



**HAL**  
open science

## Matière en fibres

Aurélie Vissac

► **To cite this version:**

| Aurélie Vissac. Matière en fibres. Sciences de l'Homme et Société. 2014. dumas-03035822

**HAL Id: dumas-03035822**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03035822>**

Submitted on 2 Dec 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.



# matière en fibres

Mémoire du Diplôme de Spécialisation et d'Approfondissement  
DSA – Architecture de Terre

Aurélie Vissac, septembre 2014

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE GRENOBLE  
BP 2636 – 60, Avenue de Constantine – 38036 GRENOBLE Cedex 2

Mémoire du Diplôme de Spécialisation et d'Approfondissement  
DSA – Architecture de Terre 2012-2014

# matière en fibres

Aurélié Vissac, Ingénieur INSA

## **Directeurs d'études**

Laetitia Fontaine, Ingénieur-chercheur, responsable du projet amàco, CRAterre, U.R. AE&CC, ENSAG  
Romain Anger, Directeur pédagogique et scientifique, amàco, Les Grands Ateliers

## **Jury**

Personnalités extérieures invitées

Bettina Horsch, Architecte, Maître assistante, ENSA Nantes

Etienne Guyon, Professeur, PMMH, ESPCI, UMR 7636/CNRS

José Bico, Maître de conférence, PMMH, ESPCI, UMR 7636/CNRS

Equipe pédagogique du DSA-Terre

Arnaud Misse, Achitecte, Enseignant Chercheur, CRAterre, U.R. AE&CC, ENSAG

ENSAG, 18 septembre 2014

Ministère de la Culture et de la Communication  
Direction de l'Architecture et du Patrimoine



# matière en fibres

amòco

ATELIER MATIÈRES À CONSTRUIRE

---

centre d'excellence pédagogique  
sur les sciences de la matière  
pour la construction durable

---



Beautour, centre de découverte.  
La Roche-sur-Yon (85), 2013  
Arch. Guinée Potin

# TABLE DES MATIÈRES

<b>4</b>	<b>Introduction</b>
<b>6</b>	<b>amàco, de la matière au matériau</b>
<b>8</b>	<b>1. ORIGINE DES FIBRES NATURELLES</b>
<b>10</b>	classification des fibres
<b>12</b>	les fibres végétales
<b>28</b>	les fibres animales
<b>30</b>	ressources abondantes
<b>36</b>	<b>2. COMPRENDRE LA MATIÈRE EN FIBRES</b>
<b>38</b>	fibres et fibres
<b>64</b>	fibres et grains
<b>76</b>	fibres et eau
<b>94</b>	fibres et matière molle
<b>98</b>	fibres et matière liante
<b>102</b>	<b>3. CONSTRUIRE AVEC CE QUE L'ON A PORTÉE DE MAIN</b>
<b>108</b>	matériaux
<b>116</b>	structures et exercices à l'échelle 1
<b>118</b>	architecture vernaculaire et contemporaine
<b>128</b>	<b>Conclusion</b>
<b>130</b>	<b>Bibliographie</b>

# Introduction

4

---

De formation ingénieure en matériaux, c'est pendant mes études à l'INSA de Lyon et grâce à une année d'échange universitaire en Amérique latine, que j'ai ouvert les yeux sur le monde de l'architecture en terre. En entrant dans l'équipe matériaux du laboratoire CRATerre-ENSAG, je me suis davantage familiarisée avec la physique de la matière en grains et des boues d'argiles en développant pendant 4 mois des expérimentations. Ensuite, pendant 8 mois, j'ai participé au projet de recherche Paterre+ (programme PNRCC) sur la stabilisation des enduits en terre par des molécules d'origines animales et végétales : inventaire des recettes traditionnelles avec en parallèle une recherche bibliographique sur les processus physico-chimiques de ces interactions argiles-biopolymères. Cet autre regard sur la matière étant à l'origine de nombreux questionnements relatifs à notre façon de construire, je me suis donc inscrite à la formation du DSA Architecture de terre. Sensibilisée aux cultures constructives, en contact permanent avec des architectes, ma vision de l'architecture évolue, notamment vis à vis du patrimoine bâti et culturel. L'observation des architectures vernaculaires qui vont de pair avec l'ensemble des savoirs et savoir-faire est une incroyable leçon qui enrichit et éclaire les recherches, en particulier en science des matériaux.

---

Dès la fin de la formation théorique, j'ai intégré le projet amàco, 'enfant de CRATerre'. Ce projet de formation se tourne aussi vers la recherche, la diffusion et les applications sur le terrain. Lauréat des Investissements

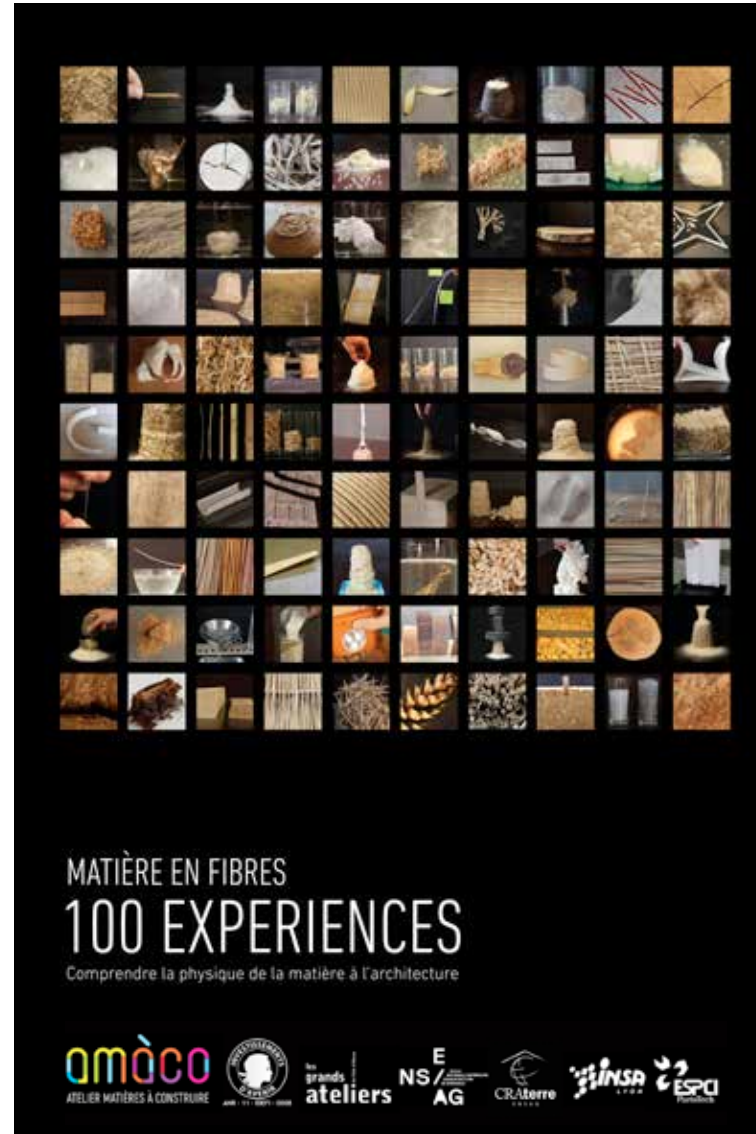
d'Avenir à travers les Initiatives d'Excellence en Formations Innovantes (IDEFI), amàco est un centre de ressource pédagogique. Une des missions d'amàco est de développer des contenus pédagogiques pour «rendre visible, de manière sensible et poétique, les comportements physico-chimiques des matières naturelles les plus communes [...] et de faire connaître leurs applications dans la construction». Mon rôle au sein d'amàco est de participer à l'élaboration d'expériences qui ciblent des phénomènes expliquant le comportement de la matière en fibres.

Dans les pas de Grains de Bâisseurs, le contenu de ce mémoire regroupe le travail de toute l'équipe d'amàco, composée d'architectes, d'ingénieurs, d'artistes et de physiciens. Mes apports concernent le développement de nouvelles 'manipes fibres'. L'objectif principal de ce mémoire est, à court terme, de rassembler des connaissances sur la matière en fibres afin de faire émerger de nouveaux savoirs, de créer des ponts entre physique de la matière et architecture ainsi que du lien entre chercheurs, constructeurs, artisans, artistes et architectes, dans le domaine des fibres végétales. Ce mémoire est l'esquisse d'un futur ouvrage « bâtir en fibres végétales, du brin d'herbe à l'architecture ».

Ce mémoire comporte trois parties. La première est un descriptif, non exhaustif, des fibres utilisées dans la construction. Cet inventaire a été initié par Arnaud Misse et complété par mes soins.

La deuxième partie, le cœur de ce mémoire, s'attache à mieux comprendre la physique de la matière en fibres pour mieux les utiliser. Cette partie s'est construite grâce à de nombreuses rencontres : les visites des laboratoires (laboratoire de physique de l'ENS Lyon, PPMD, MMN, PMMH, Guliver à l'ESPCI, L2C et LMGC à Montpellier), l'exposition «Ruptures, les matériaux roulent des mécaniques» au Palais de la Découverte, ainsi que les deux ateliers créatifs et expérimentaux d'amàco. Le premier, focalisé sur les sciences de la matière et l'expérimentation, s'est déroulé à l'ESPCI en janvier 2014, réunissant une cinquantaine de chercheurs pendant deux jours. Le deuxième atelier, centré sur les fibres, de la matière à l'architecture, a réuni architectes, enseignants, ingénieurs, industriels, artistes, physiciens et artisans pendant une semaine, en mai 2014 aux Grands Ateliers. Les contenus nés de ces multiples rencontres ont ensuite été retravaillés par l'équipe amàco.

Enfin, la troisième et dernière partie évoque le génie de la simplicité depuis la transformation de la matière en matériaux jusqu'à l'architecture, l'intelligence du vernaculaire et de l'intégration au paysage de l'architecture contemporaine lorsque l'on construit avec ce que l'on a à portée de main. Cette dernière partie est une esquisse de ce que pourrait être ce chapitre de livre. Elle regroupe le travail de Martin Pointet sur l'élaboration de matériaux et d'Arnaud Misse pour les références architecturales d'habitats vernaculaires et contemporains en fibres végétales.





# De la matière au matériau

6

## MATIÈRE

L'Atelier Matières à Construire s'organise autour de cinq thèmes : matière en grains, matière liante, matière eau, matière molle, matière en fibres. Les phénomènes physico-chimiques qui gouvernent les propriétés de ces 5 familles de matières sont mis en évidence à l'aide d'expériences simples, visuelles et sensorielles.

## MATÉRIAU

Chacun des cinq thèmes renvoie à différents matériaux de construction, habituellement cloisonnés par filières de production dans l'enseignement et dans l'industrie. Il ne s'agit pas d'enseigner séparément la construction en bois, en béton, en terre, en paille, etc. mais au contraire de montrer les analogies et les différences entre ces matériaux et de favoriser le transfert de techniques innovantes entre filières.

## ARCHITECTURE

**amàco** vise la découverte des propriétés physiques de la matière et la compréhension de leurs applications dans la construction. Des exercices pratiques, sous forme de « chantiers pédagogiques », permettent de tisser les liens entre la microstructure de la matière et les problématiques structurelles à l'échelle du bâtiment.

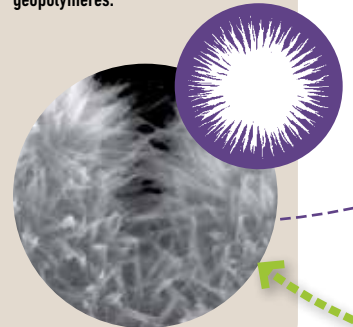


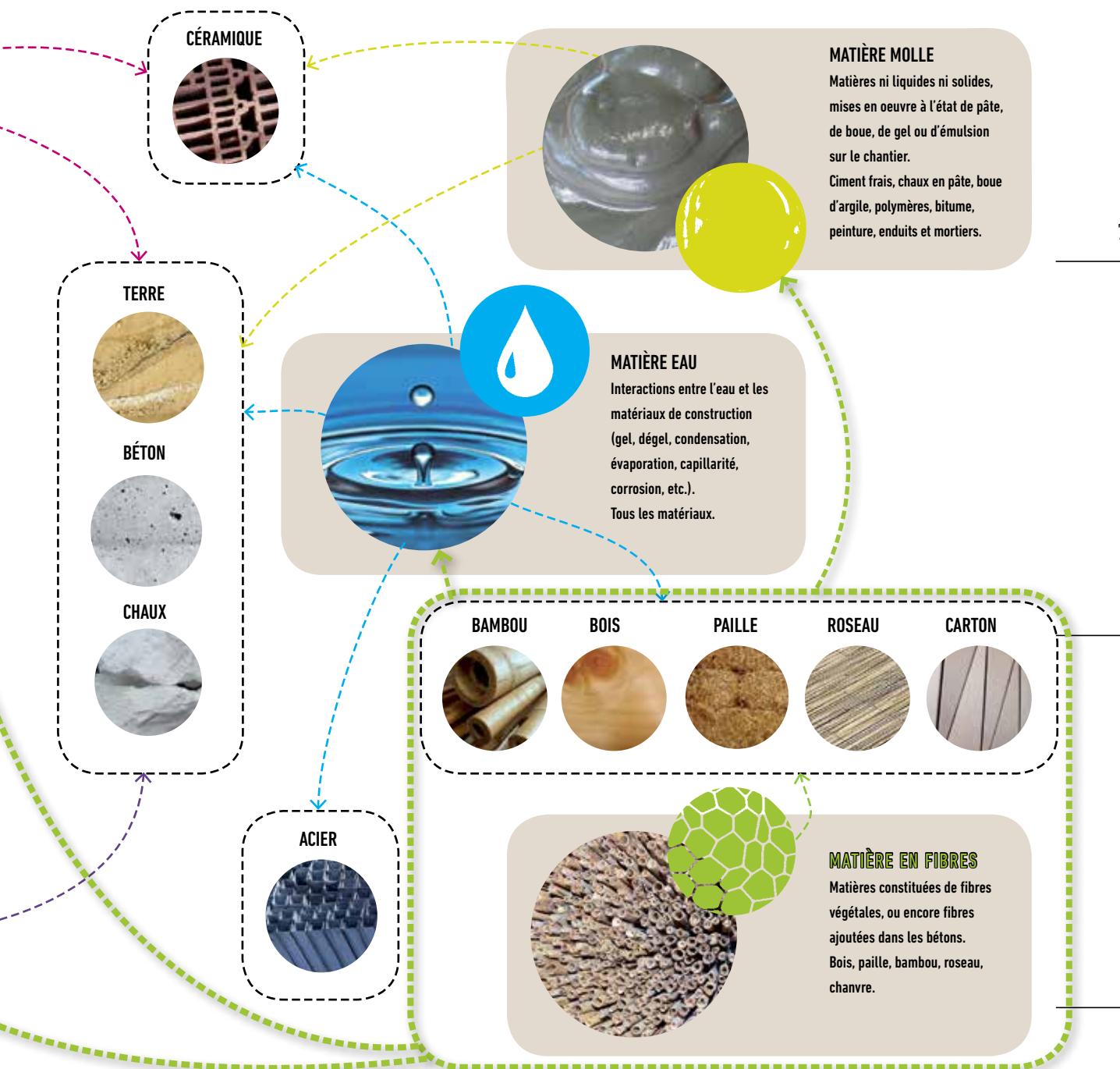
### MATIÈRE EN GRAINS

Matières constituées de grains minéraux, comme par exemple les bétons, qui sont des mélanges de grains agglomérés par un liant. Béton, terre, mortiers, enduits, sable, graviers et autres granulats.

### MATIÈRE LIANTE

Matières sous forme de pâtes minérales capables de durcir et d'agglomérer des grains ou des fibres. Ciment Portland, plâtre, chaux aérienne et hydraulique, argile, ciments naturels, béton romain, géopolymères.





Les fibres naturelles sont très présentes dans l'architecture vernaculaire. Longtemps éclipsé par l'industrie grandissante du béton, l'usage des fibres naturelles fait son retour dans la construction neuve et la rénovation. Le bois et le bambou comme structure, ainsi que les laines isolantes naturelles et autres matériaux dits « bio-sourcés » sont de plus en plus appréciés des architectes contemporains.

L'origine des fibres naturelles est très variée. Ce premier chapitre est un inventaire, non exhaustif, des fibres naturelles utilisées dans la construction. Il met l'accent sur la diversité et l'abondance de certaines ressources végétales issues de plantes invasives ou de déchets recyclés.

1

9

ORIGINE

DES FIBRES NATURELLES

# CLASSIFICATION DES FIBRES NATURELLES

*Les fibres naturelles sont pour la plupart d'origine végétale et animale.*

10

## VÉGÉTALE

Tous les végétaux sont constitués de fibres de cellulose plus ou moins pure. Les tiges des plantes sont les principales ressources de fibres végétales. Elles sont plus ou moins lignifiées suivant l'espèce et la maturité de la plante. Les feuilles, les fruits, les graines et l'écorce de certaines plantes sont également utilisés comme source de fibres végétales. La cellulose représente à elle seule plus de 50% de la biomasse. C'est une ressource naturelle abondante et renouvelable.

## ANIMALE

Les fibres animales sont composées principalement de protéines. La kératine constitue les poils (dont les laines en tout genre) et les plumes. La soie est une sécrétion de fibroïne produite par le ver à soie, chenille d'un papillon du genre bombyx et les araignées. La laine et les plumes sont depuis longtemps utilisées dans le domaine textile. Ce sont aussi de très bons isolants pour la construction.

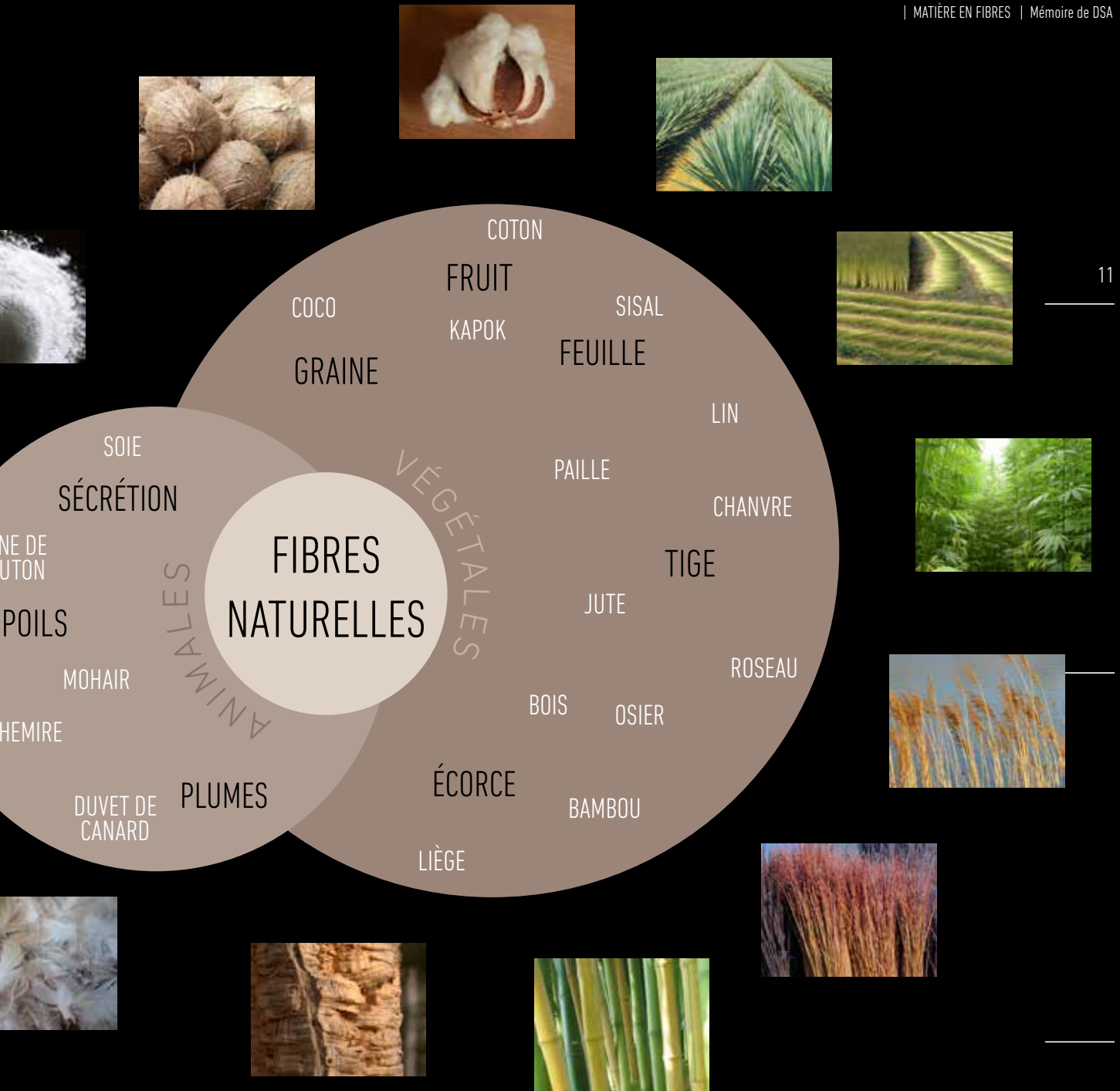
## MINÉRALE

On trouve dans la nature des minéraux dont la texture est fibreuse. Il s'agit d'une matière toxique, l'amiante.



LAIN  
MO

CAC





The Hidden Life Within, œuvre de Giuseppe Penone. Tronc creusé quasiment jusqu'au cœur, révélant le jeune arbre qu'il était.

# Fibres végétales

## LE BOIS

*La diversité des essences régionales, une bonne gestion des forêts et la structuration des filières courtes font du bois une ressource locale et renouvelable, à faible impact environnemental, disponible pour la construction.*

### L'ARBRE

Le bois vient des parties les plus dures de l'arbre comme le tronc, les branches et les racines. On parle de parties ligneuses, à forte teneur en lignine, composé organique liant les cellules végétales. Epicéa, douglas et pin sont les principales espèces de résineux. Ils ont une croissance plus rapide mais sont généralement moins dense et moins résistants que les feuillus tels le hêtre ou le chêne.

