

Cette ressource est issue d'un travail personnel de plusieurs membres de l'organisation du Colloque MÉCAMAT AUSSOIS 2021+1 "Mécanique des Matériaux Architecturés" [1] et du projet de recherche national ANR MAX-OASIS.

1 – Introduction

Quand on parle de matériaux, on se le représente généralement comme quelque chose de *continu* qui remplit une forme pour lui conférer des propriétés physiques... La nature de ce *continu* est variée et peut être, selon les applications, du bois, du plastique, de l'acier, de la pierre etc.

Si l'on observe avec attention les structures biologiques qui nous entourent, on découvre que la notion de matériau est quelque chose de plus riche que cette image classique, monolithique, que l'on en a. Cette richesse permet de conférer aux biomatériaux des capacités extraordinaires.

Nous avons sélectionné quelques exemples que nous présentons ci-dessous :

- Le papillon *Morpho* a des ailes extraordinaires. Celles-ci sont bleues alors qu'elles sont dépourvues de pigments grâce à un phénomène d'iridescence, et l'eau ne peut pas les mouiller (hydrophobie). Ces propriétés sont dues à l'organisation sur plusieurs échelles du matériau les constituant. Cette organisation est illustrée sur le schéma ci-dessous.

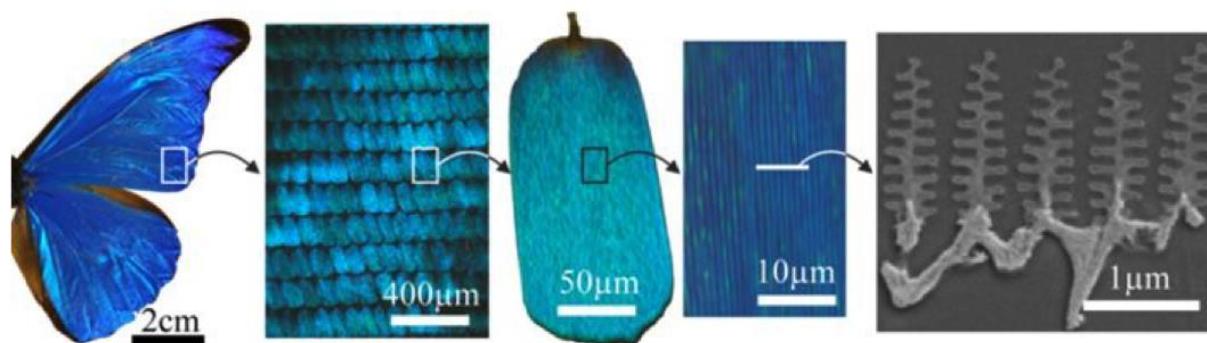


Figure 1 : Organisation spatiale d'une aile de papillon *Morpho* à différentes échelles
source : http://www.ac-grenoble.fr/lycee/triboulet.romans/IMG/pdf/Morpho_Bleu.pdf

- L'éponge *Euplectella aspergillum*, une éponge marine vivant dans les hauts-fonds, constituée de fibres de verre, présente un rapport entre son poids et sa résistance au flambement (« effondrement ») plus important que beaucoup de matériaux de construction grâce notamment à l'arrangement très particulier des "spicules" (de longues fibres ressemblant à des cheveux) de verre qui la compose.

