayered cell walls reinforced by recycled silk cocoons enhance the structural integrity of honeybee combs. *PNAS* 107(21) : 9502-9506, 2010.
- ZHANG K. et coll. Microstructure and mechanical properties of silk of silkworm and honeybee. *Acta Biomaterialia* 6 : 2165-2171, 2010.