#### ▽ Epicéa



### LA FIBRE

Les fibres du bois, constituant la paroi des cellules végétales, sont de forme étirée, longues de plusieurs millimètres. Leur orientation globalement commune, dans le sens longitudinal du tronc, donne le « fil du bois ». Pour séparer ces fibres, il est possible de recourir à un défilage mécanique ou chimique (procédé papetier).

#### ▽ Grumes de bois





◁ La laine de bois est fabriquée à partir d'un procédé de défilage mécanique de chutes de bois, généralement des résineux, provenant de scierie ou de rémanents de forêt. Les fibres sont ensuite mélangées et liées par un liant organique, souvent issu de l'industrie pétrochimique. Des liants naturels à base de sucre, d'huile et d'amidon sont parfois utilisés.



◁ Très couramment utilisés, les panneaux d'OSB (Oriented Strand Board, littéralement panneau de grandes particules orientées) étaient à l'origine produits à partir de résidus de placages et de contreplaqués. Ils contiennent 95% de copeaux de bois liés par 5% de résines chimiques. Les panneaux dits OSB3 sont réputés sans émanation de formaldéhyde.



◁ Une fois les grumes de bois sciées, les planches sont entreposées pour le séchage. Des cales espacent chaque planche pour que l'air circule et que la planche reste bien droite et ne se déforme pas en séchant.

## UTILISATION

Seuls les troncs bien droits servent au bois d'œuvre qui constitue les éléments structurels de charpente ou d'ossature. Débité en planches, le bois est utilisé pour les parquets, le bardage, les meubles, etc. Les rémanents, c'est à dire les parties déclassées et les restes de branches, sont parfois revalorisés. Ils sont utilisés par exemple pour la fabrication de panneaux, de laine isolante. Les rémanents laissés sur le sol ont un rôle écologique important, ils participent au renouvellement et à l'amélioration de l'humus forestier en se décomposant. L'industrie papetière est également une grande consommatrice de bois.



▷  
Champ de chanvre agricole cultivé pour ces fibres  
depuis l'époque Néolithique



14

## LE CHANVRE

*Le chanvre cultivé ou textile, Cannabis sativa L., fait partie avec le houblon, de la famille des Cannabaceae (Cannabacées ou Cannabinacées).*

### LA PLANTE

Le chanvre cultivé est une plante herbacée annuelle dressée à croissance très rapide. Originaire d'Asie centrale et d'Inde, elle peut atteindre en quelques mois une hauteur supérieure à deux mètres. La tige, simple et cannelée, renferme les fibres aux usages textiles connus depuis l'Antiquité.

### LA FIBRE

La fibre de chanvre et la chènevotte sont obtenues par transformation de la tige de chanvre. La filasse est extraite de la partie extérieure, l'écorce de la tige. Cette fibre longue et très résistante produit la corde de chanvre. La partie centrale de la tige, la moelle, est broyée pour former des agrégats légers, appelés chènevotte. Très poreux, ils ont une grande capacité d'absorption d'eau.

### UTILISATION

La filasse peut être également cardée, c'est-à-dire démêlée et aérée, pour obtenir la laine de chanvre, utilisée comme isolant dans le bâtiment. La chènevotte est très appréciée comme matière de remplissage ou composant de briques avec un liant pour ces qualités isolante et de régulation de l'humidité ambiante, apportant une sensation de confort.

▽ Récolte mécanisée du chanvre



▽ Tige de chanvre : la filasse et la chènevotte



▽ Bloc de chènevotte et de chaux





Lin cultivé au début de sa floraison

## LA PLANTE

Le lin cultivé est une plante herbacée, annuelle. Sa tige unique, fibreuse, peut atteindre une hauteur voisine de 1 mètre pour un diamètre assez fin. Il est reconnaissable à ses fleurs à cinq pétales de couleur bleue à blanc qui ne durent qu'une journée. Environ un mois après la floraison, arrivé à maturité, le lin dont la couleur vire du vert tendre au jaune, est prêt à être arraché.

▽ Andins de lin arraché en plein champ



## LA FIBRE

Regroupé en andins le lin attend quelques jours avant d'être récolté. C'est l'étape du rouissage où l'action des microorganismes facilite l'extraction mécanique des fibres. Longues de plusieurs dizaines de centimètres, elles sont extraites de la partie extérieure de la tige. L'intérieur, le bois, constitue l'anas de lin. Des fibres intermédiaires, de quelques centimètres, forment l'étope.

▽ Longue fibres de lin



## UTILISATION

Le lin est utilisé abondamment dans l'industrie textile. L'étope de lin sert pour le rembourrage des sièges, la fillasse pour armer le plâtre, la toile de lin pour armer les enduits. Il existe également des laines de lin isolantes. Certains matériaux composites allient fibres de lin et liant, comme la résine qui compose certaines coques de bateaux.

▽ Corde de lin



# LE LIN

*Linum est un genre regroupant les lins, de la famille des Linaceae (Linacées). Il compte près de 200 espèces présentes surtout dans les régions tempérées et subtropicales de l'hémisphère nord. Le lin cultivé est Linum usitatissimum.*

## LE JUTE

*Le jute est une plante herbacée de la famille des Malvaceae (Malvacées), cultivée dans les régions tropicales pour ses fibres.*

### LA PLANTE

Le jute forme des arbustes de 2 à 4 m de hauteur, à tige rigide et fibreuse de 2 cm de diamètre environ, ramifiée seulement dans la partie supérieure. Ces espèces croissent sous un climat chaud et humide. Le berceau de leur culture se situe en Inde et dans le Bangladesh actuel, dans les vallées du Gange et du Brahmapoutre. Ces deux pays rassemblent 80 % des surfaces consacrées à cette culture.

#### ▽ Défilage manuel de tiges de jute



### LA FIBRE

La fibre de jute est longue de 1 à 4 mètres et son diamètre de 17 à 20 microns. La grande proportion de lignine dans les tiges de jute apporte aux fibres une certaine rigidité. Traditionnellement, les tiges de jutes sont trempées dans l'eau stagnante après la récolte pour séparer plus facilement les fibres. C'est l'étape du rouissage permettant l'extraction des fibres.

#### ▽ Fibres de jute



### UTILISATION

Son débouché principal est longtemps resté la fabrication de cordes et de sacs d'emballage et de transport. C'est le cas à la Réunion, où l'on appelle ces sacs des gonis. On cherche désormais à diversifier son utilisation dans le tissu d'ameublement et notamment dans le domaine du géotextile : des tissus grossiers destinés à retenir la terre des talus.

#### ▽ Toile de jute



▷ Le jute est une plante des milieux humides cultivées pour ces fibres. La toile de jute est un des tissus les plus anciens qui soient.





Le jonc des chaisiers de la famille des Cypéracées pousse dans les zones humides.

## LA PLANTE

Les joncs vrais sont des plantes herbacées à tiges droites, cylindriques, flexibles et à rhizome rampant. Ils poussent dans les zones humides et marécageuses. Le scirpe ou jonc des chaisiers commun (*Schoenoplectus acutus*) se différencie des joncacées par ses feuilles plates. Il croît également dans les zones humides. Il est utilisé pour lutter contre l'érosion des sols.

▽ Tiges de jonc fraîchement coupées



## LA FIBRE

La plante possède une épaisse tige arrondie verte pouvant atteindre 1 à 3 mètres de hauteur. Les tiges sont longues, droites et très flexibles. L'intérieur de cette hampe est rempli de cavités cloisonnées. Elles permettent les échanges d'air entre la partie immergée et la partie aérienne de la plante.

▽ Coupe d'une tige de jonc



## UTILISATION

L'usage du jonc est répandu dans le domaine de la vannerie. Séchée et tissée, la plante était utilisée par les Amérindiens pour fabriquer des paniers, des chapeaux, des vêtements et même des bateaux. Le scirpe est également utilisé en phytoépuration car il absorbe certains métaux lourds et phénols.

▽ Tressage de jonc à en Inde



# LES JONCS

*Sous le nom générique de jonc, les tiges de nombreuses espèces de *Scirpus sp.* (*Cyperaceae*) ou *Juncus sp.* (*Juncaceae*) sont utilisées comme liens, ou tressées en ouvrages de vannerie (tapis, dessus de chaises, corbeilles ...).*

## FOCUS : LES GRAMINÉES

*Poaceae* appelée également *Gramineae* est le nom scientifique d'une importante famille botanique. Le nom d'usage est *poacées* ou *graminées*.

Cette famille regroupe près de 11 000 espèces en plus de 700 genres et on y trouve la plupart des espèces de plantes qu'on appelle communément « herbes » et « céréales », mais pas seulement, les bambous par exemple sont aussi des Poacées.

Les tiges, en particulier, ont un port caractéristique : elles sont cylindriques, souvent creuses par résorption de la moelle centrale. Les faisceaux, permettant la circulation de la sève, sont entrecroisés et renferment des fibres à parois épaisses qui renforcent cette structure à la fois résistante et souple.

En botanique, on appelle chaume (du latin *calamus*) la tige herbacée, creuse, qui est propre aux graminées.

Les chaumes sont interrompus par des nœuds qui sont une succession de zones d'où émerge une longue feuille, qui d'abord engaine la tige puis s'allonge en un limbe étroit à nervures parallèles.

Les nœuds, dans la tige, existent chez toutes les plantes supérieures, c'est de là que partent les branches et c'est là que se forment les bourgeons, mais chez les graminées ils ont un rôle fondamental de soutien.



De gauche à droite :

brin d'herbe, paille de blé, roseau commun de Camargue, Canne de Provence et bambou

Ces plantes font toutes partie de la famille des Graminées.



## LA PAILLE

*La paille correspond à la tige des graminées, en particulier des céréales, coupées et dépouillées de leurs grains. Bien souvent il s'agit de la paille de blé, terme générique désignant plusieurs céréales appartenant au genre *Triticum*.*

### LA PLANTE

Cultivés pour l'alimentation, les blés, durs pour la semoule et tendres pour le pain, ont été domestiqués au Proche-Orient à partir d'une graminée sauvage (égilope). Les blés sont des plantes herbacées annuelles, monocotylédones, à feuilles alternes, formées d'un chaume portant un épi constitué de deux rangées d'épillet contenant les grains.

#### ▽ Gerbes de blé fauché à la main



▷ **Champ de céréales juste après la moisson, la paille est rassemblée en balles rondes.**



### LA FIBRE

Les tiges sont des chaumes, cylindriques, souvent creux par résorption de la moelle centrale. Ils se présentent comme des tubes cannelés avec de longs et nombreux faisceaux conducteurs de sève. Les chaumes sont interrompus par des nœuds. Il existe dans l'épiderme une concentration de multiples amas de silice microscopiques mais très durs, rendent les chaumes tranchants.

#### ▽ Bottes rectangulaires



### UTILISATION

Les bottes carrées sont employées en remplissage d'une ossature ou directement en paille porteuse. La technique de la terre-paille banchée utilise de la paille en vrac. Beaucoup de techniques traditionnelles de construction en terre utilisent de la paille en vrac, notamment lors de la fabrication d'adobes ou la préparation d'enduits, de torchis ou de bauge.

#### ▽ Studio 1984, Alsace





Le roseau commun qui pousse dans les zones humides, est une espèce cosmopolite, c'est à dire à répartition géographique très étendue.

## LA PLANTE

Le roseau commun est une plante herbacée de 1,5 à 3 mètres de hauteur, à rhizome. C'est une plante de milieux humides, prospérant le long des cours d'eau et dans les marais. Très présent en Camargue, il possède une tige droite, lisse, creuse ou remplie de moelle de 5 millimètres de diamètre en moyenne. Elle est pourvue d'un épi de fleur terminal.

## LA FIBRE

Les roseaux sont récoltés dans les roselières en automne et en hiver, lorsqu'ils sont secs et dépouillés de leurs feuilles. La fibre est alors assez cassante. Après nettoyage, les tiges de roseaux sont rassemblées en botte puis regroupées en ballot en fonction de la hauteur des tiges de roseau.

## UTILISATION

La récolte des roseaux est principalement destinée à la confection des toitures en chaume en France et dans le nord de l'Europe. Néanmoins, il existe une gamme de plus en plus variée de produits manufacturés pour la construction faits à partir de roseau. On trouve parmi eux les panneaux isolants et supports d'enduit ou les canisses.

# LE ROSEAU

21

*On appelle « roseau » diverses plantes des sols humides, principalement des graminées appartenant particulièrement aux genres *Arundo* ou *Phragmites*. Le roseau commun, *Phragmites australis*, est appelé aussi *Sagne* ou *petit roseau*.*

### ▽ Récolte manuelle des roseaux



### ▽ Bottes de roseau prêt pour couvrir une toiture



### ▽ Panneaux de roseaux isolants





▷ La canne est une espèce typique des paysages méditerranéens qui pousse le long des cours d'eau ou des chemins.



## LA CANNE DE PROVENCE

*Arundo donax* est une espèce de plante herbacée de la famille des Poaceae, sous-famille des Arundoideae. La sous-espèce *Arundo donax* var. *versicolor* est connue sous le nom de Canne de Provence.

### LA PLANTE

La canne est une plante herbacée à rhizome, caractéristique des lieux aquatiques des régions méditerranéennes. D'aspect proche du bambou, elle a de grandes feuilles effilées et retombantes. Sa hauteur varie de 1 à 8 mètres. Suivant les conditions de culture, elle peut avoir une tendance invasive. Elle supporte facilement la sécheresse une fois installée.

### LA FIBRE

La tige cylindrique de la canne est segmentée régulièrement par des nœuds. Elle est creuse, dépourvue de moelle et très ligneuse. Récoltée après la descente de sève, elle est souple et robuste, facilement sciable. Les vanniers épluchent les tiges avant de les fendre dans leur longueur en plusieurs lanières égales à l'aide d'un simple outil taillé dans un bois dur.

### UTILISATION

Traditionnellement cultivée pour la vannerie et la confection de calames, instruments d'écriture et de calligraphie, la canne est aussi la matière première des anches des instruments à vent de la famille des bois. Les structures permanentes ou éphémères de Canya Viva sont réalisées à partir d'arcs en cannes associées à d'autres ressources locales.

▽ Séchage des cannes au soleil



▽ Cannes récoltées et entreposées



▽ Arcs de Canya Viva





Il existe plus de 1000 espèces de bambous réparties en 78 genres et 18 sous-tribus, vaste monde que celui des bambous !

## LA PLANTE

Plante des régions tropicales, ou subtropicales, les bambous sont aussi adaptés aux climats tempérés. Ils se développent en touffes serrées à partir de leur rhizome. Le bambou est caractérisé par une croissance très rapide. Certaines espèces peuvent croître jusqu'à un mètre par jour. Il peut atteindre une dizaine de mètres de hauteur.

### ▽ Tiges de bambou



## LA FIBRE

La tige principale est un chaume lignifié, cylindrique et creux, cloisonné au niveau des nœuds. La cicatrice visible aux nœuds est la trace de la gaine des feuilles tombées. Le bois des chaumes, riche en silice, est très dur et très résistant. Les bambous sont flexibles, ils se balancent aux vents forts et plient sous le poids de la neige, mais ils ne se cassent rarement.

### ▽ Fibras de bambou tressées



## UTILISATION

Le bambou a de multiples usages. Il est cultivé comme plante d'ornement, les jeunes pousses sont comestibles. Le bois de la tige sert pour l'ameublement. Le bambou est utilisé traditionnellement pour la construction légère, notamment pour des échafaudages. De plus en plus d'architectes contemporains s'intéressent au bambou et l'utilisent comme structure porteuse.

### ▽ Echafaudage en bambou



# LE BAMBOU

*Les bambous ou Bambuseae forment une tribu appartenant à la famille des graminées. Une tribu est un ensemble de plantes, un rang inférieur à la sous-famille et supérieur au genre.*

## LE COTON

*Le cotonnier, du genre *Gossypium*, appartient à la famille de *Malvaceae* (Malvacées). Le coton est la fibre textile naturelle qui recouvre les graines du cotonnier.*

### LA PLANTE

Le cotonnier est une plante herbacée originaire de l'Inde. Cultivé dans les régions chaudes il mesure de 0,50 à 1,50 mètre de hauteur. On dénombre une trentaine d'espèces sauvages et quatre espèces cultivées : *Gossypium arboreum* et *G. herbaceum* (coton indien, fibres épaisses et courtes), *G. barbadense* (coton égyptien, fibres longues et fines), *G. hirsutum* (espèce la plus cultivée, fibres moyennes).

#### ▽ Fruit du cotonnier



▷  
**Champ de cotonniers.**  
Les fruits murs donnent le coton.



### LA FIBRE

Particularité du coton, les fibres proviennent de son fruit en forme de capsule qui s'ouvre à maturité. Les graines sont recouvertes par de longs poils unicellulaires (longs jusqu'à 30 à 40 mm) d'aspect soyeux qui constituent les fibres de coton formées de cellulose quasiment pure. On distingue deux types de fibres : des grandes fibres (soies ou lints), et des poils plus courts (duvet ou

linters).

### UTILISATION

Les fibres des textiles recyclés sont utilisées comme isolants. En vrac, en rouleau ou panneau souple le coton recyclé est employé comme matériau de remplissage.

#### ▽ Récolte du coton



#### ▽ Isolant projeté de coton recyclé





Ce sont les fruits, les noix de coco qui donnent le coir, cette fibre brune et résistante.

## LE COIR ou FIBRE DE COCO

25

*Le Cocotier, Cocos nucifera, est une espèce de palmiers de la tribu des Coccoae. Les Palmiers ou Palmacées forment une famille de plantes, aussi nommée Areaceae (Aréacées).*

### LA PLANTE

Le cocotier est présent dans toute la zone intertropicale humide. Surtout cultivé le long des côtes, il n'y reste pas confiné. En Inde, il est planté jusqu'à mille mètres d'altitude. Sa longévité dépasse un siècle. Il n'est pas constitué d'un tronc mais d'un stipe, tige rigide et robuste marquée par les multiples cicatrices des feuilles tombées. Son fruit est la noix de coco.

### LA FIBRE

Le coir entoure et protège la noix de coco, fruit du cocotier. Il est extrait manuellement ou mécaniquement, puis lavé et séché. Les fibres mesurent jusqu'à 35 cm de longueur pour un diamètre allant de 12 à 25 microns. Elles présentent une teneur élevée en lignine ce qui les rend plus solides que le coton. Elles présentent également une bonne résistance à l'action microbienne et à l'eau salée.

### UTILISATION

Traditionnellement la fibre de coco sert à la fabrication de cordage, de filets de pêches, de toiles, de tapis, de brosses, balais ou de rembourrage de matelas. Plus récemment, des géotextiles, entièrement fait à partir du coir, sont utilisés pour lutter contre l'érosion des sols. On trouve également des isolants sous forme de panneaux souples et du contreplaqué (fibres et résines).

#### ▽ Noix de coco



#### ▽ Récolte de la fibre



#### ▽ Panneau isolant en fibre de coco





# De la plante...

## LE SISAL

*Le sisal (*Agave sisalana*) est une plante de la famille des Agavaceae, originaire de l'Est du Mexique où on la trouve également sous l'appellation de henequén. Son nom provient de la ville de Sisal, située dans l'état mexicain du Yucatán. C'est à partir du port de Sisal qu'étaient expédiées les fibres dans le monde entier.*

### LA PLANTE

Le sisal est une plante résistante dans des climats chauds et arides, souvent impropres aux autres cultures. Elle ne fleurit qu'une seule fois, juste avant de mourir. Comme toutes les agaves, le sisal forme une rosette de feuilles épaisses qui se termine par une pointe acérée et présente des bords épineux. Ces feuilles, pourtant pleines d'eau, sont très rigides grâce aux nombreuses fibres qu'elles contiennent.

### LA FIBRE

Les fibres, situées à l'intérieur des feuilles dans le sens de la longueur, sont plus abondantes vers la surface. Le défilage s'effectue juste après la récolte. La pulpe est grattée à la main ou mécaniquement libérant les fibres. Elles sont longues de plusieurs dizaines de centimètres, épaisses et solides. Une étape de séchage est nécessaire avant de regrouper les fibres prêtes pour le tressage.

### UTILISATION

La fibre de sisal sert traditionnellement à la fabrication de cordes comme celle utilisée, avant que le plastique ne la remplace, pour serrer les bottes de paille. On trouve en Chine et au Laos des vêtements traditionnels en sisal. Ces fibres servent aussi d'armatures souples pour renforcer le plâtre ou pour des matériaux composites.



**De la plante à l'architecture : les différentes étapes de la récolte du sisal à la fabrication de cordes et leur tressage pour la fabrication du hamac en sisal de cette bibliothèque, construite à Muyinga au Burundi par l'agence BC Architects & Studies.**

# ... à l'architecture



# Fibres animales

28

*Composées de substances organiques, les fibres animales sont faites de protéines. Il y a deux types de fibres animales celles qui constituent le pelage ou le plumages des animaux et celles qui sont issues de sécrétions comme la soie. Ces fibres ont une longueur très variable qui va de quelques dizaines de centimètres pour les laines à plus d'un kilomètre pour la soie. Leur diamètre est de l'ordre de la dizaine de microns.*

## POILS ET PLUMES

Sous-produits de l'industrie animale, les poils et les plumes sont des productions de l'épiderme, respectivement, des mammifères et des oiseaux. Ils sont faits essentiellement de kératine, une protéine fibreuse. Cette protéine, en forme d'hélice, s'enroule autour d'autres molécules de kératine pour former des filaments intermédiaires. Ces assemblages de molécules sont très rigides, on parle de protéines de structure. Il faut une grande quantité de ces filaments pour former un poil. Ces productions de l'épiderme sont insolubles dans l'eau, elles résistent également aux solutions acides. En revanche, des solutions basiques, comme l'eau de Javel les dissolvent facilement. La laine de mouton est la fibre animale la plus utilisée dans l'industrie textile et dans le domaine de la construction. Obtenue par la tonte, suivant l'espèce du mouton, les fibres qui constituent la laine sont discontinues et mesurent quelques centimètres à plusieurs dizaines de centimètres. Une étape de filage est nécessaire pour assembler ces fibres. D'autres animaux fournissent également de la laine : l'alpaca, certaines chèvres donnent le cachemire, le mohair ou le pashmîna, le chameau, la vigogne, le yack, l'angora est une laine de lapin.

