

---

## Biomimétisme et impression 3D : que peut-on apprendre des abeilles – le projet BioAdd

Hajar Arrazki<sup>2</sup>, Baptiste Beaumal<sup>1</sup>, Emmanuel Chailleux<sup>1</sup>, Xavier Chateau<sup>2</sup>, Vincent Gaudefroy<sup>1</sup>, Jean Michel Torrenti<sup>3</sup>

<sup>1</sup> IFSTTAR, MAST, MIT, F-44344 Bouguenais, France - [emmanuel.chailleux@ifsttar.fr](mailto:emmanuel.chailleux@ifsttar.fr), [vincent.gaudefroy@ifsttar.fr](mailto:vincent.gaudefroy@ifsttar.fr)

<sup>2</sup> Université Paris-Est, Laboratoire Navier (UMR 8205), CNRS, Ecole des Ponts ParisTech, IFSTTAR, F-77455 Marne-la-Vallée, France - [xavier.chateau@enpc.fr](mailto:xavier.chateau@enpc.fr)

<sup>3</sup> Université Paris-Est, MAST, IFSTTAR, F-77447 Marne-la-Vallée, France - [jean-michel.torrenti@ifsttar.fr](mailto:jean-michel.torrenti@ifsttar.fr)

---

*RÉSUMÉ. L'observation de la nature, le biomimétisme, peut souvent aider à la compréhension des phénomènes et faire émerger des solutions constructives. Dans le cas d'une fabrication additive au moyen d'un essaim de robots, il apparaît intéressant de regarder comment les abeilles construisent les alvéoles des ruches. L'objectif du projet BioAdd est donc de comprendre la construction des alvéoles des ruches dans l'objectif d'une possible transposition à la construction additive dans le domaine du Génie Civil. Ce projet comprend deux parties. Les propriétés viscoélastiques linéaires en fonction de la température et de la fréquence ainsi que les propriétés interfaciales ont tout d'abord été mesurées. Dans un second temps, en utilisant ces résultats expérimentaux obtenus, il apparaît que la méthode constructive employée par les abeilles, basée sur le dépôt de particules de cire, conduit à la création d'une structure à grande surface interne qui, sous l'effet des forces de tension superficielle et de la température, se déforme de manière viscoélastique et fusionne les particules pour former le réseau hexagonal de membranes inter alvéolaires selon un mécanisme de type frittage.*

*ABSTRACT. Observation of nature, biomimicry, can often help to understand phenomena and bring out constructive solutions. In the case of additive manufacturing by means of a swarm of robots, it appears interesting to look at how bees build the cells of hives. The BioAdd project therefore seeks to understand the construction of honeycomb cells for the purpose of a possible transposition to additive construction. The first part of this project concerns the rheological characterization of wax and interfacial properties. The linear viscoelastic properties as a function of temperature and frequency and the interfacial properties were measured. The second part, using these experimental results, showed that, due to the high internal surface, under the effect of surface tension and temperature, viscoelastic deformations are generated and sintering occurs.*

*MOTS-CLÉS : construction additive, abeilles, cire, matériau cimentaire.*

*KEY WORDS: additive manufacturing, bees, wax, cementitious material.*

---

## 1. Introduction

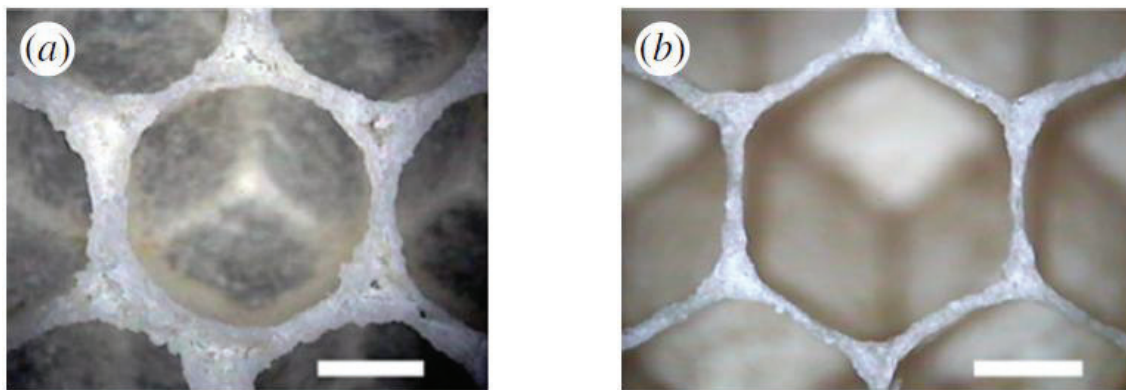
La construction additive connaît un développement très rapide y compris dans le domaine des constructions en béton [LAB 16], [WAN 16]. Pour le moment, la majorité des applications utilise l'extrusion d'un matériau cimentaire disposé en couches au moyen d'un bras robotisé pourvu d'une buse. D'autres techniques sont cependant envisageables comme l'utilisation d'une technologie de type jet d'encre et la collaboration d'essaim de robots (swarm approach [LAB 16]). La diminution du prix des drones permet de penser à ce type de solution pour de nombreuses applications et fait l'objet d'une recherche intensive dans le domaine de la robotique [CHU 18].