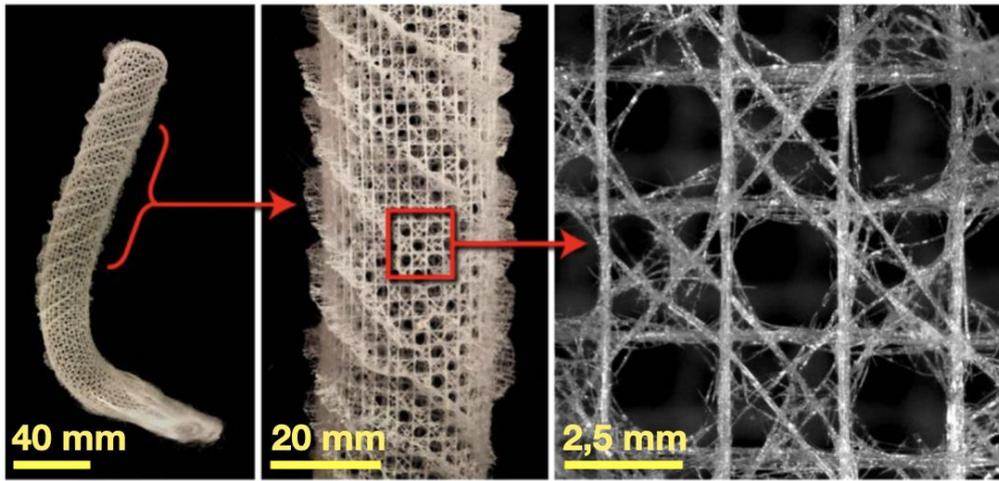


Figure 2 : Organisation spatiale d'une éponge *Euplectella aspergillum* à différentes échelles

Source : <https://www.nature.com/articles/s41563-020-0798-1>

Ce dernier exemple n'est pas sans évoquer les constructions métalliques de la fin du XIX^{ème} siècle, et dont l'exemple le plus célèbre est la Tour Eiffel. La tour a une masse, avec tous ses équipements, de 10 100 tonnes. Pourtant, elle ne représente au sol qu'une pression équivalente à celle d'une colonne de 5 hommes empilés les uns sur les autres. Cette prouesse est une nouvelle fois permise par l'agencement ingénieux des barres de fer qui la composent mais aussi par la disposition astucieuse de ses piliers au sol.

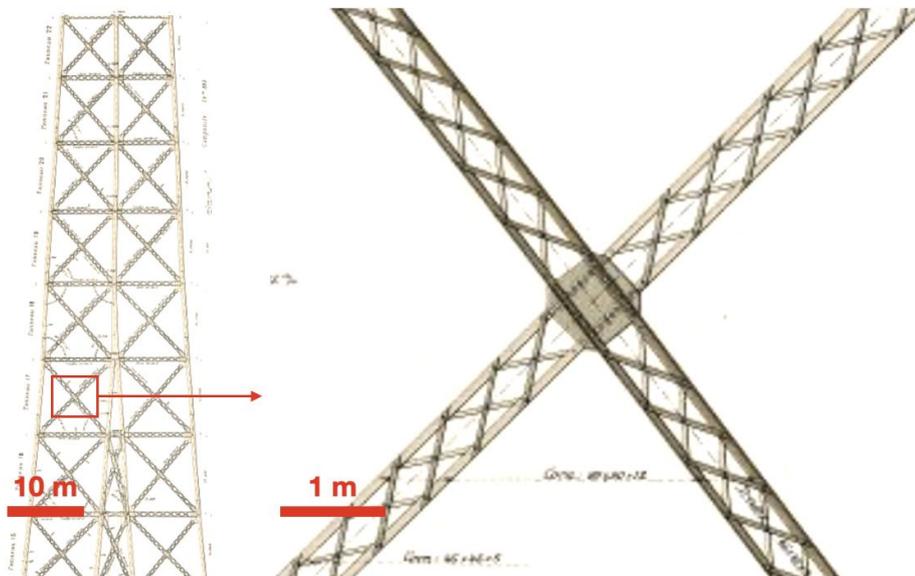


Figure 3 : Organisation spatiale des poutres de la Tour Eiffel à différentes échelles

source : <http://passerelles.bnf.fr>

Le point commun à tous ces exemples, et la source de leurs propriétés exceptionnelles, est que la matière qui remplit la forme n'est pas un *matériau continu* mais un matériau qui possède une architecture interne et cela sur plusieurs échelles !

La notion de forme n'est plus spécifique à la structure complète, mais devient à présent une caractéristique intrinsèque de cette généralisation des matériaux classiques, que l'on appellera désormais des **Matériaux Architecturés**.