Tout comme la laine, les crins, les poils, les plumes et duvets servaient traditionnellement au rembourrage des matelas, sièges, coussins et édredons. Ces sont de très bons isolants thermiques utilisés en vrac ou en rouleau. Les fibres animales sont très résistantes dans le temps à condition d'être protégées des mites, insectes capables de digérer la kératine.

## LA SOIE

La soie est une sécrétion séchée produite par le ver à soie, chenille d'un papillon du genre Bombyx, ou par les araignées. Avant que la chenille ne se transforme en papillon, elle confectionne un cocon en sécrétant une sorte de bave filamenteuse dans laquelle elle s'enroule. Le cocon terminé comporte une trentaine de couches de fil. Considéré comme le seul fil continu fourni par la nature, le fil de soie se compose de filaments d'une longueur comprise entre 800 et 1200 mètres. Le fil de soie est majoritairement constitué de protéine différente des autres fibres animales, la fibroïne. Enfin, la soie est la fibre naturelle la plus résistante.



▷ Les poils de cochons sont des poils parmi les plus épais. Ils servent traditionnellement à la fabrication de brosses et de pinceaux. Ils servent également de fibres d'armature dans des enduits terre.



▽ Le ver à soie sécrète de la soie en fabricant le cocon dans lequel il s'enferme pour commencer sa métamorphose. Le cocon de soie protège la chrysalide jusqu'à ce qu'elle se transforme en papillon, le Bombyx du mûrier. Les araignées produisent une soie similaire pour fabriquer le fil de leur toile.

29



△ La laine est une fibre obtenue par la tonte des moutons. Suivant la race de l'animal les laines sont plus ou moins fines. La laine Mérinos est une des plus douces. Par extension on désigne par laine celle obtenue par la tonte d'autres espèces. On trouve parmi elles le cachemire ou le mohair (chèvre), l'angora (lapin), l'apaga (alpaca), etc.

▷ Les plumes de canard, de poulet et autres sont utilisées traditionnellement pour le rembourrage d'oreillers, de couettes, duvet et édredons. Seules les plus petites et les plus douces sont réservées à cet usage. Les plumes plus grossières sont valorisées comme isolants pour la construction.





# Ressources abondantes

30

## PLANTES ENVAHISSANTES

*Les espèces invasives perturbent l'écosystème et la biodiversité locale. Les problèmes écologiques causés par les plantes envahissantes peuvent eux-mêmes engendrer des problèmes sociaux et économiques.*

Une part restreinte des plantes exotiques introduites en France par la main de l'homme, c'est à dire en dehors de leurs aires de répartition naturelle, parvient à se reproduire de façon autonome et à persister. Après 25 ans de présence, les botanistes parlent de plantes naturalisées. Les plantes invasives sont un sous ensemble de ces plantes naturalisées capables de se propager rapidement dans leur nouveau territoire. Elle peuvent engendrer des dommages ou amplifier des dégradations d'origine humaine : réduction locale de la biodiversité, uniformisation des paysages, modification du fonctionnement des écosystèmes, dégâts sur les plantes cultivées, etc. Ils existent des moyens de lutte physique, dont l'arrachage, chimique ou biologique qui sont adaptés à l'espèce et au milieu. Mais, la prévention reste sans nul doute le meilleur moyen de contenir la propagation de l'espèce. Ces espèces invasives constituent une ressource abondante de matière première renouvelable. La renouée du Japon est l'un des espèces les plus envahissantes d'Europe occidentale. Lutter contre cette espèce est très difficile à cause du réseau très important de rhizomes pouvant atteindre 10 m de longueur et s'enfoncer jusqu'à 3 m de profondeur.

En outre, un simple fragment de rhizome ou une bouture de tige peuvent donner naissance à un nouvel individu. D'autres plantes envahissent les milieux aquatiques. C'est le cas de la jacinthe d'eau qui forme des populations très denses à la surface d'eaux douces, limitant ou annulant la pénétration de lumière dans l'eau et les échanges gazeux avec l'atmosphère. Certaines espèces invasives ont des impacts sur la santé. C'est le cas de l'ambrosie à feuille d'armoise dont le pollen est très allergène. Cette plante fait l'objet d'éradication dans une dizaine de départements français. Une autre ressource abondante est la laitue de mer qui envahit régulièrement les côtes bretonnes.





△ La jacinthe d'eau est considérée comme la plus redoutable des plantes envahissantes des milieux aquatiques.



◁ Le robinier faux-acacia, cultivé depuis le XVII<sup>e</sup> siècle pour la résistance de son bois, modifie fortement la flore qui l'entoure, conduisant à des forêts très pauvres (ronces et orties).

▽ L'ambrosie à feuille d'armoise est une espèce invasive en pleine extension dans toute la France. Plante annuelle, ses feuilles sont découpées et inodores. Du fait de son pollen très allergène, son arrachage est systématique dans certaines communes.



△ L'herbe-de-la-pampa est une vivace à croissance très rapide et très compétitive utilisant une grande quantité de ressources nutritives au détriment de la flore indigène.



△ La renouée du Japon, vivace à rhizome, très répandue en Europe occidentale a un très fort impact sur la biodiversité locale, s'opposant à la régénération naturelle de la forêt. Ces peuplements denses au bord des rivières favorisent également l'érosion des berges.

▷ Ces algues vertes, dont fait partie la laitue de mer, sont des plantes invasives des côtes bretonnes. Leur développement excessif est dû au phénomène d'eutrophisation de l'eau.





## FOCUS : LA MASSETTE AU SÉNÉGAL

*Les massettes, plantes du genre Typha, également appelées quenouilles, sont des plantes invasives au Sénégal, typiques des bords des eaux calmes, des fossés, des lacs, des marais et plus généralement dans les milieux humides. Typha est l'un des deux ou trois genres de la famille des Typhacées. Au Sénégal, cette plante est devenue envahissante. Quelle est cette plante ? Où la trouve-t-on ? Quels en sont les usages traditionnels ?*

### LA PLANTE

La massette fait partie des Typhacées, famille de plante monocotylédone poussant au bord de l'eau en colonies denses. Elle possède un rhizome, une tige entourée de feuilles et une inflorescence typique. Cette dernière est dense et en forme de quenouille dans laquelle les fleurs femelles et mâles sont clairement séparées (monœcie). Les fleurs mâles sont placées au dessus des fleurs femelles au bout d'une tige florifère. La fleur femelle, épi compact brun et velouté, éclate lorsqu'elle arrive à maturité. Elle laisse s'échapper une sorte de duvet très volatil auquel sont accrochées les graines de la plante. Les feuilles sont plates (ou légèrement triangulaires) et croissent à la base de la plante. Elles forment une gaine qui entoure la tige. Cette dernière, plus dure et plus dense que les feuilles, a une section ronde. Les massettes ont une large aire

de répartition dans les régions tempérées et tropicales. L'espèce la plus répandue est *Typha latifolia* que l'on trouve dans les régions tempérées de l'hémisphère nord. *Typha angustifolia* est quant à elle tout aussi répandue, bien qu'elle s'avance moins au nord. *Typha domingensis* s'étend des États-Unis jusqu'en Amérique du Sud. *Typha laxmannii*, *Typha minima* et *Typha shuttleworthii* sont confinées à l'Asie et à quelques régions du sud de l'Europe. Le fleuve Sénégal est envahi par *Typha australis*.

### UTILISATION TRADITIONNELLE

On retrouve, chez les indiens d'Amérique du Nord, un nombre très important d'emplois pour cette plante, qu'ils soient médicaux (le duvet de ses épis servaient dans certains bandages sur les brûlures, un onguent de racines pour soigner les plaies, etc.), alimentaires (toutes les parties de la plante étaient



△  
**Massette, plante du genre Typha qui pousse dans les milieux humides. C'est une invasive au Sénégal alors qu'elle est protégée en France.**

◁  
**Page de gauche, les différentes parties de la plante, de gauche à droite et de haut en bas : tiges, coupe des feuilles, duvet de la fleur et feuilles**

cuisinés) ou technologiques (feuilles tressées pour nattes, paniers et toitures, duvet des épis pour rembourrer oreillers, vêtements et matelas, la hampe, tige portant la fleur, rigide et effilée, qui servait de broche pour fixer divers matériaux). En France, et dans le reste de l'Europe, les feuilles servaient au rempaillage des chaises et à divers autres travaux de vannerie. On en tressait notamment des «capèches» pour protéger la tête des bêtes des courroies des attelages.

## DÉCHETS INDUSTRIELS OU AGRICOLES

*Une autre source abondante de fibres végétales ou animales est le secteur des déchets d'origine industrielle ou agricole.*

Les processus industriels de fabrication ou de la production agricole sont des sources importantes de déchets. Certains de ces déchets partent dans des filières de recyclage où ils sont valorisés. Les déchets constitués de matière en fibres, qu'ils soient bruts ou issus d'une filière de réemploi sont potentiellement utilisables pour la construction. Beaucoup de matériaux isolants sont issus de ces filières. C'est le cas de la ouate de cellulose faite à partir des journaux invendus. Ceux-ci sont simplement broyés avant d'être compactés dans des sacs pour en faciliter le transport. L'entreprise à but socioéconomique, le relais Métisse, a une action intéressante. En mettant en place la collecte et le recyclage des

vêtements ou autres textiles usés pour les recycler en isolant, elle permet la réinsertion des personnes en situation d'exclusion par la création d'emplois. Elle produit une gamme d'isolation thermique et acoustique en panneaux et rouleaux de coton recyclé.

Les sous-produits agricoles sont nombreux. Les rafles de maïs représentent des milliers de tonnes de déchets qui ne sont pas encore vraiment valorisés. Il en est de même pour la balle de nombreuses céréales, cette peau qui entoure chaque grain ou encore la bagasse. Il s'agit d'un résidu fibreux issu de la culture de la canne à sucre. La bagasse est une sorte d'aggloméré fabriqué à la Réunion à partir de la bagasse.



▷  
**Métisse® en vrac : laine de coton recyclé issu de la collecte de textiles.**



△  
La ouate de cellulose est faite à partir des journaux invendus. Après une étape de tri, le papier est simplement broyé en fines particules. Après ajout de sel de bore la ouate est brassée, prête à l'emploi.



△  
Les raffles de maïs constituent la partie centrale de l'épi où sont accrochés les grains de maïs.



△  
La glume ou balle de riz est composée de fibres courtes mais très résistantes.



▽  
Cosses de sarazin



△  
La bagasse est un résidu fibreux de la canne suite à l'extraction du jus pour la production de sucre

---

Comprendre le comportement de la matière en fibres est nécessaire pour mieux utiliser ces ressources dans la construction. Pour cela, des expériences simples tentent de rendre compte de quelques phénomènes physiques de la matière en fibres. Des références artistiques, en lien direct avec ces expériences, se sont insérées au fil des pages.

Ce deuxième chapitre explore la physique de la matière en fibres à travers le prisme des cinq thématiques 'matières' d'amàco. La première de ces cinq parties décrit quelques phénomènes physiques des fibres seules ou en interaction avec d'autres fibres. La partie suivante regarde les mélanges faits de fibres et de grains. Ensuite, c'est autour de l'eau et de ses interactions avec le monde des fibres. La quatrième et la cinquième parties présentent des pistes de recherches concernant, respectivement, la rhéologie des mélanges composés de matière en fibres et de matière molle et les interactions entre les liants minéraux et les fibres lors de leur mise en œuvre.

---

2 

---

 37

---

COMPRENDRE  
LA MATIÈRE EN FIBRES

---



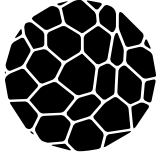
# Fibres et FIBRES

## *PHYSIQUE DE LA MATIÈRE CONSTITUÉE UNIQUEMENT DE FIBRES*

Le monde des fibres est si vaste qu'il est difficile de contenir toute la physique des fibres en quelques pages. Ce chapitre se contente de décrire quelques phénomènes physiques, en lien avec la construction, des fibres seules ou en interaction avec d'autres fibres.

Le premier point abordé est le lien entre le sens des fibres et les propriétés de cette matière. Le deuxième point regroupe les notions d'enchevêtrement et d'agglomération de fibres sans pourtant utiliser de colle. Enfin la dernière partie parle d'empilement de fibres, de matière aérée et de matière compacte.





# Sens des fibres

40

## MATIÈRE ANISOTROPE

*L'organisation et l'orientation des fibres donnent aux matières en fibres des propriétés particulières qui varient en fonction de la direction. Une direction importante de ces matières anisotropes est celle du sens des fibres.*

La plupart des plantes poussent en direction de la lumière. C'est ce processus naturel de croissance verticale qui est à l'origine de l'orientation des fibres végétales et de leur structure interne. Une matière très orientée présente de nombreux avantages dans la construction. Le bambou, le bois, le roseau et bien d'autres tiges

végétales sont très résistantes suivant la direction verticale mais s'écrasent facilement sous un effort transversal (expériences 1 et 2). Ces tiges sont constituées de fibres orientées et alignées selon la verticale. Les éléments structurels d'un édifice sont fabriqués en respectant le sens des fibres.



### EXPÉRIENCE 1

**Il est très facile d'écraser un morceau de bambou posé à plat. Une simple pression du pied suffit à aplatir la tige en forme de tube.**

**Les cloisons des nœuds du bambou renforcent localement. La tige de bambou est plus résistante à l'écrasement au niveau des nœuds.**



### EXPÉRIENCE 2

**Une tige de roseau résiste bien à la pression lorsque l'on appuie dans le sens des fibres : elle ne flambe pas, ni ne casse. En revanche, la tige posée à plat ne résiste pas longtemps à la même pression. Elle s'écrase complètement. La tige de roseau, dû à sa forme et à l'orientation des fibres, est bien plus résistante dans le sens longitudinal que transversale.**

▷  
EXPÉRIENCE 3

Lorsque l'on déchire délicatement du papier journal, la fissure suit le sens des fibres. A gauche, la déchirure progresse verticalement. A droite, on amorce une fissure perpendiculaire en sens des fibres, la déchirure est déviée de quasiment 90° !



41

Certaines matières, comme la pâte à papier, sont constituées de fibres naturelles qui s'orientent plus ou moins lors de sa fabrication. Avez-vous déjà remarqué que déchirer une feuille de journal en deux parties égales demande beaucoup d'efforts? Bien souvent, la déchirure est déviée de la trajectoire initiale. C'est ce que l'on observe avec l'expérience 3. Si l'on tente de déchirer une feuille perpendiculairement à son grand

côté, la fissure suit au début les lignes d'écriture puis très rapidement se courbe de 90°. La fissure est déviée dans le sens des fibres. Il est plus facile de suivre une fibre que de la couper en deux. La fissure prend toujours le chemin le moins coûteux en énergie.

Il en est de même pour le papier (expérience 4), mais le phénomène est moins spectaculaire. Le papier journal est bien moins résistant à la

déchirure qu'un papier d'excellente qualité. Dans ce dernier, les fibres sont assez désordonnées, ce qui ralentit la propagation d'une fissure. Des fibres totalement désordonnées constituent une matière homogène. C'est le cas, par exemple, de l'étape de défibrage de plaquettes de bois où l'alignement des fibres est rompu mécaniquement pour obtenir une matière isolante très aérée et homogène, la laine de bois.



◁  
EXPÉRIENCE 4

Une bande de papier découpée dans la hauteur de la feuille résiste lorsque l'on tire dessus. En revanche, si on découpe cette bande en suivant le petit côté de la même feuille, celle-ci cède rapidement : elle se coupe en deux morceaux avec peu d'effort. Le papier est plus résistant en traction dans le sens 'portrait' que dans le sens 'paysage'.

## FOCUS : LE FIL DU BOIS

*Le mot fil désigne le sens des fibres dans le bois dont la croissance s'effectue verticalement, en direction du ciel et de la lumière.*

42

La croissance de l'arbre est marquée par les cernes annuels du fait de l'alternance des bois d'été et de printemps. Les cellules, dont la paroi est faite essentiellement de cellulose et de lignine, sont orientées dans l'axe du tronc. La structure particulière des cernes, en tubes concentriques, laisse apparaître des veines et des dessins plus ou moins sinueux selon le débit choisi par le scieur. Les bois de fil bien droit sont plutôt brillants et faciles à travailler. Raboter une planche, fendre une bûche, les outils suivent le sens des fibres.

Pour de multiples raisons, l'arbre incline ses fibres de diverses façons et marque le bois de singularités, contrariant les outils de coupe. La plus courante est le nœud formé dès la naissance d'une branche. Parfois, l'arbre fabrique du contre-fil ou des fibres ondées. Il s'agit dans le premier cas de fibres perpendiculaires à l'axe du tronc.

Les tissus des bois ondés sont légèrement sinueux tous en restant parallèles entre eux, intercalant des zones mates et brillantes. Une autre origine de singularités des bois provient de blessures ou d'anomalies de croissance. C'est le cas de la loupe. Il s'agit d'une excroissance de l'arbre, une sorte de boule où les fibres s'enchevêtrent en poussant de manière chaotique et tourbillonnante.

Les singularités des bois de fil de travers sont considérés comme des défauts par les critères de classement de qualité commerciale des bois d'œuvre. Ces bois sont alors déclassés voire rejetés.

Au contraire, les jeu de couleurs, d'ombre et de lumière qu'offrent ces bois singuliers sont recherchés dans les métiers d'arts comme la lutherie, la marqueterie ou encore l'ébénisterie.



hêtre



loupe d'orme



merisier



◀ Raboter dans le fil du bois est un geste simple. Cela devient beaucoup plus complexe et imparfait dans le sens perpendiculaire.



cèdre



érable moucheté



érable ondé



chêne



noyer américain



noyer blanc



orme



poirier



loupe de peuplier



# Art & Matière

## LEE JAEHYO

*Lee Jae-Hyo est un artiste contemporain Coréen. Il travaille des matières naturelles comme le bois qu'il sculpte à la tronçonneuse. En 2002, le plasticien a obtenu le prix international de la sculpture en paysage forestier.*

La nature est à la fois la source d'inspiration et la matière première de son art. Il en parle ainsi :

*« J'éprouve un immense respect pour la nature. C'est elle qui me souffle mes œuvres. Je ramasse les rondins de bois dans les forêts, les pierres viennent du lit de la rivière. Choisir les uns ou les autres détermine déjà l'œuvre à venir [...] Je ne sais pas vraiment qui, du matériau ou de l'artiste, commande l'autre ! C'est comme si ma main suivait la pensée de la matière... Le bois possède ses caractéristiques propres. Je ne travaille pas contre lui, mais avec lui. C'est le matériau lui-même qui dicte mon geste, sa texture qui décide de la forme. On ne peut pas l'imposer de l'extérieur. »*



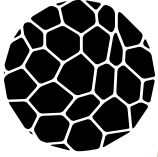


45

---







## LE TISSAGE

46

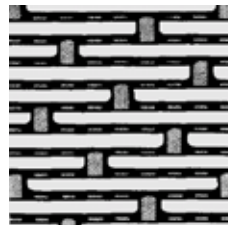
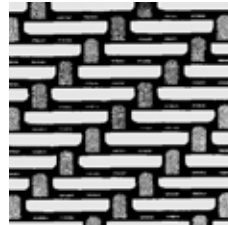
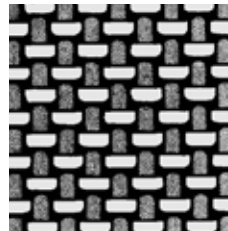
*Le tissage et la vannerie utilisent le principe des fibres enchevêtrées pour réaliser des tissus et objets aux textures, formes et fonctions particulières.*

Dans l'industrie textile, le principe du tissage est de former une surface continue à partir d'un entrecroisement de deux séries de fils perpendiculaires : les fils de chaîne longitudinaux et les fils de trame transversaux. Les fils de trame sont déroulés entre les fils de chaîne en passant alternativement au-dessous puis au-dessus. Les possibles modes d'entrelacement sont infinis. Prenons l'exemple de trois tissus couramment utilisés : la toile (drap en coton), le sergé (jean) et le satin. L'entrecroisement ou le réseau de points de contact des fils de chaîne et de trame dans la toile est très dense, le tissu est assez rigide. Le sergé est un peu plus souple. Les entrecroisements de fils sont moins nombreux et décalés, créant un effet oblique. Enfin, le satin est un tissu très souple et déformable. Les points de contact sont peu nombreux et permettent le glissement des fils de trame. Un carré de satin épouse parfaitement la forme d'un ballon de basket alors que le carré de sergé ondule. Le carré de toile s'éloigne rapidement de la courbe du ballon. La toile est très peu déformable.

Ainsi, à partir d'une même matière, en jouant avec le motif de tissage, on peut obtenir toute une variété de surfaces continues distinctes en termes de transparence, de souplesse et de capacité à prendre une nouvelle forme.



Représentation de trois armures de tissus (de gauche à droite) : la toile, le sergé et le satin. Avec le même fil, le tissu prend un aspect très différent selon le tissage choisi. L'entrecroisement des fils formant la toile est dense : les nombreux points de contact entre fils de chaîne et fils de trames contribuent à la rigidité du tissu. En revanche, un nombre très limité de point de contact dans le satin permet sa souplesse et sa déformabilité caractéristiques.



## L'ART DE LA VANNERIE

47

Métier d'art, métier d'artisanat, la vannerie rassemble des savoir-faire millénaires. Les gestes du vannier se transmettent de génération en génération pour façonner nombre de fibres naturelles, en paniers, corbeilles et autres objets. Ils savent aussi repérer dans le paysage la plante qui donnera la meilleure fibre ou comment assouplir telle branche pour qu'elle fléchisse sans rompre.

Au delà de la technique, il y a cette grande diversité de matières et de traditions, preuve de l'incroyable capacité des vanniers à composer avec les ressources de leur territoire.