L'observation de la nature, le biomimétisme, peut souvent aider à la compréhension des phénomènes et faire émerger des solutions constructives [KNI 12]. Dans le cas d'une fabrication additive au moyen d'un essaim de robots, il apparaît intéressant de regarder comment les abeilles construisent les alvéoles des ruches. En effet, c'est clairement une construction additive collaborative qui présente plusieurs caractéristiques intéressantes :

- Les alvéoles des ruches sont un remarquable exemple de structures optimisées. On peut en effet montrer très facilement que le pavage d'un espace avec une figure géométrique régulière de surface donnée est optimal avec un hexagone régulier. C'est cette forme qui conduit à l'usage optimal des matériaux. Ce résultat a même été étendu à des formes quelconques de pavage [HAL 01].

- Plusieurs abeilles cirières sont impliquées dans la construction de chaque alvéole [HEP 86]. Il s'agit donc d'une construction collaborative.

- Les abeilles cirières déposent des particules de cire comprises entre 10 et 100  $\mu\text{m}$  pour construire les alvéoles. Au départ ces alvéoles sont cylindriques (c'est la forme la plus simple à construire pour l'abeille, figure 1a) et les parois sont très poreuses. Leur diamètre est égal à 5,3 mm et l'épaisseur entre deux alvéoles est de l'ordre de 0,073 mm. Mais, au bout de 48h, on observe (figure 1b) que la porosité de la paroi diminue et que les alvéoles adoptent une forme hexagonale [KAR 13]. Toutefois, la manière dont s'effectue le passage de la forme cylindrique aux hexagones n'est pas encore tranchée. Plusieurs hypothèses sont mises en avant, par exemple, des effets mécaniques exercés par les abeilles sur la structure. Mais l'hypothèse la plus couramment avancée est l'effet des tensions de surface sur un matériau visco-plastique avec un couplage avec la température, avec ou pas des effets de composite solide-liquide [KAR 13], [PIR 04].



**Figure 1.** a) : cellule juste après sa construction. Le trait blanc représente 2 mm ; b) cellule 2 jours après sa construction [KAR 2013].

Le projet BioAdd cherche donc à comprendre comment s'effectue la construction des alvéoles des ruches avec pour objectif de transposer la connaissance acquise à la construction additive. Ce projet comprend deux parties : une première expérimentale organisée autour de la caractérisation rhéologique de la cire et des propriétés interfaciales. La seconde partie analyse les résultats expérimentaux pour voir s'ils permettent d'expliquer le phénomène de transformation des alvéoles dans le cadre d'une modélisation thermomécanique du comportement de la cire. La conclusion met en avant la possible transposition à la construction additive.

## 2. Etude expérimentale

Les propriétés viscoélastiques linéaires en fonction de la température et de la fréquence d'une cire naturelle ont été mesurées à l'aide d'un dispositif de sollicitation en cisaillement plan-plan thermo-régulé, piloté en contrainte. Les résultats (figure 2) montrent, pour trois essais sur le même matériau à la fréquence de 1 Hz, que, à partir de 35°C jusqu'à 45°C, il y a une forte variation du module complexe  $G^*$  qui décroît de plus de deux ordres de grandeur. Dans un même temps l'angle de phase augmente d'une valeur de 10° à près de 90°. Ces évolutions sont caractéristiques du passage d'un comportement majoritairement élastique à un comportement principalement visqueux.