Quand on compare biomatériaux et matériaux de l'ingénieur, il faut également noter les points suivants :

- Les biomatériaux utilisent peu d'éléments chimique de base, contrairement aux ingénieurs qui font appel à une très grande partie des éléments existants ;
- Les procédés de fabrication ne sont pas les mêmes : croissance et auto assemblage en biologie contre procédés de fabrication additifs (collage) et soustractifs (découpe) en ingénierie ;

	Biomatériaux	Ingématériaux
Éléments chimiques	Seulement quelques-uns, majoritairement légers : C, N, O, Ca, P, S, Si, ...	Très variés : Fe, Cr, Ni, Al, C, N, O, ...
Obtention des matériaux constitutifs	Croissance : Auto-assemblage contrôlé biologiquement	Fabrication : matériaux en fusion, poudres, solutions
Précision géométrique	Basse	Élevée
Organisation spatiale	Structure hiérarchique à toutes les échelles	Mise en forme de la pièce et structuration du matériau constitutif
Adaptation à la fonction	Par adaptation de la forme et de la structure interne	Par sélection du matériau constitutif
Principe de résistance	Remodelage : adaptation à des changements de conditions environnementales	Conception robuste : surdimensionnement prenant en compte les chargements maximaux possibles, avec une marge de sécurité
	Auto-cicatrisant : récupération d'intégrité après une rupture partielle	

Figure 4 : Comparaison entre biomatériaux et ingématériaux.

Source : Fratzl, P. (2007). *Biomimetic materials research: what can we really learn from nature's structural materials?*. *Journal of the Royal Society Interface*, 4(15), 637-642.

Ainsi, en s'inspirant de la nature, on voit que les matériaux architecturés, par la maîtrise de la géométrie interne et de l'organisation sur plusieurs échelles, pourraient permettre de faire mieux (optimisation des fonctions, nouvelles fonctions) avec moins de matière et moins d'éléments. En cela ils peuvent constituer une étape vers une ingénierie matériaux plus économe en ressource.

2 – Définition

On peut définir, dans les matériaux architecturés, au moins 3 échelles d'organisation de la matière (Fig. 5). On nomme ces échelles :

- **microscopique** pour la plus petite, cette échelle fixe la limite à partir de laquelle l'organisation géométrique de la matière n'est plus prise en compte dans le modèle, c'est-à-dire que, à cette échelle et en dessous, la matière est vue comme continue. Il s'agit généralement de l'échelle de l'organisation physico-chimique ;
- **macroscopique** pour la plus grande, cette échelle est la plus petite des deux échelles suivantes :
 - celle de la forme externe de l'objet, ou ;
 - la longueur d'onde caractéristique du chargement mécanique.

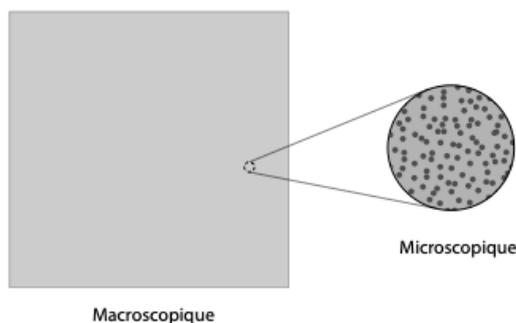
Par exemple, si j'appuie avec une pointe de compas sur le ventre d'un ourson en peluche, l'échelle macroscopique ne sera pas les 20 cm de hauteur de mon ourson en peluche mais plutôt la taille de la pointe de mon compas donc quelques dixièmes de millimètres.

- **mésoscopique(s)** pour la, ou les, échelle(s) intermédiaire(s) entre ces deux dernières.

La définition que nous retenons est la suivante :

Un Matériau Architecturé est défini comme un matériau dont l'organisation de la matière a lieu sur au moins 3 échelles avec une forte séparation entre les échelles microscopique et mésoscopique.