# Art & Matière

48

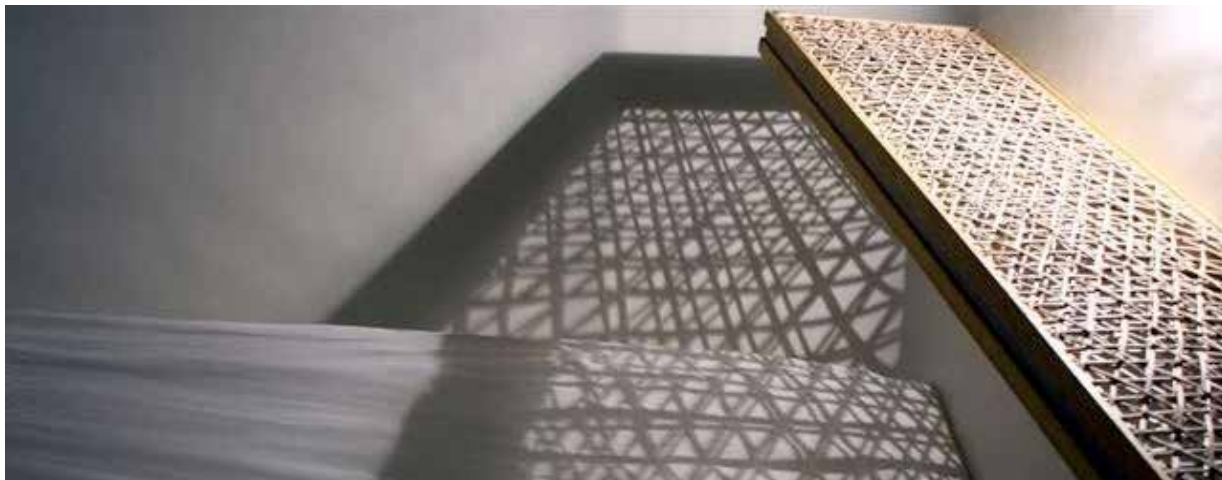
---

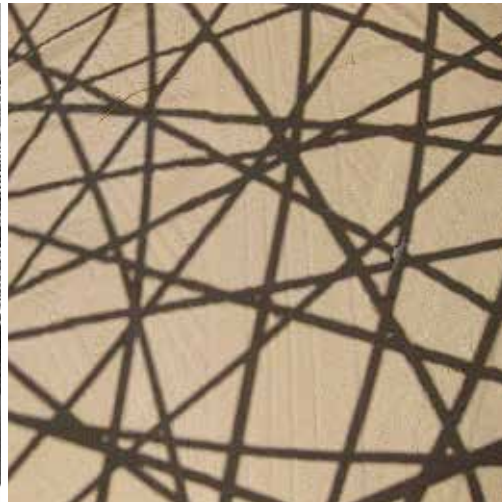
## EMMANUEL HERINGER

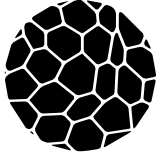
*Menuisier, charpentier, spécialiste des structures en bambou, Emmanuel Heringer travaille aussi le tressage des fibres comme élément d'architecture et de design.*

Il puise son inspiration dans les techniques et réalisations du monde de la vannerie. Les fibres tressées deviennent tour à tour éléments d'architecture : cloisons intérieures, plafonds, murs et garde corps, éléments du paysage : barrières et clôtures, ou éléments de design et objets d'art.

Emmanuel Heringer excelle dans la réalisation de claustras. Ces parois ajourées qui s'inspirent des moucharabiehs de l'architecture orientale permettent, outre le passage du vent pour apporter de la fraîcheur, de voir sans être vu.







# Enchevêtrement de fibres

50

## LES FORCES DE FROTTEMENT

*Enchevêtrer, selon le dictionnaire Larousse, signifie : « emmêler de façon indistincte et inextricable ». Pourquoi parle-t-on souvent de la matière en fibres comme une matière enchevêtrée ? Et quel rôle jouent les forces de frottement dans cet enchevêtrement ?*

Bien des isolants sont faits à partir de fibres issues du défilage de matières naturelles. Ces matériaux sont constitués d'un ensemble de fibres, de toutes tailles et en tous sens, si désordonnées qu'ils renferment beaucoup d'air. C'est un exemple de matière enchevêtrée. Pour introduire la notion d'enchevêtrement, Pierre-Gilles de Gennes prenait l'exemple de l'extraction d'un spaghetti, al dente, d'un plat entier. Lorsqu'on le tire, le spaghetti se tend puis glisse par petits à coups. Il reste solidaire des autres mais rompt si l'on tire trop

fort. Les multiples points de contact avec les autres spaghettis freinent son déplacement. Quelques gouttes d'huile suffisent à s'affranchir des forces de frottement. Les pâtes glissent librement, la matière se désenchevêtre.

Il y a donc un lien très fort entre l'enchevêtrement des fibres et le réseau de points de contact entre les fibres, points d'application des forces de frottement. Un réseau dense, des surfaces rugueuses ainsi qu'une forte pression sur les points de contact augmentent l'intensité des forces de frottement.



### △ EXPÉRIENCE 1

**Défaire une corde de chanvre permet de comprendre sa structure. Les fibres de départ ne dépassent pas 3 cm de long. C'est uniquement grâce aux forces de frottement que la corde tient et résiste !**



Coller sans colle ?

Grâce au frottement, le champ des possibles est immense : des scratches naturels aux phénomènes de gonflement ou dilatation, les matières naturelles nous offrent tout un panel de solutions techniques pour coller sans colle, sans liant.

Quid de la corde ?

Si l'on défait une corde de chanvre, on découvre une structure hiérarchique formée de brins de plus en plus fins (**expérience 1**). Il est surprenant de voir que pour former une corde longue de 100 mètres, on utilise uniquement des fibres de un ou deux centimètres ! Sans aucune colle, chaque fibre est en contact sur toute sa longueur avec les fibres voisines. Lors de la fabrication de la

corde, chaque brin subit une torsion qui resserre les fibres. Le frottement s'accroît et bloque les fibres les unes contre les autres.

L'**expérience 2**, les cahiers indissociables où les pages d'un cahier sont intercalées par les pages d'un autre cahier, illustre le même phénomène. Les pages frottent les unes contre les autres. Ces forces de frottement empêchent les cahiers de glisser. Il est impossible de les séparer !

Le phénomène d'enchevêtrement est visible avec des fibres métalliques juste versées en tas. Une colonne de fibre se forme rapidement (**expérience 3**). Le propre poids des fibres métalliques suffit à empêcher qu'elles glissent les uns sur les autres.



#### EXPÉRIENCE 3

**Une tour de fibres se forme en versant progressivement des fibres métalliques en tas. Peu à peu, certaines fibres s'enchevêtrent et restent à la cime de la tour, tandis que d'autres tombent jusqu'en bas. La pente de ce tas n'est pas régulière. Faible en bas, elle augmente quasiment jusqu'à la verticale !**



#### EXPÉRIENCE 2

**Les cahiers indissociables :**

**Ces deux cahiers se referment l'un sur l'autre, page par page, à la manière d'un tas de carte que l'on mélange. Chaque feuille est donc en contact avec deux feuilles de l'autre cahier, dessous et dessus. La surface de contact entre ces deux cahiers devient très importante. Les forces de frottement sont si grandes qu'il est très difficile de les séparer en tirant.**



**Le pont suspendu Q'eswachaka, fait à partir de fibres végétales trouvées sur place, est entièrement rénové chaque année. Traditions et savoir-faire se transmettent de génération en génération depuis l'époque inca.**

52

## LE PONT Q'ESWACHAKA

*Dernier pont suspendu au dessus de la rivière Apurimac, au Pérou, il est entièrement fait de fibres végétales trouvées sur place. La technique de construction du pont Q'eswachaka est inchangée depuis l'époque inca.*

Quatre jours par an, près de mille personnes appartenant à quatre communautés de la région de Cusco, Huinchiri, Chaupibanda, Chocchayhua y Ccollana Quehue, se rassemblent pour rénover ce pont, reproduisant les mêmes gestes depuis des siècles. Ce pont suspendu est constitué d'ancrages en pierre de chaque côté de la rivière à franchir, reliés par des cordages d'herbes tissées servant de structure porteuse au pont, renforcés à l'aide de branches tressées. D'autres cordages plus fins, reliant les cordes hautes et basses, servent de garde-corps.

Un mois avant la restauration complète du pont, des hautes herbes q'oya sont récoltées. Ce sont les brins de paille rigide et longue qui constituent la matière première de l'ouvrage. Après une étape de séchage au soleil, les brins d'herbe sont écrasés à l'aide d'une pierre. Puis ils sont trempés dans l'eau avant d'être façonnés en petites cordes nommées q'eswa. Chacune des 800 familles apporte une corde de 40 brassées de long (environ 70 mètres). Une trentaine de ces petites cordes forment une corde moyenne. Les cordes moyennes sont elles-mêmes assemblées pour former les 6 cordes principales. Quatre jours suffisent à démonter l'ancien pont et mettre en place le nouveau.

Ces festivités du mois de juin sont un élément important de la cohésion sociale des communautés participantes et renforcent les liens avec leur histoire et leur territoire.

En 2009, L'institut national de la culture du Pérou a déclaré comme patrimoine culturel national le rituel de rénovation du pont Q'eswachaka, ainsi que les savoirs associés à son histoire et à sa construction.







# Art & Matière

54

## JONATHAN BRILLIANT

*C'est à partir de fibres enchevêtrées que Jonathan Brilliant crée ses sculptures « monomatières ».*





55

Les installations de Jonathan Brillant sont fait d'un enchevêtrement de bâtonnets en bois, ceux qui servent à remuer le café. Elles sont entièrement créées in situ. Il utilise le frottement pour sculpter ces espaces et joue avec les forces de tension et de compression pour élever ces formes. Suivant la distance à laquelle on les regarde, ces sculptures deviennent tantôt transparentes, tantôt opaques. La densité du tissage et l'éclairage accentuent ces jeux de transparence.



# Art & Matière

56

## LAURA ELLEN BACON

*Installations à grande échelle, le plus souvent créées in situ, les sculptures de Laura Ellen Bacon mettent en scène la matière en fibres.*

C'est à partir de matières naturelles et ordinaires, comme l'osier, que Laura Ellen Bacon sculpte ces formes étranges, organiques et harmonieuses évoquant des nids d'oiseau.

D'une simplicité apparente, le tressage est dense et complexe. Les branches fines s'entremêlent de manière aléatoire. Laura Ellen Bacon joue avec la flexibilité et la tension des fibres pour créer ces espaces et formes qui dialoguent avec leur environnement qu'il soit naturel ou bâti.





## FOCUS : DU MICRO AU MACRO

*Certains comportements macroscopiques de la matière s'expliquent par des phénomènes physiques microscopiques, invisibles à nos yeux.*

58

Traditionnellement, le feutre fait office à la fois d'isolant et d'enveloppe extérieure des yourtes mongoles, protégeant du froid et de la pluie.

C'est à partir de laine brute, lavée et cardée que l'on fabrique le feutre : des brins de laine, mouillés et savonnés, sont simplement frottés les uns contre les autres. Pour comprendre ce qui permet l'enchevêtrement des fibres lors du feutrage, il faut porter notre regard à l'échelle microscopique.

Une fibre de laine animale, tout comme un cheveu, présente une surface rugueuse faite d'écailles. Chaque laine a une texture particulière qui varie suivant son origine. Une laine très douce comme l'alpaga a des écailles petites et resserrées. Au contraire, les écailles d'une laine plus grossière sont grandes et irrégulières.

C'est cette texture particulière qui permet le feutrage de la laine. L'eau chaude permet aux écailles de

s'ouvrir. Sous l'action du frottement, elles se coincent dans les écailles des fibres voisines. Les fibres s'enchevêtrent facilement, formant une matière homogène.

Le feutrage n'est possible qu'avec les fibres animales, à l'exception de la soie, car c'est une fibre lisse et régulière sans écailles. De même, les fibres végétales n'ont pas cette particularité indispensable au feutrage.

LAINÉ ÉPAISSE    LAINÉ FINE    ALPAGA    CACHEMIRE    SOIE    LIN    COTON    POLYESTER



◁ Les fibres présentent à l'échelle microscopique une grande variété de formes et de textures. Les fibres animales, à l'exception de la soie, ont une surface rugueuse faite d'écailles. La fibre de coton est aplatie et vrillée. Au contraire des fibres naturelles, la fibre synthétique de polyester est uniformément lisse.

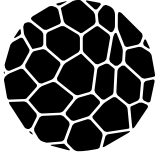


La laine brute est lavée et cardée avant d'être feutrée. Les fibres enchevêtrées du feutre ont une surface qui repousse les gouttes d'eau. Les gouttes de pluie ont tendance à s'écouler sur le feutre et ne sont que très peu absorbées.



Yourte mongole en construction. Du feutre de laine est directement posé sur les perches en bois. Il sert à la fois d'isolation et de protection contre la pluie, à la manière de la toison du mouton.





# Empilement de fibres

60

## UNE MATIÈRE PLEINE D'AIR

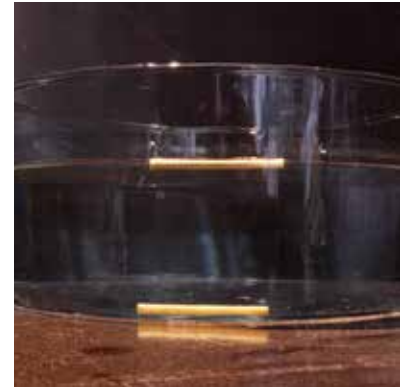
*Un matériau fait uniquement de fibres peut contenir une très grande proportion d'air. Le bois sec et massif contient en moyenne 60% de vide. La laine de bois est faite de plus de 90% de vide.*

A l'exception de certaines essences de bois très denses, les matières végétales sont plus légères que l'eau. Elles flottent sur l'eau car elles contiennent de l'air. La matière en fibres est en effet très poreuse, elle contient des vides de toutes les tailles.

Prenons l'exemple du roseau. Entre deux nœuds, la tige est creuse et renferme de l'air. Si on découpe un morceau de tige qui ne contient pas de nœud, l'eau entre à l'intérieur et remplace l'air. Pourtant, la tige de roseau, pleine d'eau, continue de flotter ! La matière qui constitue la tige est elle-même poreuse. Grâce à une bonne loupe ou un microscope, on peut voir des cavités. Certaines correspondent aux canaux qui transportaient la sève, d'autres sont simplement les parois des cellules végétales. A maturité, ces dernières sont vides.

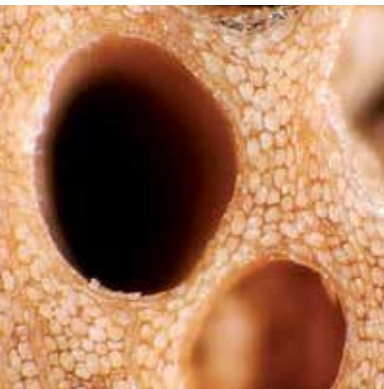
Sans ces cavités remplies d'air, les matières en fibres végétales ne seraient pas si légères. Après quelques jours sous l'eau, la tige de roseau ne flotte plus (**expérience 1**). Elle coule totalement au fond du récipient. Tout l'air initialement contenu dans la tige a été remplacé par de l'eau. La matière qui constitue la paroi des cellules végétales est bien plus dense que l'eau.

Dans le cas des cellules du bois, sa densité est d'environ 1500 kg/m<sup>3</sup>. Un bois très léger comme le balsa a une densité de 150 kg/m<sup>3</sup> à l'état sec : il contient plus de 90% de vide. En revanche, une espèce très dense comme le gaïac (1300 kg/m<sup>3</sup>) contient 13% de vide à l'état sec, il coule dans l'eau. C'est uniquement grâce à l'air qu'elle renferme dans ses nombreuses porosités que la matière en fibre flotte. Moins elle est dense, plus elle contient d'air.

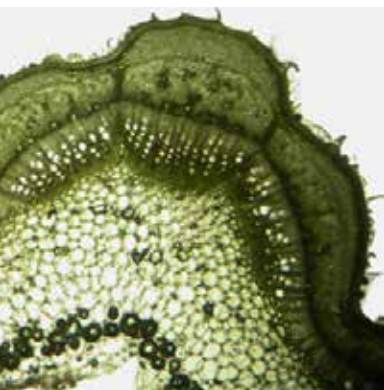


### △ EXPÉRIENCE 1

**La tige de roseau sèche flotte dans l'eau tandis que la tige de roseau imbibée d'eau coule. L'eau a remplacé l'air, plus léger que l'eau. La tige, plus dense que l'eau, coule.**



△ Porosité du bois



△ Porosité de la tige de chanvre

## PLUS DE VIDE POUR ISOLER

Il n'y a pas de meilleurs isolants que le vide. Un bon matériau isolant doit donc contenir un maximum d'air. La matière en fibres est une matière très poreuse, mais que peut-on faire pour introduire encore plus de vide ? Le bois massif est un isolant peu performant. Les copeaux en vrac isolent mieux, la laine de bois encore mieux. Une solution est donc de diviser la matière en éléments de plus en plus fins, de séparer les fibres qui la constituent pour introduire de l'air.

La taille et la forme des fibres ont un influence directe sur le volume qu'elles occupent. L'exemple des sciures de bois est très parlant. La même masse de matière occupe

des volumes très différents suivant la taille des copeaux (**expérience 2**). Un paramètre important est donc le facteur d'aspect : ratio de la longueur de la fibre sur son diamètre. Le volume occupé par des fibres est d'autant plus grand que le facteur d'aspect est élevé.

D'autres paramètres comme la forme, la rugosité, la souplesse ou la rigidité, ont également une grande influence sur l'empilement des fibres. Les scieurs et les bûcherons connaissent bien ce phénomène. Un stère de bûches de 20 cm de long contient plus de bois qu'un stère de bûches de 40 cm coupées dans le même arbre ! Les bûches plus courtes prennent moins de place, leur empilement est plus compact.

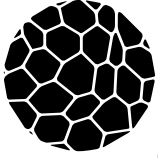
61

### ▷ EXPÉRIENCE 2

La même masse de différentes sciures est versée dans des verres identiques. Le volume occupé par la sciure change d'un verre à l'autre. Les copeaux les plus courts occupent un dixième du verre tandis que les copeaux les plus allongés occupent tout le verre. Ce dernier contient donc dix fois plus d'air que la sciure fine!







## VERSER, VIBRER, TASSER, etc.

*La compacité d'un empilement de fibres varie avec la mise en œuvre. Dans le cas de fibres rigides, quand on agite, vibre, secoue, celles-ci s'alignent, remplissant les vides. Leur empilement devient plus compact.*

### DES FIBRES EN DÉSORDRE

Il ne suffit pas d'avoir des fibres longues et fines pour avoir un maximum de vide. Des fibres bien alignées, quelle que soit leur longueur, peuvent atteindre une compacité très dense. C'est un peu comme le linge : il prend beaucoup moins de place dans l'armoire lorsqu'il est bien plié qu'en vrac dans la corbeille. Des fibres en désordre occupent plus d'espace que des fibres bien ordonnées. C'est le cas de ces cure-dents : versez-en une grande quantité dans un récipient et secouer-le doucement (**expérience 2**). Le tas désordonné peu à peu s'ordonne et se tasse, son volume diminue. L'empilement final est plus compact. La proportion de vide dépend de la mise en œuvre de la matière en fibres. Le simple fait de tasser de la chènevotte dans un récipient transparent nous le montre (**expérience 1**). Plus les fibres sont vibrées, tasser ou compacter plus leur empilement est dense.



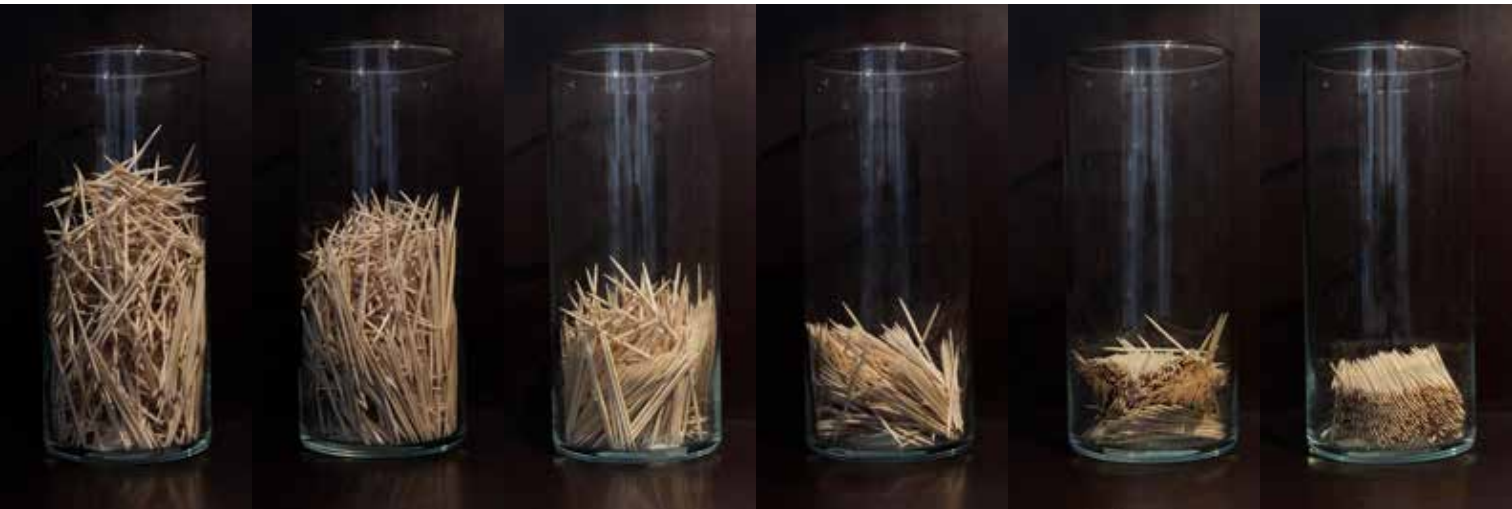
#### EXPÉRIENCE 1

**Il y a la même masse de chènevotte de chanvre dans les deux récipients : à gauche, elle est simplement versée, à droite elle est tassée couche par couche. Après compactage, la chènevotte occupe un volume plus petit.**



#### EXPÉRIENCE 2

**Des cure-dents versés en vrac dans un grand verre occupent un grand volume. Si on secoue le verre, peu à peu les cure-dents se tassent. Le volume qu'ils occupent diminue. Plus ils sont alignés, moins ils occupent de place. On parle de compacité de plus en plus importante, de matériau de plus en plus dense.**





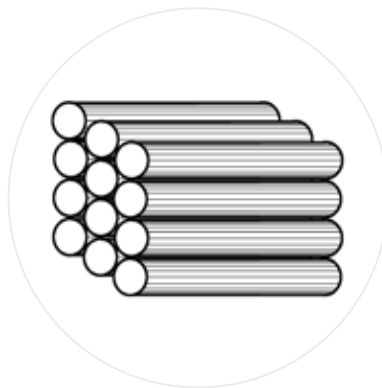
### COMPACITÉ LÂCHE

Cet empilement correspond à une mise en œuvre versée. Le volume apparent d'un tas de fibre est alors très aléatoire, même pour un type de fibre donné. Il dépend très fortement des conditions de remplissage. La compacité moyenne d'un mélange type est inversement proportionnelle au facteur de forme des fibres.