En parallèle, des résultats de la littérature montrent que la limite élastique de la cire diminue aussi avec la température passant de 0,54 MPa à 35°C à 0,21 MPa à 40°C [HEP 86]. Des essais de relaxation sur de la cire d'abeille à 25°C ont montré que le temps de relaxation était inférieur à la minute [SHE 97].

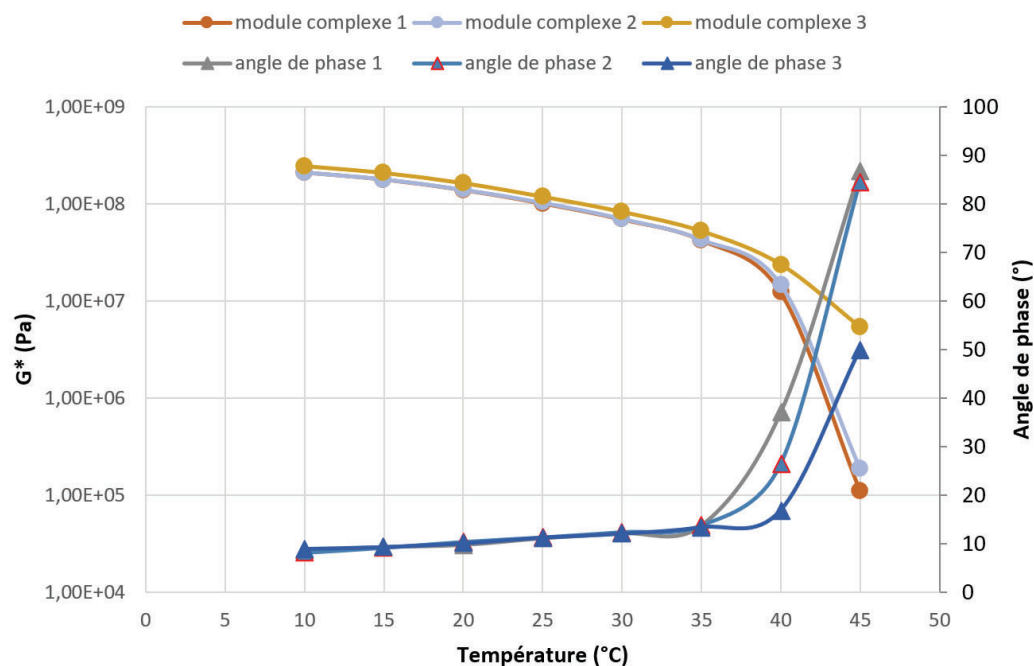


Figure 2. Evolution du module complexe et l'angle de phase avec la température (mesurés à 1 Hz).

L'énergie de surface de la cire dans l'air a été mesurée à l'aide d'un tensiomètre à goutte thermo-régulé. La méthode de la goutte posée a été préférée à celle usuelle de la goutte pendante compte tenu de l'extrême variabilité du comportement rhéologique de la cire dans une très faible gamme de température (cf. figure 2). Avec cette méthode, un film plan et lisse de cire préchauffée à 60°C a été préparé. Des gouttes de liquides de références (éthylène glycol, eau et diodométhane) de caractéristiques connues (tension totale et composantes polaires et dispersives) ont été déposées sur ce film et les angles de contact au point triple entre la cire, chaque liquide et l'air ont été mesurés à l'équilibre entre 30 et 40°C. A partir de ces mesures, nous avons obtenu une valeur d'énergie de surface d'environ  $50 \text{ mN m}^{-1}$  pour la cire d'abeille.

### 3. Analyse des résultats

Compte tenu de l'importance du rôle de la température dans le comportement de la cire, il est vital de connaître celle régnant dans la ruche. La température moyenne dans une ruche varie autour de 35°C [SOU 87]. Cette température est maintenue par une élévation de température du thorax des ouvrières. Lors de la construction des alvéoles, cette température est un peu plus élevée. Elle a été évaluée par Bauer et Bienefeld [BAU 13]. Ces auteurs ont supprimé des alvéoles afin que les abeilles viennent les reconstruire et ils ont mesuré par thermographie infrarouge la température dans les ruches. La température estimée lors de la construction des alvéoles a été comprise entre 33,6°C et 37,8°C avec une moyenne de 36,1°C qui correspond à la gamme de température où le comportement de la cire passe d'un comportement quasi élastique à un comportement majoritairement visqueux. Le thermogramme obtenu par analyse thermique différentielle (DSC) montre que, à cette température, le phénomène de fusion démarre, expliquant l'évolution rapide du comportement.