Séparation d'échelle dans les milieux classiques



Séparation d'échelle dans les matériaux architecturés

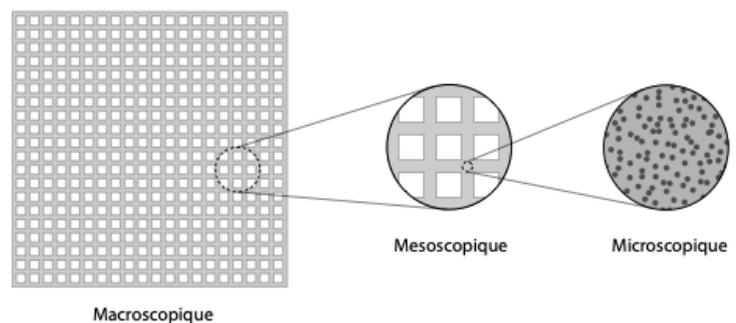
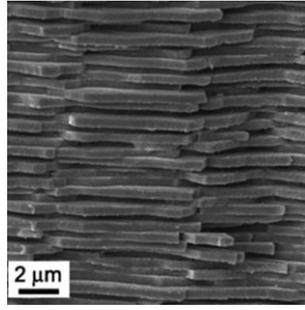


Figure 5 : Organisation spatiale d'un matériau traditionnel (gauche) et architecturé (droite)

La figure 6 réunit plusieurs exemples de matériaux architecturés naturels ou fabriqués par l'homme. On remarque que ces matériaux ont une structure qui peut être régulière (nid d'abeille) ou non (os), périodique (pantographe) ou quasi-périodique (Penrose). Certains de ces matériaux sont faits d'une seule matière comme le tricot ou la tour Eiffel alors que d'autres organisent plusieurs matières entre elles comme les céramiques Penrose ou les ailes du papillon Morpho.



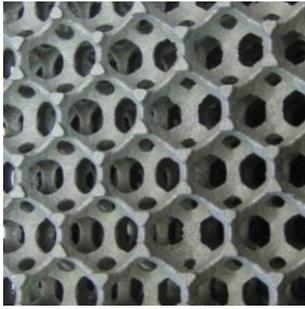
Nid d'abeille naturel



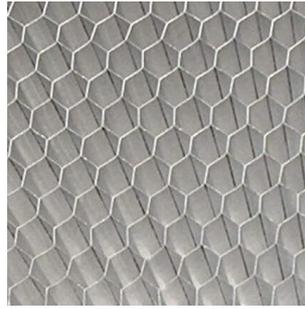
Nacre naturelle [Barthelat2014]



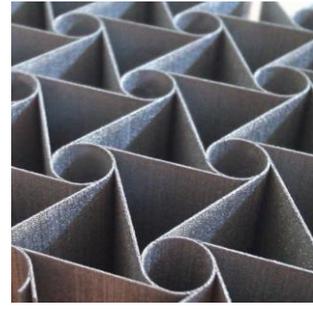
Os spongieux naturel (source Wikipedia)



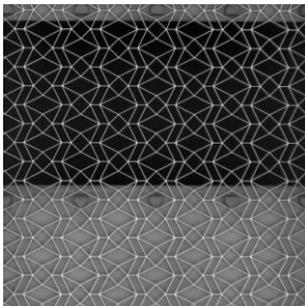
Mousse métallique régulière obtenue par fonderie (production CTIF)



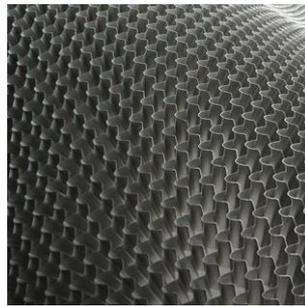
Nid d'abeille aluminium hexagonal par collage-déploiement (Corex™)



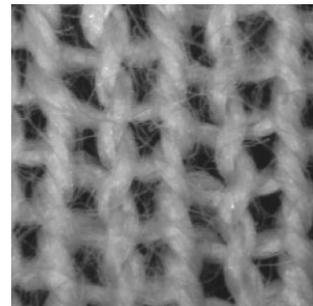
Hexachiral métallique obtenu par fabrication additive [Dirrenberger2011]



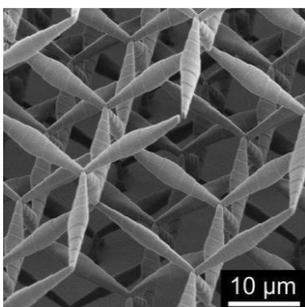
Pantographe en polymère obtenue par fabrication additive [Sepecher2020]