### COMPACITÉ DENSE

Il s'agit d'un empilement observé après vibration. Une mise en œuvre vibrée réorganise les fibres, elles se tassent. Le volume apparent est plus petit que celui de l'empilement lâche. La compacité moyenne d'un mélange dense varie également de manière inversement proportionnelle avec le facteur de forme des fibres.



### COMPACITÉ MAXIMALE

La compacité maximale correspond à un empilement théorique où toutes les fibres sont parfaitement alignées et ordonnées de façon à laisser le moins de vide possible entre elles. Les fibres sont en contact sur toute leur longueur.

# Fibres et **GRAINS**

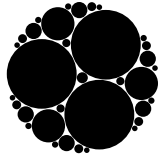
## *PHYSIQUE DE LA MATIÈRE CONSTITUÉE D'UN MÉLANGE DE FIBRES ET DE GRAINS*

Dans la construction, la matière en fibres est souvent l'alliée de la matière en grains. Des systèmes constructifs récents, s'inspirant bien souvent des techniques traditionnelles de la construction en terre, se développent en associant fibres et granulats.

Ce chapitre dédié à la physique des mélanges de grains et de fibres, s'intéresse à deux axes. Le premier point développé concerne la compacité de ces mélanges. Le second point porte sur la notion d'angle de talus d'un milieu granulaire qui peut, grâce à l'introduction des fibres, s'approcher de la verticale.

**Ziggurat aqar-quf (ancien Dûr-Kurigalz) à  
l'ouest de Bagdad en Irak.**





# Compacité

66

## QUAND LES GRAINS REMPLISSENT LES VIDES

*Un empilement de fibres en désordre contient beaucoup de vide. Peut-on les remplir de sable ?*

Des grains suffisamment petits peuvent remplir les nombreux vides créés par un amas désordonné de fibres métalliques (**expérience 1**). Le sable s'écoule facilement à travers cet enchevêtrement dont la porosité est continue. Les grains de sable chasse l'air et prennent sa place. Se pose alors la question : « combien peut-on ajouter de sable fin dans cet amas de fibre ? » Il est étonnant de constater que dans un verre de fibres métalliques (**expérience 2**) il y a la place pour ajouter la quasi totalité d'un verre de sable très fin ! Si l'on choisit un sable plus grossier, le résultat ne sera pas aussi spectaculaire : tout le sable ne rentrera pas dans le verre de fibres.

Les fibres métalliques utilisées pour l'expérience sont longues et très fines. Elles s'enchevêtrent très facilement, formant des amas contenant une très grande proportion d'air. Ces fibres sont utilisées pour armer des bétons ultra performants. Elles sont mélangées avec la pâte de ciment frais. Dans d'autres cas, les fibres remplissent un coffrage et on coule ensuite un mortier. S'intéresser à la taille de grain qui peut s'écouler dans un tel enchevêtrement, renseigne sur le type de mortier que l'on peut couler sur ces fibres.





#### EXPÉRIENCE 1

**En s'enchevêtrant, les fibres métalliques forment un tas très désordonné. Le sable versé est fin. Il s'écoule très facilement dans les espaces vides entre les fibres.**

67

---



#### EXPÉRIENCE 2

**Un verre rempli de sable fin est versé sur un verre rempli de fibres métalliques. Tout le sable fin entre dans le verre de fibres métalliques ! On peut de la même manière couler un mortier frais sur un empilement désordonné de fibres métalliques.**

---



## CHOISIR LA BONNE TAILLE DE GRAINS ET DE FIBRES

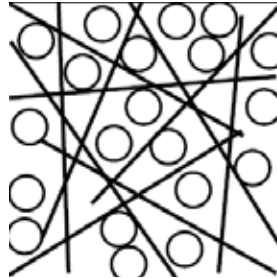
*Pour formuler un mortier fluide fibré, un empilement le plus compact possible du mélange sec de grains et de fibres est recherché. Plus ce mélange est compact, moins il y a besoin de liant pour remplir les espaces vides et fluidifier le mélange. Les tailles des grains et des fibres ont une grande influence sur la compacité.*

Des grains de sable fins remplissent facilement les espaces vides d'un enchevêtrement de fibres. En revanche, cela est plus difficile pour un sable plus grossier. La compacité d'un mélange de grains et de fibres dépend donc de leur taille respective. Selon les propriétés recherchées, il convient donc de bien choisir la taille des grains et la taille des fibres.

Pour comprendre ces changements de compacité, on peut observer ce qu'il se passe quand des fibres métalliques rigides sont mélangées au billes de verre. Le mélange est ensuite versé puis tassé dans un verre.

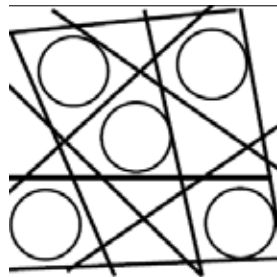
Dans le cas où les fibres sont longues par rapport aux billes (**expérience 1**), l'ajout de fibres augmente un peu le volume des billes. Les billes sont suffisamment petites pour combler les espaces vides entre les fibres. A l'inverse, dans le cas des plus grosses billes (**expérience 3**), les fibres se placent préférentiellement

dans les espaces vides de l'empilement de grains. Cependant, elles sont suffisamment grandes pour gêner cet empilement. Les fibres ont tendance à espacer les billes. Lorsque les fibres sont sensiblement de même taille ou plus petites que les billes, le volume final est nettement plus grand (**expériences 2 et 3 par rapport à l'expérience 1**). Le plus surprenant est que la plus grande augmentation de volume correspond à la taille de bille intermédiaire (**expérience 2**). Les tailles de grains et de fibres sont trop proches pour que l'un comble les espaces vides de l'autre. Les fibres forment, alors un enchevêtrement rigide à cause d'un réseau de contact très dense, bloquant les billes en formant des 'effets de cage'.



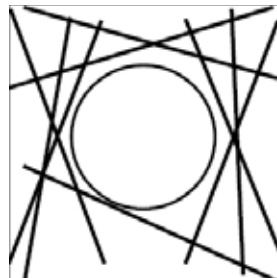
◁  
EXPÉRIENCE 1

Le mélange de 15% en poids de fibres métalliques de 20mm de long perturbe l'empilement de 300g de billes de verre. Le volume du mélange augmente un peu. Les billes de verre sont ici de très petite taille (1mm de diamètre). En tassant, elles se faufilent aisément et roulent tout autour des fibres métalliques, remplissant les espaces vides de cet enchevêtrement. Ce mélange correspond au plus compact des trois, c'est à dire au mortier le plus fluide pour un volume de liant donné.



◁  
EXPÉRIENCE 2

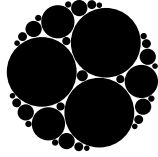
On ajoute dans 300 g de bille de verre de taille intermédiaire (5mm de diamètre), 15% en poids de fibres métalliques de 20mm de long. L'empilement de billes est ici très perturbé. On observe une grande augmentation du volume : il est presque trois fois plus important que dans le cas des petites billes. Les billes sont à la fois trop grandes pour remplir les vides de l'enchevêtrement de fibres et trop petites pour déstructurer ce dernier. Les billes sont coincées dans un réseau rigide de fibres, ce qui diminue la fluidité.



◁  
EXPÉRIENCE 3

L'ajout de 15% en poids de fibres métalliques de 20mm de long perturbe également l'empilement de 300g de grosses billes de verre (10mm de diamètre). Cependant, l'augmentation de volume est inférieure à celle de l'expérience 2. Les billes sont suffisamment grosses pour déstructurer l'enchevêtrement de fibres. Leur réseau de contact est peu dense, les fibres se glissent dans les espaces entre les billes. Ce mélange donnera une fluidité intermédiaire au mortier pour un volume de liant donné.





# Angle de talus

70

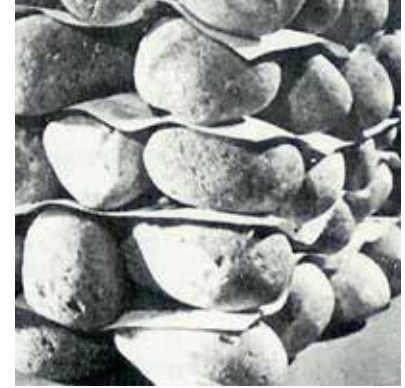
## TECHNIQUES CONSTRUCTIVES

*Sur la plage, là où les aiguilles de pins s'accumulent sur le sable, on observe parfois que la pente du tas de sable sec est nettement supérieure à la pente habituelle de 30°. Des fibres, comme les aiguilles de pin, permettent d'augmenter l'angle de talus du sable sec.*

C'est à partir de ces observations que Henri Vidal invente en 1963 la terre armée qu'il définit comme « un matériau doué d'une cohésion créée par les armatures ». La terre sèche, matière en grains, associée à des armatures, forme un système constructif extrêmement simple. Il commence ses expérimentations par réaliser des modèles réduits avec du sable et du papier. Les forces de frottements entre les grains et les fibres apportent la cohésion et la résistance de la terre armée. Aujourd'hui, le procédé de terre armée est utilisé partout dans le monde. Le parement constitué

d'écaillés en béton n'a pas de rôle structurel, il sert d'accroche aux armatures. Ces tirants métalliques, en s'opposant à la poussée horizontale des grains, autorisent la verticalité. Ils existent aujourd'hui une variété de systèmes constructifs qui se basent sur le principe de la terre armée. Les sacs de sable pour l'habitat d'urgence, le gabion associant pierres et grillage métallique retenus par des éléments horizontaux, les murailles de l'entreprise « Hesco Bastion » déployées en quelques minutes, etc., toutes ces techniques utilisent un parement extérieur. Cette

enveloppe qui détermine l'essentiel de la technologie de mise en œuvre définit également l'esthétique de l'ouvrage. Une fois le chantier terminé, c'est bien souvent le seul élément visible. Qui se douterait de la matière qui compose réellement le mur ? Il existe des systèmes constructifs vernaculaires qui sont exempts de cette enveloppe. C'est le cas de l'imposante Ziggurat de Dûr-Kurigalzu, en Irak, construite en brique de terre crue il y a plus de trois mille ans, qui subsiste encore malgré les siècles d'érosion. Des nattes de roseau placées environ toutes les cinq assises permettent à cette gigantesque masse de terre de présenter des parois verticales. Inventer en adaptant des nouveaux systèmes constructifs : enjeu économique de taille à relever !



◁  
**Ziggurat aqar-quf (ancien Dûr-Kurigalzu) à l'ouest de Bagdad en Irak. Des nattes de roseaux sont disposées environ toutes les 5 assises de briques de terre crue.**



◁  
**Mur de terre armée en construction.**  
 Les tirants métalliques sont déposés horizontalement entre deux couches de terre compactée. Ce sont ces éléments horizontaux qui assurent, par frottement, la cohésion du mur de soutènement, autorisant la verticalité. Les écailles en béton permettent de fixer une extrémité des armatures.

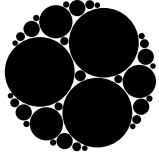
71



◁  
 A gauche : Le gabion est utilisé pour réaliser des murs de soutènement. Des cailloux sont déposés dans une cage métallique renforcée par des tirants.  
 A droite : Nader Khalili a inventé une technique qui consiste à construire des murs, des voûtes et des dômes à l'aide de sacs remplis de terre ou de sable. Cette technique est régulièrement mobilisée, entre autres, dans le cadre de l'habitat d'urgence.

▷  
 Une armature déployable associée à un textile permet de construire des murailles très rapidement. La technologie Hesco Bastion permet de déployer une muraille de 330m de longueur et de 2,2m de hauteur en moins d'une minute. Des bulldozers remplissent ensuite ces big bags avec la terre ou les granulats disponibles localement.





# QUAND LA MATIÈRE EN FIBRES JOUE LE RÔLE D'ARMATURE POUR LA MATIÈRE EN GRAINS

72

*La matière en fibres joue parfois le rôle d'armature dans un milieu granulaire, lui assurant une meilleure cohésion. Comment reprend-t-elle les efforts de poussée horizontale qui s'opposent à la verticalité ?*

Dans un milieu granulaire sous contrainte, les efforts se distribuent d'une manière bien particulière : par contact et frottement, ils sont transmis grâce à un réseau de chaînes de force formant des effets de voûtes. On peut observer cette distribution des contraintes grâce à la photoélasticimétrie. Placé dans un faisceau de lumière polarisée, un matériau « photoélastique » change en effet de couleur quand on lui

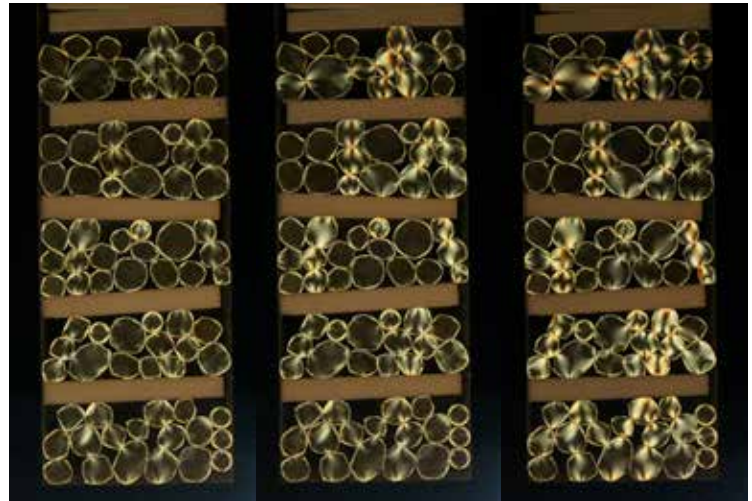
impose une contrainte. On observe alors que les chaînes de forces dirigent en partie l'effort vertical en direction des parois (expérience 1). La poussée horizontale est importante alors que peu d'efforts parviennent jusqu'au fond. Sans coffrage résistant à cette poussée horizontale, les grains auraient tendance à être expulsés par les côtés.

▽  
**EXPÉRIENCE 2**

**Des bandelettes horizontales symbolisent la présence d'armatures dans le milieu granulaire. Ces dernières changent le réseau de contraintes à l'intérieur du milieu granulaire. Les chaînes de forces sont mieux réparties sur l'ensemble des grains. Elles se dirigent d'une armature à l'autre et sont très peu déviée sur les côtés.**

▷  
**EXPÉRIENCE 1**

**En utilisant des grains plats découpés dans une matière photoélastique, il est possible d'observer le réseau de contrainte à l'intérieur d'un milieu granulaire. En exerçant une pression verticale, les chaînes de forces se matérialisent sous formes de lignes lumineuses.**





On peut alors se demander ce qu'il se passe en présence d'armatures horizontales. Les armatures, par frottement, s'opposent à la poussée horizontales et redirigent les chaînes de forces vers le bas (*expérience 2*). Des fibres libres peuvent jouer le même rôle pourvu qu'elles introduisent suffisamment de frottement grâce à un réseau dense de contacts rigides. Les armatures ou fibres en vrac ont donc un rôle structurel essentiel dans la construction à partir de matière en grains.

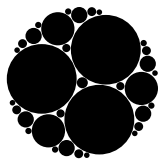
Ces constatations autour de l'association de grains et de fibres ont conduit à la réalisation d'une tour de sable de 3 mètres de hauteur et d'une incroyable finesse. Les murs en sable ont seulement une épaisseur de 4 cm pour une tour qui pèse environ 400 kg. Les armatures souples placées tous les centimètres assurent la verticalité et la résistance de cette tour de sable humide.



◁△  
La tour de sable qui mesure trois mètres de hauteur a des murs épais de seulement 4 centimètres d'épaisseur. La surface brossée fait apparaître les armatures qui permettent la verticalité des murs de sable.

---

---



## PÂTÉ DE SABLE SEC ET DE FIBRES RIGIDES

74

*La tour de sable est une réalisation étonnante de sable humide et d'armatures. Mais qu'en est-il avec du sable sec et des fibres? Peut-on construire sans peau extérieure pour retenir les grains de surface ?*

Obtenir un angle de talus proche de la verticale revient à formuler un mélange de grains et de fibres qui ne s'écoule pas. On cherche la taille de fibres et de grains de façon à ce que l'enchevêtrement de fibres retienne et bloque les grains de sable. Si l'on souhaite que le mélange puisse supporter un poids à la manière d'un solide, il faut également obtenir une bonne compacité. Il s'agit donc d'un compromis entre recherche d'effets de cage' et d'un mélange compact.

Si les grains sont trop petits (sable très fin), ils s'écoulent à travers le réseau de porosité continue des fibres (**expérience 1 à gauche**). On choisit des grains légèrement plus

gros (sable fin) que les espaces vides de l'amas de fibres (**expérience 1 à droite**).

En compactant ce mélange de sable et de fibres, couche par couche, dans un gobelet, on obtient un pâté de sable sec fibré (**expérience 2**). Le sable sec est maintenu au cœur de l'amas de fibre. Il ne s'écoule pas sous son propre poids, on peut observer un angle de repos proche de la verticale ! Cela est assez spectaculaire, car un tas de sable sec a habituellement une pente régulière qui forme un angle de 30° avec l'horizontale.

Encore plus étonnant, ce pâté de sable sec résiste à un poids de 8kg !



### EXPÉRIENCE 1

Choisir la bonne taille de fibres :

à gauche, fibres courtes : les espaces laissés entre les fibres sont très petits, les grains de sable tombent à l'extérieur du pâté de fibres.

à droite, fibre longues : les grains de sable s'écoulent à travers le pâté de fibres. Les espaces entre les fibres sont très grands : le sable n'est pas retenu par les fibres.



### EXPÉRIENCE 2

**Ce pâte de sable sec supporte un poids de 8kg !**

Détails de la mise en oeuvre : compaction par fines couches à la manière du pisé.



# Fibres et EAU

## *PHYSIQUE DE LA MATIÈRE EN FIBRES EN INTERACTION AVEC L'EAU*

L'eau est omniprésente dans les matériaux de construction. Elle est donc en constante interaction avec les matières qui les composent. Ce chapitre s'intéresse au comportement des fibres en présence d'eau, qu'elle soit sous sa forme liquide, de glace ou de vapeur.

Le premier point décrit le phénomène de gonflement et de retrait de la matière en fibres provoqué par l'eau. Le deuxième phénomène intéressant est en lien avec les comportements hydrophiles ou hydrophobes : souvent les fibres naturelles lorsqu'elles sont brutes repoussent l'eau et ont tendance à s'agglomérer entre elles. Des solutions pour faciliter leur mise en œuvre sont recherchées. Enfin, le troisième point souligne le rôle de l'eau pour assouplir les fibres.







# Retrait et gonflement

78

## CAS PARTICULIER DU BOIS

*Le bois gonfle en présence d'eau et se rétracte en séchant, pouvant causer des désordres importants à l'échelle du bâti. Bien comprendre ces phénomènes permet de les anticiper et de mettre en place des détails constructifs adaptés.*

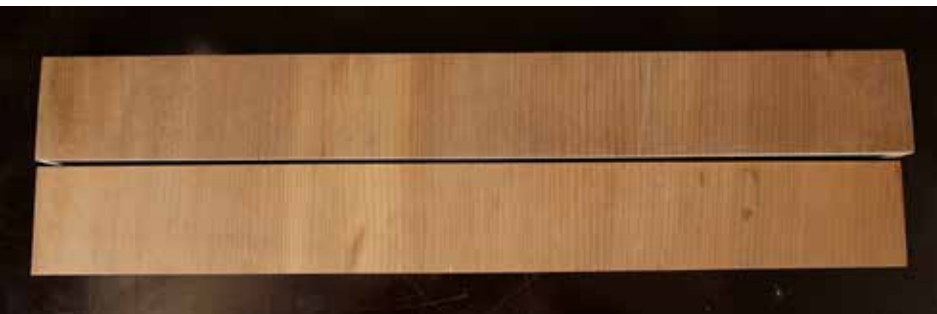
L'humidité provoque un gonflement des fibres de celluloses à l'échelle microscopique. Ce gonflement intrinsèque de la matière à des conséquences macroscopiques importantes. Le bois est un cas particulier de matière en fibres qui réagit fortement aux variations d'humidité (teneur en eau et humidité de l'air). Le bois massif, sec, gonfle lorsqu'il est en contact prolongé avec l'eau (**expérience 1**).

Ce gonflement n'est pas homogène : il est davantage marqué suivant l'axe

transversal de l'arbre, c'est à dire suivant la direction tangente aux cernes de croissance.

A l'inverse, le séchage du bois vert, provenant d'un arbre fraîchement abattu, entraîne un retrait de la matière. Ce retrait est facilement observable sur une tranche épaisse de feuillu qui vient d'être tronçonné (**expérience 2**). Une fissure s'ouvre de l'écorce vers le cœur. En revanche si la tranche de bois est suffisamment fine, elle se déforme sans fissurer.