Ce dernier résultat confirme que le temps de relaxation de ce matériau dans des conditions de température proches de la transition solide-liquide est relativement court. Sachant que le temps de relaxation de la cire est de moins d'une minute [SHE 97] et que, dans le cas de l'expérience de Karihaloo, l'observation montre que les alvéoles évoluent d'une forme cylindrique à une forme hexagonale en moins de deux jours, le nombre de Deborah défini comme le ratio entre le temps de relaxation et le temps d'observation du phénomène [REI 64] est de l'ordre de  $1/(60 \times 24 \times 2) = 3,5 \cdot 10^{-4}$ . Ceci correspond bien à un phénomène essentiellement visqueux.

Sur la base des résultats obtenus, nous pensons que la méthode constructive employée par les abeilles, basée sur le dépôt de particules de cire, conduit à la création d'une structure à grande surface interne qui, sous l'effet des forces de tension superficielle se déforme et conduit à la fusion des particules pour renforcer le réseau hexagonal de membranes inter alvéolaires selon un mécanisme de type frittage.

#### 4. Conclusions

L'étude du comportement mécanique de la cire d'abeille a mis en évidence que son comportement devient suffisamment visqueux à la température de construction des alvéoles des ruches et que cela peut expliquer le phénomène de frittage qui est constaté et conduit à la transformation des alvéoles en hexagones.

Du point de vue de la construction additive, cela ouvre des perspectives par rapport à l'utilisation d'essaims de drones qui viendraient déposer de petites quantités d'un matériau cimentaire qui, par sa rhéologie et sous l'effet des forces physiques, comblerait les vides entre les différents dépôts.

Même s'il reste de nombreux défis technologiques pour une telle solution comme l'interaction entre les drones et le positionnement précis des dépôts, l'observation de la nature nous montre qu'une telle solution n'est pas utopique.

#### 5. Bibliographie

- [BAU 13] D. BAUER, K. BIENEFELD, Hexagonal comb cells of honeybees are not produced via a liquid equilibrium process, *Naturwissenschaften* 100:45–49, 2013
- [CHU 18] S.J. CHUNG, A. A. PARANJAPPE, P. DAMES, S. SHEN, V. KUMAR, A survey on aerial swarm robotics, *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 34, n°4, 2018
- [HAL 01] T.C. HALES, The honeycomb conjecture, *Discrete Comput Geom* 25:1–22, 2001
- [HEP 86] H.R. HEPBURN, *Honeybees and wax, an experimental natural history*, Springer, 1986.
- [KAR 13] B. L. KARIHALOO, K. ZHANG, J. WANG, Honeybee combs: how the circular cells transform into rounded hexagons, *Journal of the Royal Society Interface* 10, 2013.
- [KNI 12] J. KNIPPERS AND T. SPECK, Design and construction principles in nature and architecture, *Bioinspiration and Biomimetics*, vol. 7, n°1, 2012.
- [LAB 16] N. LABONNOTE, A. RØNNQUIST, B. MANUM, P. RÜTHER, Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities, *Automation in Construction*, 72, 2016.
- [PIR 04] C.W.W. PIRK, H.R. HEPBURN, S.E. RADLOFF, J. TAUTZ, Honeybee combs: construction through a liquid equilibrium process? *Naturwissenschaften* 91:350–353, 2004
- [REI 64] M. REINER, The Deborah number, *Physics today*, January 1964.
- [SHE 97] T. H. SHELLHAMMER, T. R. RUMSEY, J. M. KROCHTA, Viscoelastic Properties of Edible Lipids, *Journal of Food Engineering* 33 305-320, 1997
- [SOU 87] E. SOUTHWICK, G. HELDMAIER, Temperature control in honeybees colony, *BioScience*, June 1987.
- [WAN 16] T. WANGLER ET AL., Digital concrete: opportunities and challenge, *Rilem technical letters* 1:67-75, 2016