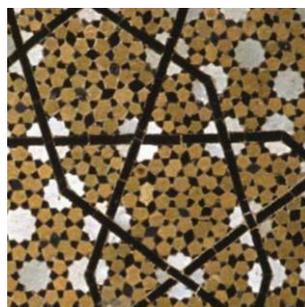
Nid d'abeille aluminium flexcore^(R) obtenue par pliage-soudage (Hexcel™)



Tricot jersey (source wikipedia)



Pentamode métallique obtenu par fabrication additive [Milton2017]



Penrose en céramique obtenu par assemblage manuel (Isfahan, Iran, 1453)



Gyroid en polymère obtenu par fabrication additive (shapeways™)

Figure 6 : Diversité des formes, échelles, matériaux constitutifs, fonction et origines des matériaux architecturés

Quizz :

Il est bien sûr possible de continuer cette liste de matériaux architecturés pendant des pages mais nous espérons qu'à ce stade il vous est possible de distinguer un matériau architecturé d'un matériau classique. Vous pouvez tester votre compréhension sur les exemples suivants :

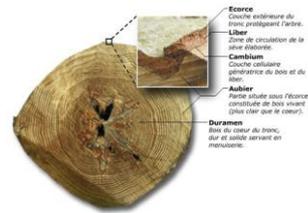
Pouvez-vous reconnaître les matériaux présentés ci-dessous ? Sont-ils classiques ou architecturés ? (réponses en fin d'article).



a) Carton épais



b) Carton ondulé



c) Bois



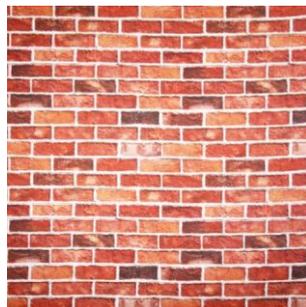
d) Sucre fondu



e) Tissu



f) Mousse d'aluminium



g) Mur de briques

3 – Applications

La complexité des matériaux architecturés tient qu'il convient tant de concevoir des mésostructures intéressantes que d'ensuite pouvoir les réaliser.

Du fait de l'ingéniosité des ingénieurs, certaines architectures spécifiques sont maîtrisées depuis longtemps. A titre d'exemple les matériaux de type nids d'abeille sont des matériaux architecturés "classiques" possédant des propriétés incroyables permettant, entre autres choses, d'absorber des chocs ou bien encore de réduire le bruit et tout cela en étant très légers... Cette légèreté est

particulièrement appréciée car elle permet d'alléger les véhicules, et ainsi réduire leur consommation énergétique ! Un avantage écologique dont l'intérêt est de plus en plus fondamental.

Une autre mésostructure classique résulte de la notion de "pli", le seul fait de plier une surface lui confère une grande rigidité et cela sans augmenter sa masse. De plus, si l'on enferme cette surface pliée (l'âme) entre deux couches de matériaux (les peaux) on obtient une structure dite sandwich aux multiples applications en ingénierie. Pensez notamment au carton ondulé !

A côté de ces applications classiques et connues, l'idée s'est développée que l'on pouvait faire plus en comprenant et maîtrisant mieux l'agencement de la matière à l'échelle mésoscopique. Des travaux issus de l'électromagnétisme (métamatériaux) ont montré, dans les années 2000, que l'on pouvait piloter le parcours des ondes dans la matière ouvrant ainsi la voie aux capes d'invisibilité. Transposé à la mécanique cela signifie que l'on peut protéger des villes de tremblement de terre ou encore isoler des plateformes pétrolières (ou autre) des vagues...

La porte ayant été ouverte, les théoriciens et mathématiciens de la mécanique s'y sont engouffrés et ont pensé de nombreuses architectures aux propriétés étranges comme :

- **Les matériaux auxétiques**, qui gonflent quand on tire dessus et inversement se rapetissent quand on pousse dessus. Un gilet pare-balle fait en cette matière aurait tendance à se densifier au point d'impact d'un projectile...
- **Les matériaux pentamodes**, des matériaux solides qui ont tendance à se comporter comme des fluides, résistant à la pression mais pas au cisaillement ;
- **Les matériaux pantographiques**, à mi-chemin entre mécanismes et matériaux, ces matériaux architecturés peuvent se déployer dans certaines directions et être résistant dans d'autres.
- ...