Ces multiples déformations, dues au séchage du bois vert ou aux variations d'humidité dans le bois sec, sont à prendre en compte lors de la construction. Suivant le débit que choisit le scieur pour découper la grume, les profils de bois peuvent se vriller en séchant ou, s'ils sont déjà secs, à l'usage. Il existe de nombreux détails constructifs, notamment pour les plancher ou le bardage en bois, pour pallier et anticiper ces désordres.



### EXPÉRIENCE 1

On dispose d'une planche de bois sec que l'on scie en deux parties égales. L'extrémité gauche de ces planches, se situe au cœur de l'arbre et l'extrémité droite est proche de l'écorce (débit sur quartier). Les fibres sont orientées parallèlement au petit coté. La planche du haut est plongée dans l'eau pendant une semaine. Lorsqu'elle sort de l'eau, elle est plus longue que la planche restée sèche (en bas). Le bois mouillé a gonflé de manière transversale au sens des fibres.

▽  
EXPÉRIENCE 2

Une tranche de tronc de bois encore vert est sciée à la tronçonneuse. En séchant à l'air ambiant, le bois se rétracte. Le retrait s'effectue davantage dans le sens transversal aux fibres, c'est à dire tangent aux cernes du bois. Le cerne proche de l'écorce, plus grand que le cerne proche du cœur, subit donc le retrait absolu le plus important. Les fortes contraintes qui s'exercent à l'intérieur de la tranche provoquent la fissuration qui va de l'écorce jusqu'au cœur.



Il existe des détails techniques permettant de s'affranchir des contraintes provoquées par le gonflement et le retrait du bois. Le recouvrement des planches de bardage permet d'éviter les jours ou les désordres au niveau des jonctions.



L'artiste Pascal Oudet compose des objets d'art à partir de tranches de bois très fines. En séchant, la matière se rétracte. Le retrait du bois qui s'effectue dans le sens tangent aux cernes de croissances, est plus important vers l'extérieur qu'au cœur de la tranche. Pour compenser ces différences de longueur, la matière se courbe.

---





## LE PAPIER ET L'EAU

*Une goutte d'eau renversée sur une feuille de papier et celle-ci gondole.  
Pourquoi ces ondulations se forment-elles au contact de l'eau ?*

La pâte à papier est composée de fibres de bois et d'un liant. Au cours de la fabrication du papier, les fibres de cellulose sont orientées. Ce phénomène est très marqué pour les papiers de qualité inférieure. Au contact de l'eau, les fibres végétales gonflent, conduisant à une déformation locale du papier. On observe ce phénomène lorsqu'une goutte d'eau tombe sur du papier (**expérience 1**). Le gonflement des fibres n'est pas uniforme. L'**expérience 2** nous montre qu'une bande de papier calque totalement mouillée gonfle davantage lorsqu'elle est découpée

dans la largeur de la feuille. Les fibres sont alors orientées de manière perpendiculaire à la bande. Une fibre de cellulose d'une cellule de bois gonfle peu en longueur et beaucoup dans le sens transvers. Le papier compense ces excès de longueur (partie mouillée plus grande que la partie sèche) en ondulant (**expériences 3 et 4**) ou en se courbant (**expériences 5 et 6**). Quelle que soit la façon de mouiller le papier, ces ondulations et courbures apparaissent toujours en suivant le sens des fibres.



### EXPÉRIENCE 1

**Quelques gouttes d'eau sur une feuille de papier font apparaître des ondulations à l'endroit où le papier est mouillé. L'humidité gonfle le papier et l'oblige à se courber pour maintenir le contact avec les parties sèches de la feuille.**



### EXPÉRIENCE 2

**Une bande de papier calque (sèche en haut), s'allonge lorsqu'elle est mouillée. La bande de papier calque découpée en suivant le petit bord d'une feuille (en bas), s'allonge davantage que la bande, initialement de même longueur, découpée en suivant le grand bord de la même feuille (au milieu). Le gonflement du papier est anisotrope, il dépend de l'orientation des fibres.**



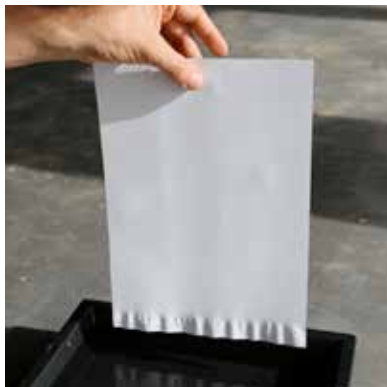


△  
EXPÉRIENCE 3

Les ondulations d'une feuille de papier dues à l'humidité sont orientées dans le sens vertical, quelle que soit la forme de la partie mouillée.

▽  
EXPÉRIENCE 5

On découpe un morceau de papier calque de forme carré en suivant les bords de la feuille. Déposé à la surface de l'eau, celui-ci s'enroule toujours de la même façon : deux bords parallèles se soulèvent et s'enroulent l'un sur l'autre.

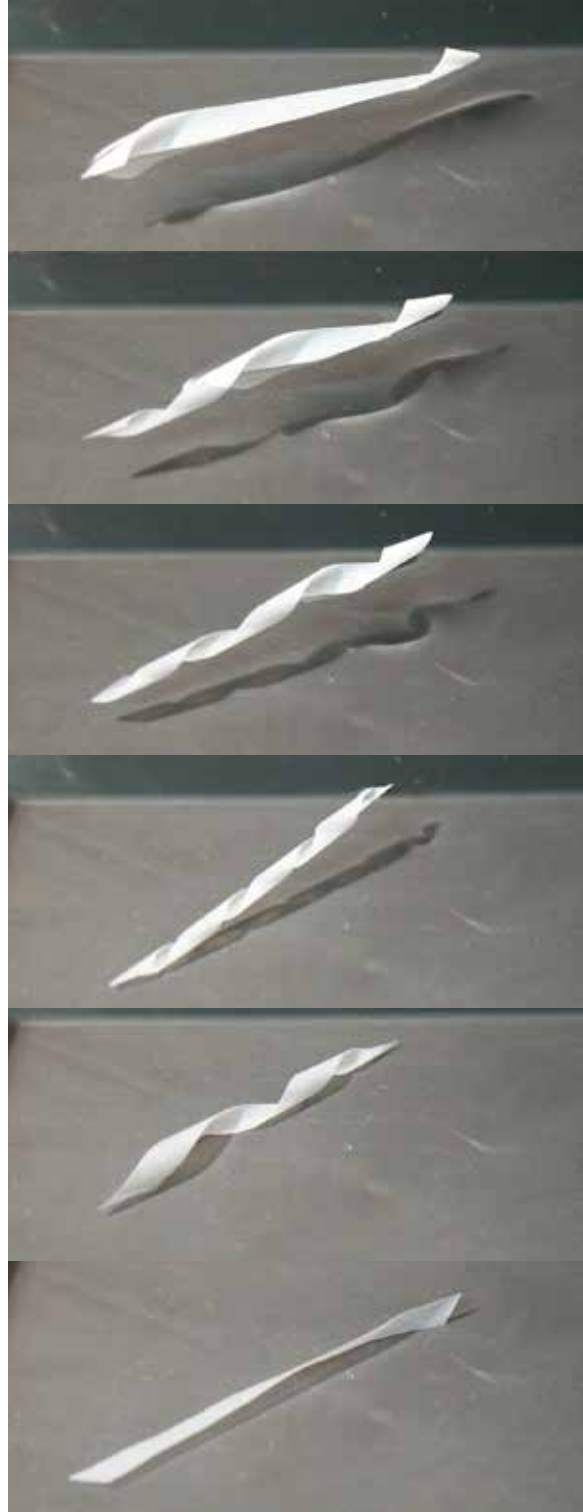


△  
EXPÉRIENCE 4

Ces ondulations deviennent particulièrement visibles et régulières lorsque le petit côté d'une feuille de papier est plongé à la verticale dans l'eau sur quelques centimètres.

▷  
EXPÉRIENCE 6

Une bande de papier calque coupée suivant la diagonale de la feuille est posée à la surface de l'eau. Le côté mouillé gonfle plus vite que l'autre face : la bande s'enroule. L'eau continue d'imbiber le papier, l'autre côté gonfle à son tour. Le papier coule en se déroulant.



# Art & Matière

82

---

## FLOTTILLE, ETIENNE CLIQUET

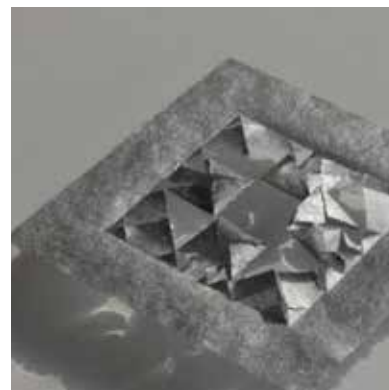
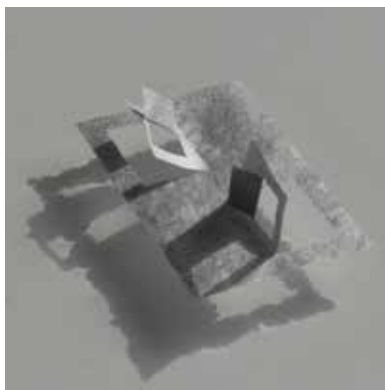
*Flottille est une série de 15 séquences vidéo montrant des micro-pliages en papier argenté s'ouvrir et se refermer lentement à la surface de l'eau.*

Etienne Cliquet développe depuis plusieurs années des recherches en origami assisté par ordinateur. Lauréat en 2011 des « Talents d'Argent » de la fondation François Schneider, le projet flottille met en scène la matière. Découpés par une machine pilotée par ordinateur dans du papier argenté, ces pliages se déploient en figures géométriques de quelques centimètres, au contact de l'eau.

La matière bouge, seule, non pas à cause de la gravité mais grâce à des phénomènes de capillarité et de tension superficielle qui s'exercent entre l'eau et le papier.

Cette œuvre, d'une simplicité apparente, face à la complexité des phénomènes physiques mis en jeu, suscite l'émerveillement. Un simple bout de papier se met en mouvement.

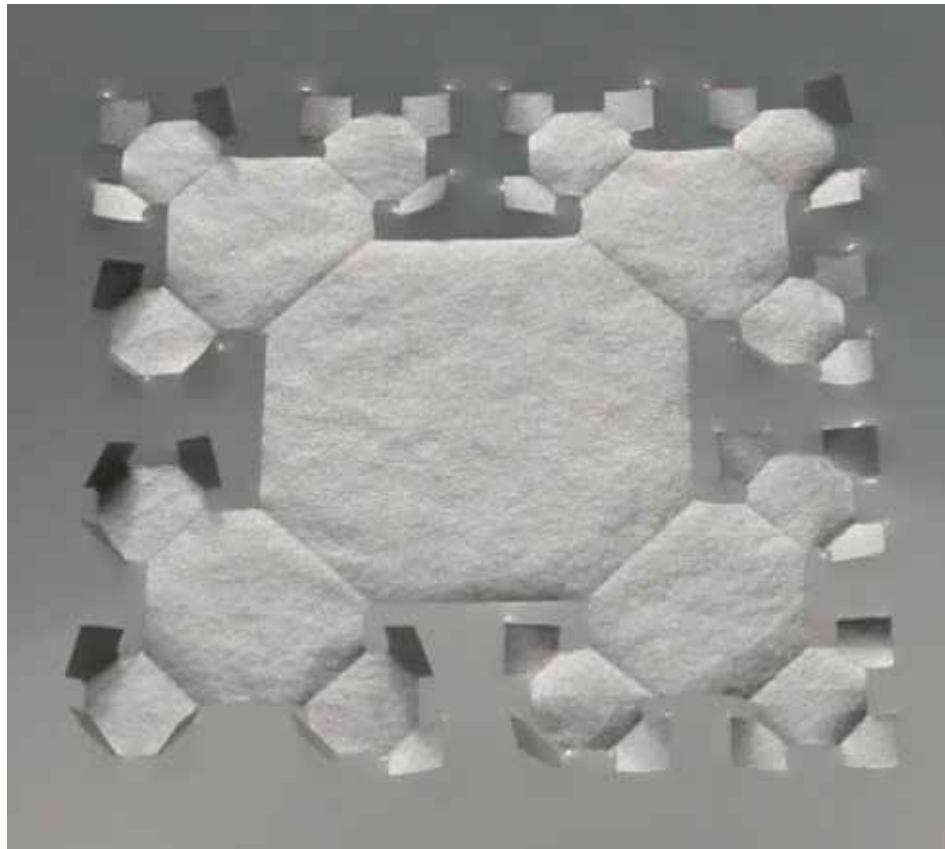
---





**Flottille.**

Des origamis en papier argenté s'ouvrent ou se referment lentement au contact de l'eau.





## DES FIBRES SENSIBLES

# AUX VARIATIONS D'HUMIDITÉ : L'EFFET BILAME

84

*Les pommes de pins s'ouvrent par temps sec et se referment par temps humide. Comment les variations d'humidité peuvent-elles mettre la matière en mouvement ?*

L'intérieur et l'extérieur d'une écaille de pomme de pin sont constitués par des matières différentes. Sous l'action de la chaleur, les écailles de la pomme de pin sèchent. L'eau absorbée s'évapore, la matière se retracte. Ce phénomène est plus important pour la partie extérieure de l'écaille car cette face est plus sensible aux variations de température. La face extérieure de l'écaille devient plus petite que la face intérieure. Ces différences de longueur induisent des contraintes à l'intérieur de l'écaille. Pour compenser ces différences de longueur et relâcher ces contraintes, l'écaille se courbe, la pomme de pin s'ouvre (**expérience 1**). Cette action est totalement réversible. Une pomme de pin sèche, ouverte, se referme complètement après quelques minutes passées sous l'eau. Inventés au XVIII<sup>e</sup> siècle, les bilames sont des instruments d'estimation de la température. Composés de

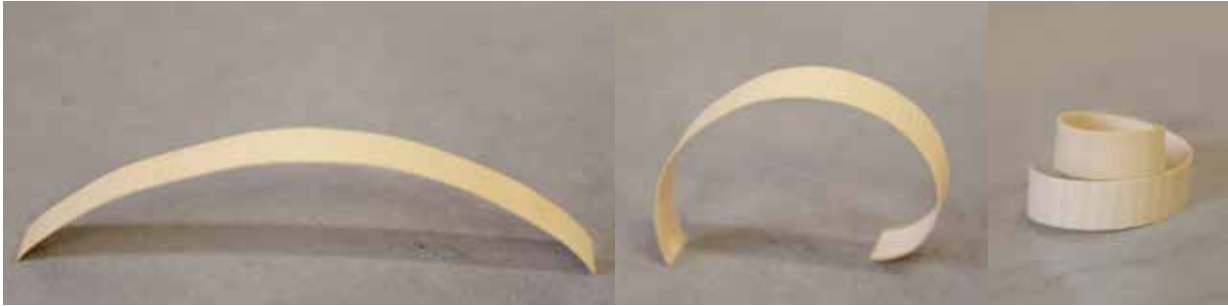
deux lames de métaux de nature distincte, la différence de dilatation induit des déformations. La mesure de ces déformations renseigne sur la température.

Une feuille de placage de bois est bien plus épaisse que du papier. Prenons une bande de 1 cm de largeur et une dizaine de longueur. Déposons-là quelques secondes à la surface de l'eau de telle sorte qu'une face soit mouillée, l'autre restant sèche. Cette bande de placage se comporte alors comme un bilame. La face mouillée gonfle et cherche à s'étirer alors que la face sèche ne s'étend pas. Comme dans le cas de la pomme de pin, la matière se courbe. Dans le cas du bois comme du papier, le gonflement le plus visible s'effectue toujours perpendiculairement au sens des fibres. Cette anisotropie oriente la courbure des bandes (**expériences 2, 3 et 4**) qui s'enroulent perpendiculairement au fil du bois.



### EXPÉRIENCE 1

En séchant, les écailles de la pomme de pin s'ouvrent.  
A l'inverse, elles se referment au contact de l'eau.



85



#### EXPÉRIENCE 2

Une bande de 1 cm de largeur et d'une dizaine de centimètre de longueur est découpée dans une feuille de placage de sycomore, perpendiculairement aux fibres du bois. Lorsqu'une face est mouillée, elle gonfle dans la direction transversale aux fibres. La face sèche ne gonfle pas. Pour compenser cette différence, la bande se courbe.



#### EXPÉRIENCE 3

Une même bande découpée dans le sens des fibres, se courbe, lorsqu'une face est mouillée, dans sa longueur.



#### EXPÉRIENCE 4

Des fibres en diagonale orientent la courbure de cette bande dont une face est mouillée.





## FOCUS : PROJET HYGROSKIN

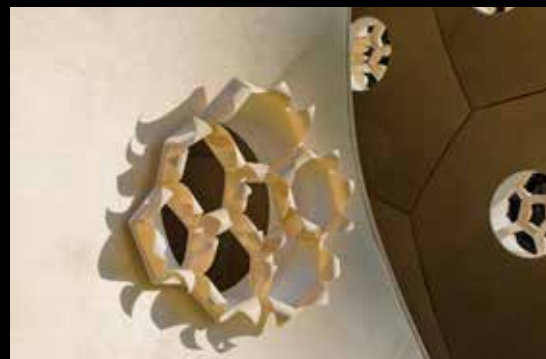
86

Réalisé en bois composite, le projet Hygroskin, Meteorosensitive Pavillon reprend le principe de la pomme de pin. Les ouvertures répondent aux changements d'humidité relative. Elle s'ouvrent et se referment, laissant entrer la lumière à l'intérieur du pavillon lorsque le temps est humide. La peau du pavillon est ainsi capable de réagir avec son environnement, en détectant ces variations elle se met en mouvement.

Les ouvertures du pavillon sont réalisées en placage de bois. Elles sont composées de cinq ou six triangles. Les fibres du bois sont orientées parallèlement à la base de chaque triangle. L'augmentation de l'humidité dans l'air entraîne le gonflement des fibres en largeur, c'est à dire dans le sens de l'allongement du triangle de la base vers la pointe. Le triangle se courbe autour de la face extérieure car celle-ci est vernie : elle est insensible à l'humidité et ne gonfle pas. Seule la face intérieure gonfle et s'allonge. La feuille de placage se courbe pour compenser cette différence de longueur. Cette déformation est davantage marquée quand le taux d'humidité relative de l'air (RH) est élevé.

Architectes: Achim Menges Architect + Oliver David Krieg, + Steffen Reichert

Localisation: Orléans-la-Source, France



30% RH



36% RH



43% RH



49% RH



55% RH



62% RH



69% RH



75% RH



Les ouvertures du pavillon Hygroskin sont sensibles aux variations d'humidité de l'air. Quand l'air devient humide, les triangles de placage de bois se courbent, laissant entrer la lumière à l'intérieur du pavillon. Elles se referment dès que l'air devient s'assèche.



# Hydrophile ou hydrophobe ?

88

## COTON BRUT ET COTON BLANCHI

*Le coton brut, issu de la récolte du cotonnier, repousse l'eau. Au contraire, le coton blanc du commerce à une grande capacité d'absorption d'eau. Quelles sont les différences de ces cotons pourtant issus de la même plante ?*

Le fruit mur du cotonnier donne un coton brut de couleur écru. Plusieurs traitements chimiques le transforment en coton blanc : celui que l'on utilise pour la toilette des nourrissons ou pour se démaquiller. Ce dernier est capable d'absorber une grande quantité d'eau. Il est d'ailleurs parfois vendu sous le nom de coton hydrophile, c'est à dire « qui aime l'eau ». Avant tout traitement chimique, le coton brut

est plutôt hydrophobe. Une goutte d'eau sur du coton brut forme une boule presque sphérique, il repousse l'eau (**expérience 1**). Déposé à la surface d'un grand volume d'eau, le coton brut flotte alors que le coton blanc coule (**expérience 2**). Le traitement chimique qui transforme le coton brut et hydrophobe en coton blanc et hydrophile s'appelle le débouillissage. Ce traitement consiste à plonger le coton brut dans un bain alcalin porté

à ébullition ou en autoclave sous pression afin de le débarrasser des cires et des impuretés naturelles et le rendre hydrophile. Les cires sont des composés gras qui entourent les fibres de cellulose, principal composant du coton. Elles participent au caractère hydrophobe du coton brut et sont absentes dans le coton blanchi. L'hydrophobie de certaines fibres naturelles peut compliquer leur mise en oeuvre.



### EXPÉRIENCE 1

**Une goutte d'eau déposée sur du coton brut prend quasiment la forme d'une sphère. Le coton brut repousse l'eau, il est hydrophobe.**



### EXPÉRIENCE 2

**Une boule de coton brut, de couleur écru, flotte à la surface de l'eau alors que le coton blanc coule très rapidement. Le coton brut est hydrophobe, le coton blanc hydrophile**



## EAU CHAUDE ET EAU FROIDE

89

*La laine de mouton ne se comporte pas de la même façon dans l'eau froide et l'eau chaude. Tantôt elle flotte, tantôt elle coule, ces fibres sont elles hydrophiles ou hydrophobes?*



### EXPÉRIENCE 3

**De la laine de mouton en vrac, après lavage, flotte sur l'eau froide. Le lendemain, elle flotte encore.**



### EXPERIENCE 4

**La même laine déposée sur de l'eau chaude coule doucement. Quelques minutes suffisent pour qu'elle tombe tout au fond du récipient. La laine a une grande capacité d'absorption de la vapeur d'eau.**

La laine flotte sur l'eau froide (expérience 3) alors qu'elle coule dans l'eau chaude! (expérience 4). Une goutte d'eau froide versée sur de la laine forme une perle presque sphérique. Les fibres de laines ont alors un comportement hydrophobe vis à vis de l'eau liquide. Placée dans l'eau chaude, cette même laine coule très rapidement au fond du récipient. Les fibres ont un comportement hydrophile en présence d'eau chaude. La température de l'eau joue, donc, un rôle important dans le cas de la laine, capable d'absorber et de relâcher de la vapeur d'eau, c'est à dire l'eau sous sa forme gazeuse.

De faible densité, environ  $20\text{kg/m}^3$ , la laine en vrac est un très bon isolant. La laine agit également comme un régulateur thermique. En absorbant l'humidité de l'air ambiant, elle cède de la chaleur, d'où la sensation de confort en hiver quand on porte un pull en laine !



## EFFET D'UN TENSIOACTIF

90

*Pour améliorer l'affinité des fibres avec l'eau, on peut modifier la surface des fibres ou changer de liquide. Quelques gouttes de savon, un tensio-actif, suffisent à changer les propriétés de litres d'eau !*

L'eau cherche toujours à minimiser sa surface et à éviter le contact avec l'air ou tout autre matière hydrophobe. C'est le cas lorsque l'on mélange de l'eau et de l'huile. L'interface entre les deux fluides évoque une toile élastique tendue et la déformer nécessite un apport d'énergie (**expérience 1**). Cette tension interfaciale entre l'eau et l'huile est comparable à la tension superficielle qui règne entre l'eau et l'air. Un tensio-actif est un composé capable d'abaisser la tension de surface de l'eau. Il permet de rendre miscibles deux liquides qui ne le sont pas naturellement, comme l'eau et l'huile.



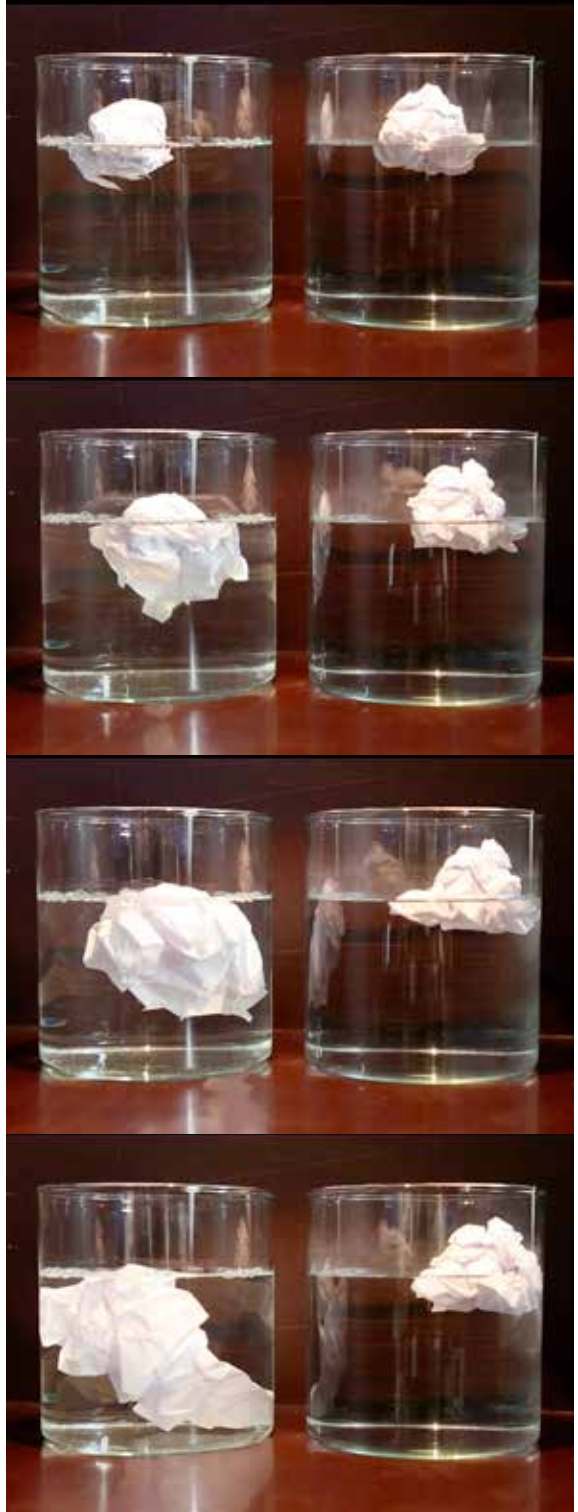
### EXPÉRIENCE 1

L'interface entre l'eau et l'huile apparaît comme une surface tendue qui s'étire quand on appuie dessus. Cette tension interfaciale entre l'huile et l'eau est comparable à la tension superficielle qui règne entre l'eau et l'air.



### EXPÉRIENCE 2

Une boule de papier froissé flotte à la surface de l'eau lorsqu'elle est encore sèche (à droite). Quelques gouttes de liquide vaisselle dans l'eau (récipient de gauche) et la boule de papier s'ouvre et coule au fond rapidement.



▽  
EXPÉRIENCE 3

Des fibres de massette flottent à la surface de l'eau. Quand on les immerge complètement à l'aide d'une baguette, elles se rassemblent en entraînant de l'air sous l'eau. Si on relâche la pression, les fibres remontent à la surface. Elles flottent à nouveau et sont totalement sèches. Ces fibres sont hydrophobes, il est très difficile de les mouiller tant elles repoussent l'eau.



▽  
EXPÉRIENCE 4

Les mêmes fibres de massette déposées à la surface d'une eau savonneuse coulent très rapidement. Une seule goutte de liquide vaisselle permet de mouiller ces fibres. Elles se dispersent facilement dans tout le liquide dès qu'on le mélange.



Le liquide vaisselle est composé de tensio-actifs : ces molécules amphiphiles capables de lier les composés hydrophobes avec les composés hydrophiles. Cela fonctionne également avec certaines fibres. Une boule de papier froissée se déploie et coule plus vite dans une eau savonneuse (expérience 2). Bien souvent, parce qu'elles sont recouvertes de composés cireux, les fibres naturelles et brutes sont plutôt hydrophobes. Elles sont alors difficilement mouillables, elles repoussent l'eau.

Le plumet de la massette (Typha) flotte à la surface de l'eau. Complètement immergé dans un récipient d'un à l'aide d'une baguette, il ressort intact et sec (expérience 3). Si on reproduit la même expérience dans de l'eau savonneuse, les fibres coulent, se séparent et remplissent tout le récipient. Une goutte de liquide vaisselle suffit à disperser ces fibres dans l'eau (expérience 4). Elles sont alors plus facilement utilisables, par exemple pour armer un mortier. Leur mise en œuvre est facilitée.



# Mouiller les fibres pour les assouplir

92

*Les fibres végétales utilisées en vannerie, lorsqu'elles sont encore vertes, sont souples. Elles se courbent sans casser. Mais, elles sèchent rapidement après la récolte. Il faut alors les mouiller pour les assouplir.*

C'est le cas de l'osier de vannerie, récolté pendant l'hiver, lorsque la sève descend. Afin d'être conservé avant son utilisation, il est séché pendant au moins six mois. Le vannier, pour façonner les paniers, commence par faire tremper les brins d'osier dans un bain d'eau froide pour qu'ils retrouvent leur flexibilité. Cette étape de trempage peut durer de plusieurs jours à plusieurs semaines suivant la température, les variétés et les tailles de brins. Les brins d'osier gonflent légèrement et s'assouplissent, ce qui facilite leur mise en œuvre.

L'eau permet également aux fibres de glisser davantage les unes par rapport aux autres. L'eau agit comme un lubrifiant et diminue les forces de frottement entre les fibres.

On entend parfois dire que pour bien serrer un nœud il est préférable d'utiliser une corde mouillée : les brins glissent davantage. Pourtant, la corde mouillée, en fibres végétales, est légèrement plus large que lorsqu'elle est sèche. L'eau fait gonfler les fibres : elles occupent un diamètre plus important. En séchant la corde s'amincit, le nœud se relâche très certainement.

Ces deux phénomènes agissent en sens contraire : l'eau permet d'assouplir les fibres et de serrer davantage le nœud, mais en séchant il se relâche un peu. Le résultat est certainement différent d'une fibre à l'autre et d'une corde à l'autre. Des expérimentations sont nécessaires, chaque cas semble être un cas particulier.



**L'osier, utilisé pour les sculptures du 'nids des fées', est mis a trempé. Il est ensuite mis en œuvre pour réaliser les sculptures du parc paysager du 'Le Clos des Fées' - Paluel (76)**



### EXPÉRIENCE 1

**Le dispositif ci-contre permet de cintrer une baguette de bois préalablement bouillie dans l'eau. Découpée aux dimensions adéquates, la baguette est calée contre la lame d'acier. Une simple pression manuelle suffit à courber la baguette de bois sans qu'elle ne casse. Une fois sèche, elle garde sa forme courbe.**



## CINTRAGE DU BOIS

*Le cintrage consiste à donner une forme courbe au bois trempé qu'il conserve en séchant.*

Pour cintrer une baguette de bois, il faut être en possession d'un dispositif de cintrage adapté à la forme souhaitée (expérience 1). La baguette, initialement droite, en bois de hêtre, est découpée aux dimensions adéquates, en suivant parfaitement le fil du bois. Le respect du sens des fibres est de prime importance. La baguette est ensuite trempée dans l'eau bouillante suffisamment longtemps, jusqu'à ce qu'elle soit gorgée d'eau. Alors, la baguette coule au fond du récipient. Encore chaude, elle est placée dans le dispositif à cintrer. Une cale en bois permet de la maintenir plaquée et en compression contre la lame d'acier. Une simple pression manuelle suffit à courber le bois autour du gabarit. Une cale d'acier permet de maintenir en place la baguette cintrée jusqu'à ce qu'elle soit sèche.

L'action de l'eau combinée à la chaleur autorise les fibres du bois à glisser les unes contre les autres. Ce sont ces glissements successifs qui permettent au bois de se courber sans casser, puis de garder sa forme en séchant et refroidissant. L'eau joue le rôle de lubrifiant entre les fibres. La chaleur permet d'atteindre la température de transition vitreuse de la lignine. Au delà de cette température, la lignine, qui colle les fibres de cellulose, devient molle et autorise le glissement des fibres.



**À gauche : une baguette en bois de hêtre avant cintrage.**

**À droite : une baguette, identique à celle de gauche, après le cintrage.**





# Fibres et **MATIÈRE MOLLE**

*PHYSIQUE DE LA MATIÈRE EN FIBRES  
MÉLANGÉE À UN LIANT  
DONT LA CONSISTANCE EST CELLE D'UNE PÂTE*

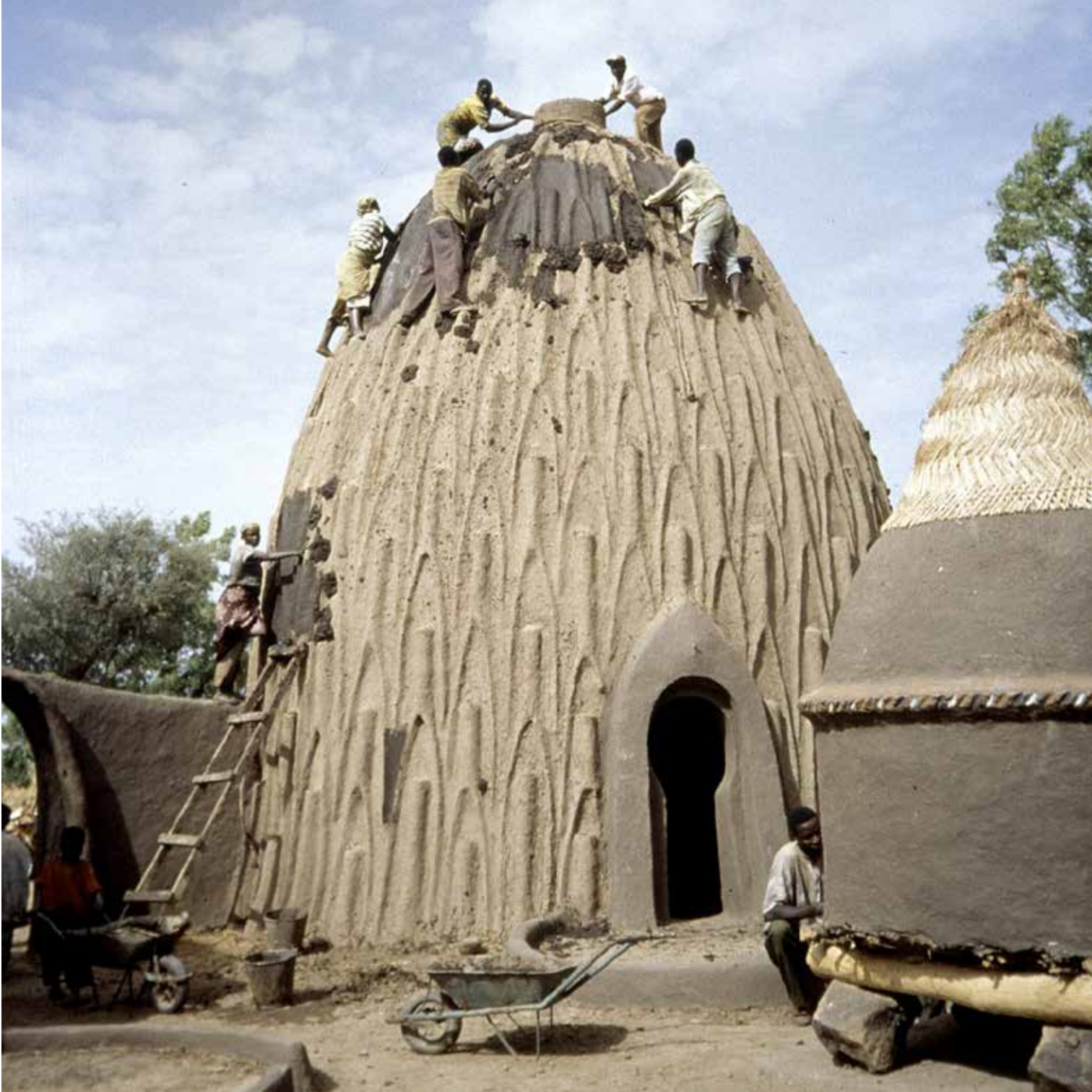
La matière molle rassemble toutes les matières de notre environnement quotidien qui n'ont ni le comportement des liquides, tel que l'eau, ni celui de solides, tel le verre ou l'acier.

La physique de la matière molle renseigne l'instant précis où des matières, telles un mortier de chaux, un badigeon de plâtre, une barbotine d'argile ou de la pâte de ciment frais, sont mélangées à l'eau et mises en forme. La rhéologie s'intéresse aux propriétés d'écoulement de ces matières.

L'ajout de fibres à une pâte modifie sa rhéologie. Ce chapitre qui n'en est encore qu'à ses débuts, à l'ambition de répondre à la question : dans quelles mesures et de quelle manière l'ajout de fibres modifie-t-il la rhéologie d'une pâte, d'un mortier frais ?

Case obus des Musgums, Cameroun.

Pour la réfection annuelle des enduits de protection, un mortier de terre et de fibre est préparé. La quantité et le type de fibres introduites modifient le comportement à l'écoulement du mortier frais.





## LA TAILLE DES FIBRES MODIFIE L'ÉCOULEMENT DE LA PÂTE

La rhéologie est la science des écoulements des pâtes et fluides visqueux. Elle est essentielle pour comprendre le comportement complexe des mortiers frais lors de leur utilisation sur le chantier.

L'ouvrabilité d'une pâte, c'est à dire la facilité de mise en œuvre dépend ses propriétés rhéologiques. Par exemple, les bétons autoplaçants sont faciles à mettre en œuvre car ils s'écoulent comme presque comme un simple liquide.

On peut évaluer cette ouvrabilité par un test d'étalement. Le mortier frais remplit un cône métallique que l'on enlève ensuite comme pour démouler un pâté de sable. Le mortier est d'autant plus fluide que la flaque est grande, à condition qu'elle soit homogène (pas de ségrégation des grains, fibres et liant). L'ajout de fibres change considérablement l'écoulement des mortiers.

Pour appréhender une des modifications possibles de l'écoulement d'un mortier par l'ajout de fibres, on réalise les deux expériences suivantes.

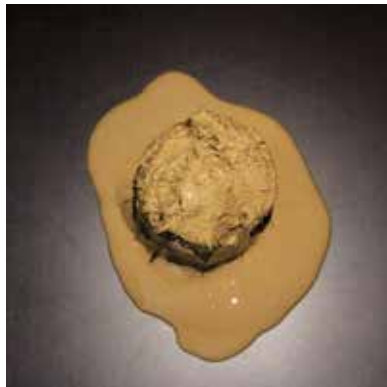
L'**expérience 1** compare l'étalement de deux mortiers constitués d'une barbotine épaisse et de 14% en poids de fibres métalliques de 200µm de diamètre. Le seul paramètre qui varie est la longueur des fibres : à gauche les fibres sont courtes (6 mm), à droite les fibres sont longues (12 mm).

L'augmentation de la taille des fibres conduit à l'étalement plus faible. L'utilisation de fibres courtes permet d'obtenir un mortier plus fluide sans changer la quantité de fibres ni ajouter d'eau.

L'**expérience 2** est réalisée dans les mêmes conditions que la première à l'exception de la barbotine qui est plus fluide. Un apport d'eau permet

de la rendre plus liquide, ce qui conduit logiquement à un étalement relativement plus important que dans l'**expérience 1**. La différence d'étalement entre le mortier à fibres courtes et le mortier à fibres longues est davantage marquée avec la barbotine plus fluide. Une ségrégation très forte s'opère entre les fibres longues et la barbotine. Les fibres longues forment un enchevêtrement si rigide que la barbotine ne les disperse pas,

Bien d'autres pistes sont à explorer dans ce chapitre. Des paramètres liés aux fibres comme le type de fibres (quantité, texture, forme, rigidité, affinité avec le mortier, facteur d'aspect) ou liés au mortier (cohésion du liant, taille des granulats et leur distribution, etc.) ou encore à l'eau de gâchage (salinité, acidité, etc.) sont autant de points à étudier pour bien comprendre les mécanismes qui régissent l'écoulement de ces mortiers fibrés.



#### EXPÉRIENCE 1

Les deux mortiers sont composés de barbotine de terre, de consistance visqueuse et de 14% en poids de fibres métalliques de diamètre 200  $\mu\text{m}$ . La différence est la taille des fibres : à gauche elle mesurent 6 mm de longueur, à droite 12 mm.

L'étalement plus important à gauche montre que des fibres plus courtes conduisent à un mortier plus fluide pour la même quantité d'eau.



#### EXPÉRIENCE 2

Comme dans l'expérience précédente, les deux mortiers sont composés d'une barbotine et de 14% en poids de fibres métalliques de diamètre 200  $\mu\text{m}$ , à gauche les fibres sont courtes (6 mm) et longues à droite (12 mm). La barbotine est, cette fois ci, plus liquide. L'étalement est donc relativement plus important. Dans le cas des fibres courtes, elles sont dispersées dans le mortier. En revanche, la barbotine liquide se sépare des fibres longues dont l'enchevêtrement très rigide forme un pâtre distinct de la flaque de terre.

# Fibres et MATIÈRE LIANTE

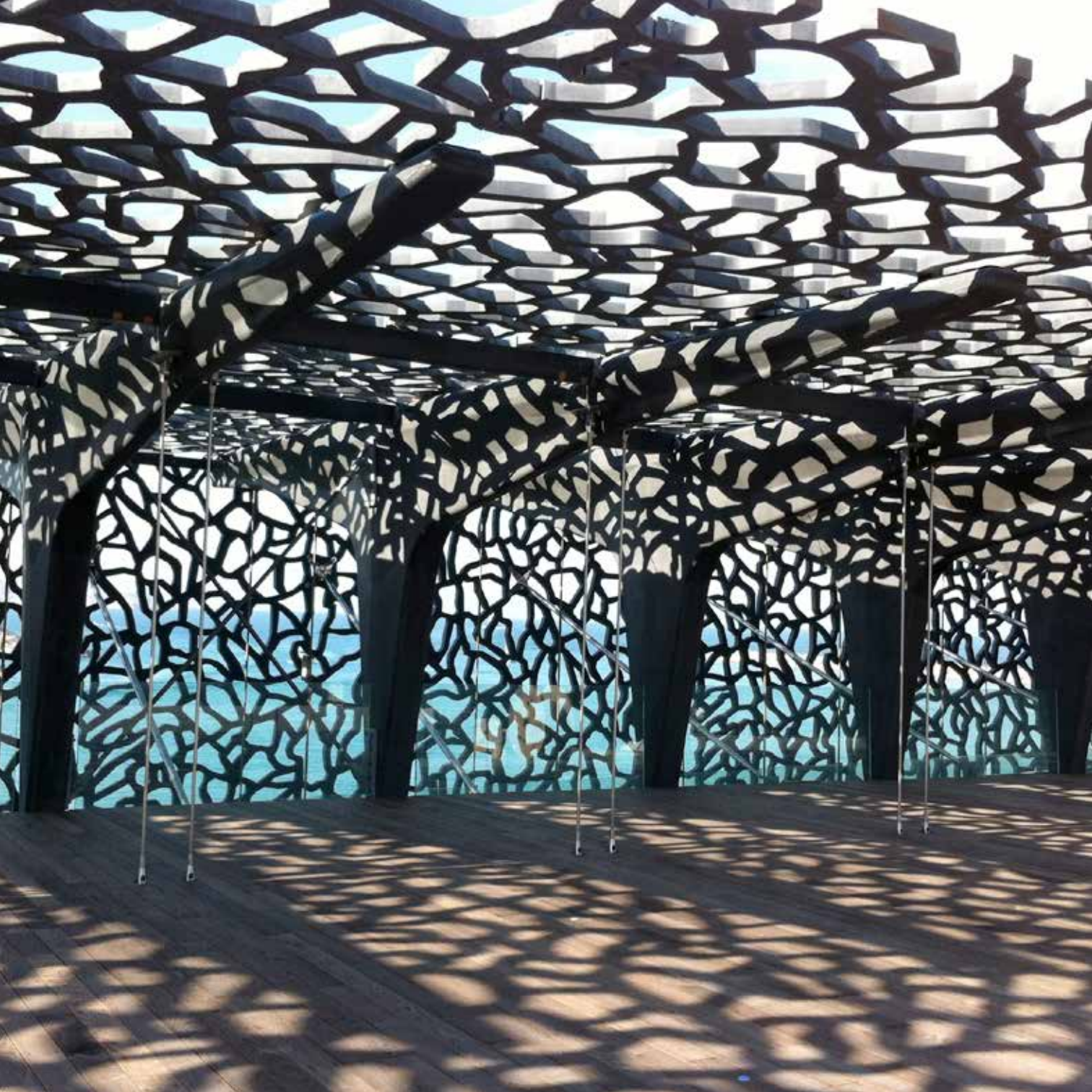
## *PHYSIQUE DE LA MATIÈRE EN FIBRES EN CONTACT AVEC LA MATIÈRE LIANTE*

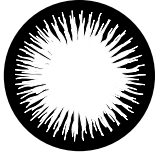
La chaux, le plâtre, l'argile, le ciment, ont en commun, lorsqu'ils sont mélangés à l'eau, de former des pâtes molles capables de se solidifier en un laps de temps pouvant varier de quelques minutes à quelques jours. La physique de la matière liante s'intéresse aux différents mécanismes de durcissement de ces minéraux.