Mais ces matériaux que les mathématiciens et théoriciens nous présentaient comme des solutions acceptables d'équations n'ont été jusqu'à récemment que des matériaux théoriques et cela pour, au moins deux raisons :

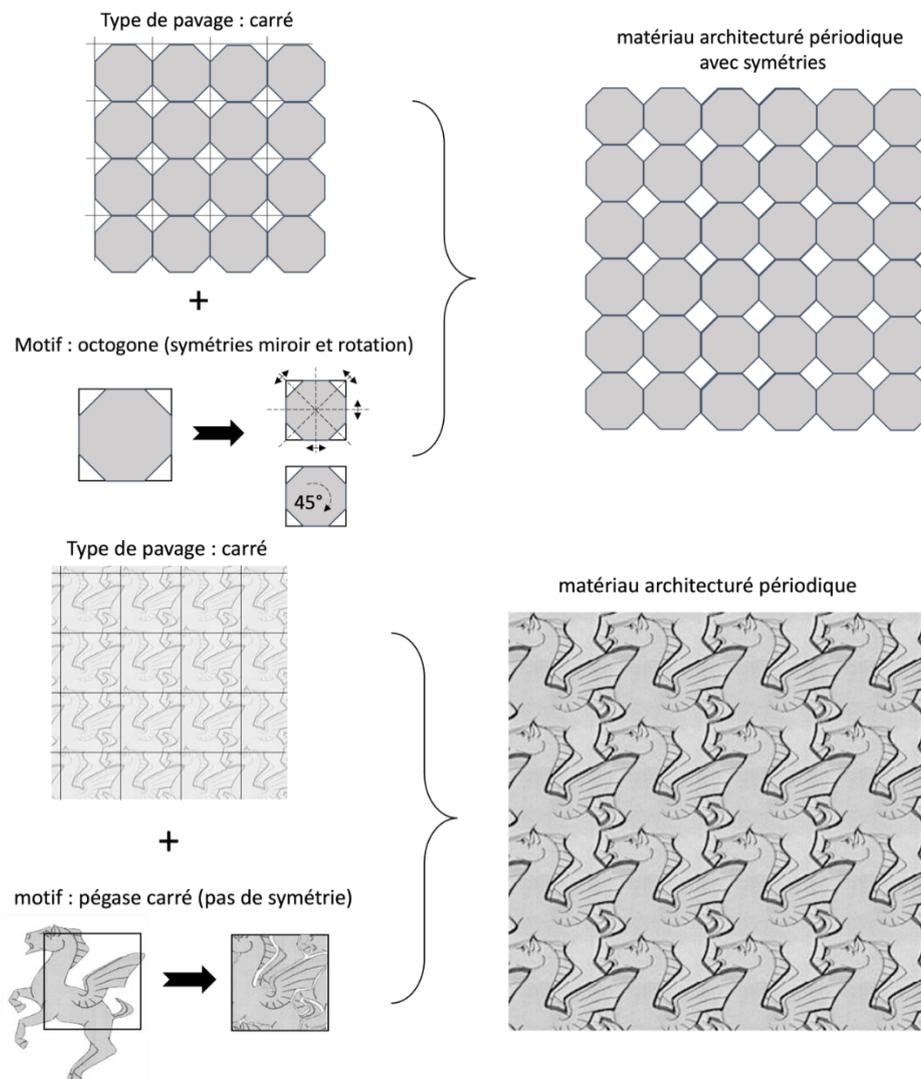
1. Il fallait des algorithmes pour déterminer la forme du matériau aux échelles mésoscopiques, la mésostructure, produisant les effets recherchés. Même si de brillants ingénieurs sont arrivés à en deviner certaines, l'approche était jusqu'à très récemment artisanale et pas du tout systématique. Le développement depuis les années 1990 d'algorithmes de type "Optimisation Topologique" (cf. la ressource « *L'optimisation topologique, qu'est-ce c'est ?* » [2]) a changé la donne et a permis de révéler des mésostructures optimales aux géométries pas toujours intuitives, voire très bizarres...
2. Que ces mésostructures soient inventées par un ingénieur ou calculées par un logiciel, il en demeure qu'il faut ensuite pouvoir les fabriquer... et jusqu'à récemment celles-ci étaient trop compliquées à réaliser par les technologies disponibles. Le développement ces dernières années des techniques de fabrications additives a complètement changé la donne rendant possible ce qui était jusqu'alors des spéculations de théoriciens ! Grâce aux imprimantes 3D, il est désormais possible de fabriquer ces formes que l'on ne pouvait qu'imaginer auparavant et l'on commence à voir apparaître pour de vrai les matériaux architecturés promis par nos collègues théoriciens et mathématiciens !

Les applications vont de la prothèse biomédicale et biocompatible aux semelles de chaussures restituant la sensation de courir sur le sable en passant par des vraies capes d'invisibilité !

4 – Catégorisation/Classification

La catégorisation des matériaux architecturés peut se faire selon de multiples critères :

- La nature de l'organisation spatiale : elle peut être périodique ou aléatoire, ou intermédiaire, dite « quasi-périodique » (c'est le cas des matériaux à structure Penrose). Dans les catégories des périodiques ou quasi-périodiques, on peut distinguer des sous-catégorisations :
 - Le type de pavage de l'espace (par exemple par des cellules carrées, rectangulaire, triangulaire ou hexagonale dans le plan) ;
 - Le type de symétries du motif élémentaire pavant l'espace (les figures ci-dessous présentent le même type de pavage mais avec des motifs à symétries différentes).



- La nature du comportement mécanique : la structure à l'échelle mésoscopique se déforme en mettant en traction ou en flexion les parois ou poutres. Selon le type de matériaux architecturés et de sollicitation, cela peut être très majoritairement l'un ou l'autre, ou un mélange des deux. Ceci a un impact important sur la rigidité, la résistance et l'absorption d'énergie possible par le matériau, par exemple lors d'un crash ;
- Les fonctionnalités du matériau : a-t-il un rôle uniquement mécanique, ou aussi thermique, optique etc. Un matériau architecturé peut, de par son organisation spatiale, être intéressant pour réaliser plusieurs fonctions a priori antinomique (par exemple une grande résistance mécanique mais une faible conductivité thermique).

5 – Réponses au quizz de la partie 2 :

- a) Le carton plat n'est pas un matériau architecturé, il n'a pas 3 échelles d'organisation de la matière.
- b) Le carton ondulé possède une échelle intermédiaire de la taille d'une ondulation : c'est un matériau architecturé.
- c) Le bois possède plusieurs échelles d'organisation de la matière mais il n'y a pas de forte séparation d'échelle entre les échelles microscopique et mésoscopique : ce n'est pas un matériau architecturé.
- d) La sucette classique ne possède que 2 échelles d'organisation de la matière : ce n'est pas un matériau architecturé.
- e) Le tissu a plus de 3 échelles : le matériau constitutif du fil, le fil (souvent composé lui-même de plusieurs fils torsadés), le tissage réalisé par l'entrecroisement régulier des fils, le morceau de tissu. Entre l'échelle la plus petite : le matériau constitutif du fil et les échelles mésoscopiques (fil, entrecroisement régulier des fils) la séparation d'échelle est forte : c'est donc un matériau architecturé.
- f) La mousse d'aluminium a une échelle mésoscopique en plus : les pores. Il y a alors une forte séparation d'échelle entre les pores (~5mm) et les grains (~,1mm) et la mousse d'aluminium devient un matériau architecturé.
- g) Un mur de brique possède une échelle intermédiaire de la taille des briques et il y a une forte séparation d'échelle entre l'argile et la taille des briques : c'est un matériau architecturé.

Références :

[FS2020] <https://www.futura-sciences.com/maison/breves/materiau-eponges-mer-inspirent-architectes-3247/>

[1]: Colloque MÉCAMAT AUSSOIS 2021+1 “Mécanique des Matériaux Architecturés”, 17-21 janvier 2022, <https://aussois2022.sciencesconf.org/>

[2]: L'optimisation topologique, qu'est-ce que c'est ? septembre 2016, https://eduscol.education.fr/sti/ressources_techniques/loptimisation-topologique-quest-ce-que-cest