Dans les matériaux composés de liants et de fibres, ces deux matières sont en contact. Ce chapitre est centré sur la physique des interactions et des phénomènes qui découlent de ce mélange de matières. Le développement d'expériences sur ce sujet a commencé très récemment.

Les pistes de recherches présentées dans ce chapitre concernent deux points : le retard de la prise du ciment et la dégradation des fibres due à l'attaque chimique par le liant dans les mélanges ciment-fibres végétales.

▷  
Le Mucem de Rudy Ricciotti utilise des  
bétons fibrés à haute performance.  
L'association des fibres, bien qu'elles soient  
métalliques, avec le béton de ciment offre de  
nouvelles possibilités pour l'architecture.





## FIBRES VÉGÉTALES

# ET PRISE DES LIANTS HYDRAULIQUES

100

*La présence de fibres végétales dans un mortier de ciment perturbe, parfois, la prise hydraulique.*

C'est le cas de la chènevotte de chanvre qui a tendance à retarder le début de la prise de ce liant hydraulique. La pectine, sucre contenu dans le chanvre, fixe les ions calcium présents dans le mortier frais. Or le ciment a besoin de ces ions pour faire sa prise, d'origine chimique. En conséquence, le ciment met plus de temps à durcir (**expérience 1**). Ce phénomène peut être montré en remplaçant le chanvre directement par du sucre.



### EXPÉRIENCE 1

**Afin de montrer l'action du sucre sur la prise du ciment prompt, trois échantillons sont réalisés.**

**À gauche : un bloc de pâte de ciment prompt (poudre ciment prompt + eau) durcit très rapidement, au bout de quelques minutes.**

**Au milieu : quand 5% de sucre est ajouté à l'eau de gâchage, la pâte de ciment prompt est encore très molle 10 minutes après le mélange. Le processus de la prise du ciment est retardé.**

**À droite : il s'agit du même mélange que le précédent. 4 heures après le mélange, la pâte de ciment a légèrement durci. Elle reste encore malléable : en appuyant dessus, le doigt laisse une trace.**



Une faible quantité de sucre suffit à retarder la prise du ciment prompt. Il est en de même avec le ciment portland. Toutefois, seulement 0,1% de sucre suffirait provoquer ce retard. Une faible quantité de sucre qui se dissout, depuis la surface de certaines fibres végétales, lors de la mise en œuvre dans le liant, a le même effet.

Si on attend suffisamment longtemps, la prise est partiellement effective. Le sucre a surtout un effet sur le processus de prise rapide. La prise a plus long terme est moins

affectée.

L'**expérience 2** montre le gonflement de la pâte de ciment lors de la prise. Le bloc de ciment, dont la taille augmente avec la quantité de sucre, fissure en séchant. Il devient aussi friable. Plusieurs hypothèses naissent de ces observations : s'agit-il d'une modification chimique du liant ? Les fissures se forment-elles à cause du gonflement ou par manque de cohésion du liant ?

D'autres questions se posent quant à la durabilité des mélanges à base de fibres végétales et de liants à prise

hydraulique. Le pH élevé (autour de 12,5) de la pâte de ciment peut attaquer chimiquement la surface des fibres. De plus, de nombreux cations multivalents ( $\text{Ca}^{2+}$   $\text{Mg}^{2+}$   $\text{Al}^{3+}$ ) et de la chaux vive se libèrent dans le mortier pendant la prise. Il y a un risque de perte de la ductilité et de la résistance en traction des fibres.



#### EXPÉRIENCE 2

**De droite à gauche, la pâte de ciment contient de plus en plus de sucre. Lors de la prise, les blocs gonflent et se fissurent. Ils sont davantage friables et perdent leur cohésion avec l'augmentation du taux de sucre.**





Construire avec ce que l'on a à portée de main c'est utiliser des ressources locales, disponibles et abondantes, avec une économie de moyen sans égale et s'approprier l'intelligence du vernaculaire en renouant avec la tradition d'intégration au paysage.

Cette troisième et dernière partie n'est encore qu'une esquisse de ce que pourra être un chapitre sur l'architecture en fibres végétales. Sont ici rassemblés, les travaux de Martin Pointet sur l'élaboration de matériaux et les références architecturales d'Arnaud Misse, d'habitats vernaculaires et contemporains.

3

103

CONSTRUIRE  
AVEC CE QUE L'ON A  
À PORTÉE DE MAIN





## THE MODERN SEAWEED HOUSE

### Réactualisation contemporaine d'un système constructif vernaculaire

*L'agence d'architecture Vandkunsten utilise les algues pour couvrir le toit de cette habitation située sur l'île danoise Læsø. Elle s'inspire des maisons traditionnelles de cette île dont les toits sont également construits avec des algues locales.*

105



En remportant en 2012 le concours Realdania Byg, l'agence Vandkunsten a décidé de réactualiser une ancienne méthode d'utilisation des algues pour la construction, caractéristique de l'architecture traditionnelle de l'île. Contrairement aux maisons historiques où les algues sont empilées par couches successives pour couvrir le toit, the modern seaweed house utilise une technique différente, un autre langage. Les algues sont enserrées dans une sorte de filet en forme de traversin allongé. Les filets sont ensuite fixés contre les murs et sur le toit. Associant les fonctions de parement et d'isolation extérieure, les algues contribuent à la performance énergétique de cette maison qui répond aux normes thermiques actuelles du Danemark et aux exigences en matière d'émissions de CO<sub>2</sub>.



L'agence Vandkunsten a réussi le pari de transformer des ressources locales, naturelles et respectueuses de l'environnement, en architecture contemporaine et de qualité, inspirée de la culture locale, tout en atteignant une excellente performance énergétique.



**Les algues recouvrent le toit et certains murs de cette maison contemporaine. Les algues sont des ressources naturelles locales utilisées traditionnellement sur cette île danoise pour couvrir les toits.**

**Le système constructif est ici réactualisé : les algues sont enserrées dans des filets fixés sur le toit. Ces fibres naturelles contribuent à l'isolation de la maison.**

# Art & Matière

106

## ANDY GOLDSWORTHY

*L'œuvre d'Andy Goldsworthy, dialogue permanent avec le paysage et son environnement naturel, se compose de multiples installations in situ, façonnées à partir de la matière qu'il trouve sur place.*

Une grande partie de l'activité artistique d'Andy Goldsworthy se déroule en plein air, utilisant des matériaux trouvés sur place. Son travail est connu comme « Land art ». Chacune de ses œuvres se concentre sur un aspect particulier du matériau et du lieu. Par exemple, certaines tiges d'herbe sont dures, cassantes, creuses et forment un angle en se fracturant ; par contre, la partie qui porte les graines est souple, fine résistante comme un fouet. Il faut de nombreuses créations avant d'arriver à comprendre les multiples qualités des matériaux. En les explorant, Andy Goldsworthy essaye de comprendre l'ensemble ; non pas en spectateur, mais en participant actif. Il puise dans l'énergie de la nature de façon à donner de l'énergie à son œuvre.

*« La vue, le touché, la matière, le lieu, la forme et l'œuvre qui en résulte constituent un ensemble intégral - difficile de dire où commence et où finit quoi. Le lieu est découvert en marchant, l'orientation est déterminée par le temps et la saison. Je saisis les occasions que m'offre chaque jour : s'il neige, je travaille avec de la neige, à l'automne, avec des feuilles mortes ; un arbre renversé devient une réserve de branches, des plus petites aux plus grosses. »*

Ses œuvres se développent en utilisant les ressources locales, les matériaux qu'il a « à portée de main ».





# Matériaux

108

La fabrication de matériaux de construction commence par une étape de transformation de la matière.

Le comportement de cette matière, qui, selon les cinq thématiques amàco, peut être en grains, en fibres, molle, liante ou la matière eau, est régit par un ensemble de phénomènes physiques et chimiques. La compréhension de la physique de la matière est nécessaire au processus de fabrication des matériaux.

Les associations de matières renvoient à différents matériaux et éléments de construction, habituellement cloisonnés par filières dans l'enseignement et dans l'industrie. Voir les matériaux à travers le prisme des cinq matières, c'est redécouvrir le fonctionnement et le génie du naturel.

Comprendre et montrer les analogies et les différences entre ces matériaux permet de favoriser le transfert de techniques innovantes entre filières.

La création de nouveaux matériaux et la réactualisation de matériaux et techniques anciennes, se basant sur des ressources locales et disponibles est un enjeu de taille pour l'avenir de la construction.



TEXT



ROULEAU DE LAINE



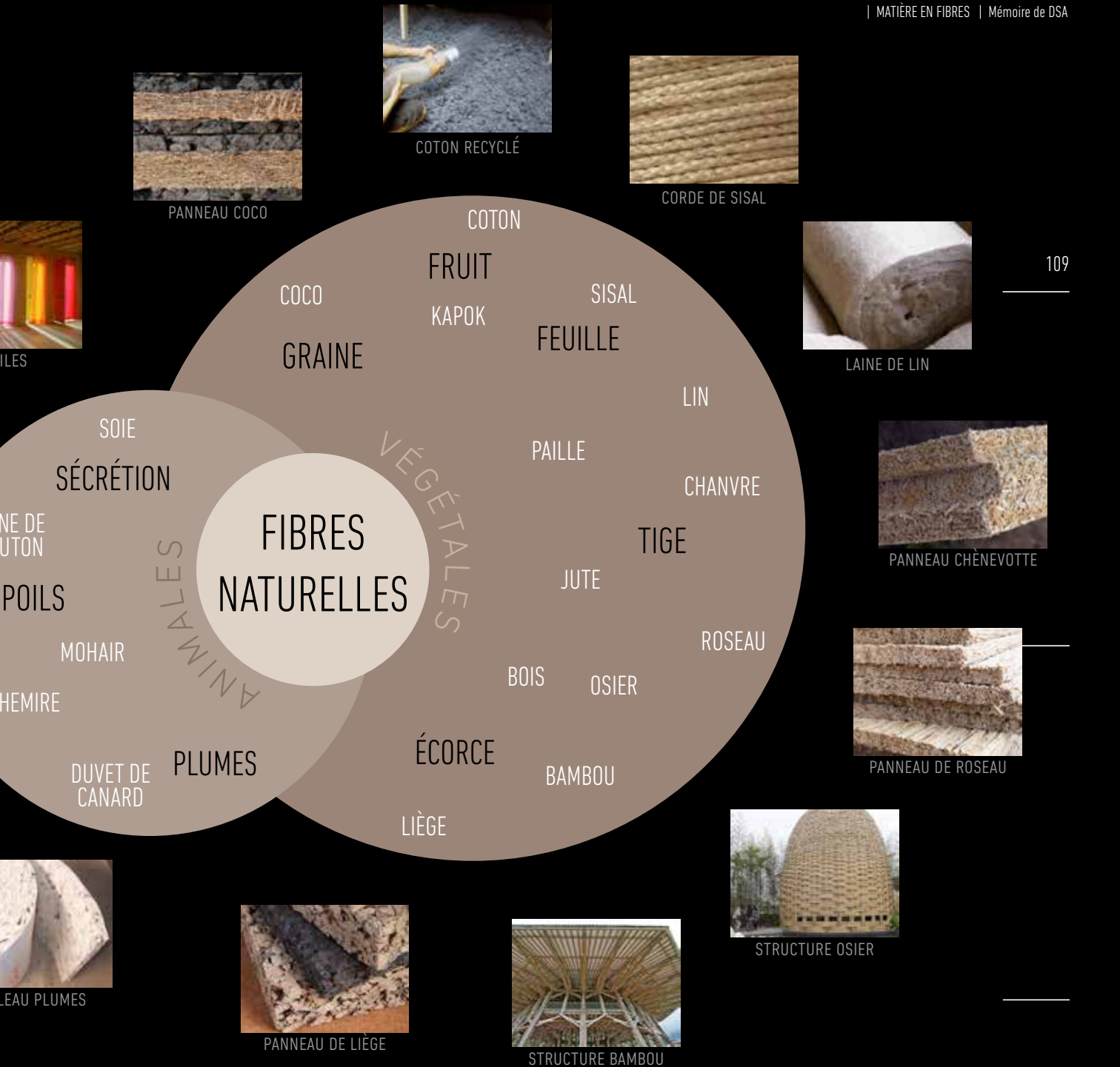
COUVERTURE EN FEUTRE

LAI  
MO

CAC



ROU





# UNE MATRICE DE MATÉRIAUX

*Inspiré de l'exercice de Wilfredo Carazas pour les états hydriques de la terre, cette matrice compare l'aspect et la mise en œuvre des différentes matières en fibres associées ou non à de la barbotine de terre.*

110

Cette matrice consiste à faire varier différents paramètres pour observer les conséquences sur la mise en œuvre du matériau, sur son aspect final et ses possibles utilisations. Pour chacune des fibres utilisées, une matrice à deux entrées est réalisée. Une direction concerne la mise en œuvre : versée ou compactée par couches successives. L'autre direction de la matrice permet de faire varier le liant. Dans le cas présent, il y a quatre variations : fibres sèches (sans eau, ni barbotine), fibres mouillée (avec de l'eau seulement), fibres avec une mesure de barbotine

et enfin fibres avec deux mesures de barbotine. Ce test se limite à deux mises en œuvres : verser et tasser, ce qui est très réducteur par rapport à l'immense diversité de gestes que propose la matière en fibres. Néanmoins, cela donne déjà un large aperçu des possibilités de matériaux. Cette matrice peut être une première étape rapide pour faire varier quelques paramètres et anticiper le comportement de la matière pour ensuite ajuster la teneur en eau, quantité de liant, énergie de compaction, taille des fibres.





# DES MATIÈRES BRUTES AUX MATÉRIAUX PERFORMANTS

112

*Prototypes de matériaux à base deux ressources abondantes :  
un déchet de carrière et une plante invasive*

Les matières brutes issues des filières de recyclage ou de réemploi constituent des ressources abondantes et disponibles, à faible impact environnemental et à forte intensité sociale, pour créer des matériaux innovants et performants pour la construction. C'est le cas du liant utilisé ici : il s'agit d'une boue de lavage de carrière de granulats. Cette terre, argileuse et limoneuse, est un déchet que souhaite valoriser l'entreprise Cemex.

Les plantes invasives constituent une ressource importante de fibres végétales. La massette, plante du genre *Typha*, envahit les bords du fleuve Sénégal. Développer des matériaux à partir de ces deux matières pourrait, au delà de tout bénéfique pour l'environnement, être créateur de nombreux emplois.



**La Massette est une plante invasive du genre *Typha*. Elle envahit les bords du fleuve Sénégal.**

**A gauche : la tige de plante est droite, cylindrique et rigide. Au milieu : Les feuilles de la massette sont longues, elles entourent la tige. A droite, la tige porte à son extrémité la fleur, qui, arrivée à maturité laisse s'échapper les graines en libérant un plumet constitué de fibres fines et volatiles.**



**Cette boue séchée, de l'entreprise Cemex, est issue du lavage des granulats lors de leur extraction en carrière.**





**Séquence de fabrication de ce matériau :**  
des matières brutes, leur mélange, jusqu'à  
l'usinage de la brique

113

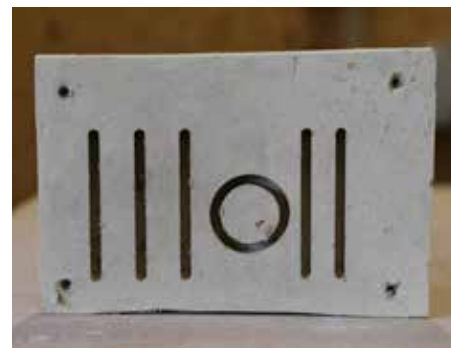
## BRIQUE 20/30CM

### Massette & barbotine

Une fois les petites fibres sorties de la massette, elles sont lavées à l'eau savonneuse. Cette opération permet de faciliter ensuite la mise en œuvre de ces fibres. Ainsi, elles se mélangent davantage et se dispersent dans l'eau. Elles sont ensuite pressées et essorées, avant d'être mélangées à une barbotine de terre.

Pour une brique de 20cm/30cm/3cm, l'équivalent de huit fleurs de massettes a été utilisé. La brique est moulée comme une adobe. Le séchage est assez long.

Ce matériau se travaille comme un aggloméré de bois : on peut le couper, le scier, le poncer, le visser, l'usiner. Il ne se casse pas quand il reçoit un choc ou lors d'une chute comme lorsqu'on le jette par terre.



▷  
Séquence de fabrication de ce matériau :  
de la plante, sa sélection et assemblage,  
jusqu'aux finitions sciées.



## PANNEAU TYPHA

### Feuilles de massette



Les feuilles de la massette Typha ont une longueur moyenne de 1,5 mètre. De forme conique, elles ont un diamètre d'environ 2 cm à leur base, pour atteindre à peine 5 mm de largeur au sommet. L'intérieur de la feuille est composé d'un ensemble de canaux emprisonnant l'air. Les feuilles ont été coupées tous les 50 cm sur toute leur longueur. Ensuite, elles sont placées en quinconce dans un coffrage afin de prendre la forme du panneau.

Trois fils de fer entourent le «paquet» perpendiculairement aux feuilles. Un système d'agrafes permet de relier les deux faces du panneau et de le comprimer. Ces agrafes sont positionnées tous les 5 cm. Une fois fini, les deux faces du panneau sont sciées afin de rendre le produit homogène. Cette coupe permet de laisser propre la tranche du panneau.

Ce panneau s'inspire des panneaux de roseaux isolants, faciles à mettre en œuvre sur le chantier, performants pour l'isolation du bâti et de très bons supports d'enduits.





◁  
**Séquence de fabrication de ce matériau :**  
**de la plante broyée, au mélange, jusqu'au**  
**produit sec.**

## PANNEAU 40/40CM

### Terre-papier & typha broyé

115

Pour ce matériau, des feuilles et la tige de la massette sont utilisées. Tout d'abord, la plante passe dans une broyeuse. Le résultat du broyage donne des copeaux allant de 1 cm à 20 cm.

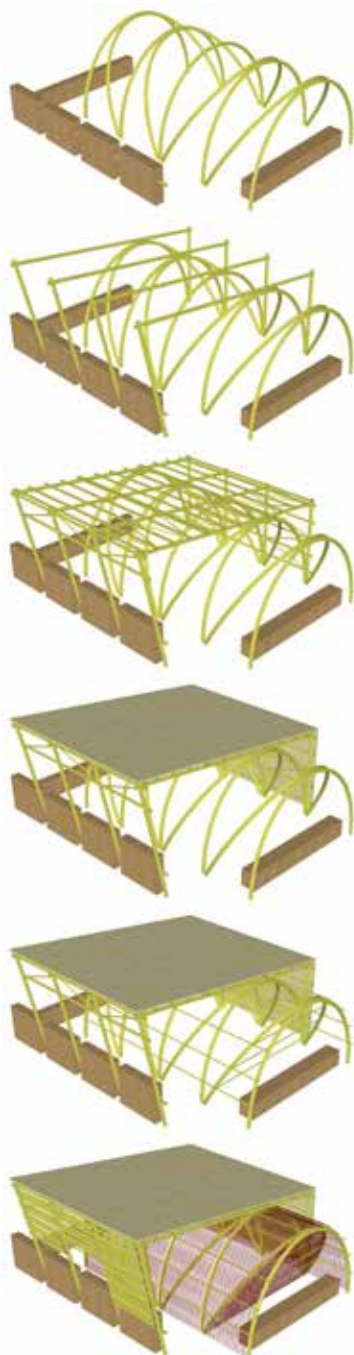
Parallèlement, une barbotine de terre argileuse est préparée avec la boue de lavage. Un mélange de terre-papier est préparé à partir de la barbotine et de fibres de papier préalablement trempé, tamisé et essoré. Les fibres de papier représentent environ 15% en volume du mélange de la terre-papier. Un fois ce mélange préparé, on l'incorpore dans les copeaux de massette (1 volume de terre-papier pour 2 volumes de copeaux).

Mis en œuvre dans un coffrage puis comprimé entre deux planches, le panneau obtenu est immédiatement décoffré.

Ce panneau est inspiré des matériaux de construction type fibralth, conçus pour un usage de cloison et/ou de parement acoustique. Une fois poncé, une surface lisse proche des panneaux OSB (tripli) est obtenue.







# Structure et échelle 1

## LE PAVILLON FIBRES amàco

expérience de transformation de la matière brute en éléments de structure et d'enveloppe

Ce pavillon a été conçu et construit dans le cadre de l'atelier créatif expérimental amàco 2014 pour découvrir et appréhender les potentialités architecturales des fibres végétales.

Ce chantier collectif a réuni une cinquantaine de personnes pendant deux jours. La plupart des éléments ont été préfabriqués. Cela demande une véritable organisation de chantier où chacun reçoit outils et techniques pour mettre en forme la matière.

La structure principale est réalisée en canne de Provence, récoltée peu avant le chantier. Épluchées, coupées à la base puis classées par diamètre, les cannes sont assemblées pour former les colonnes. L'étape suivante est celle, délicate, du pliage des colonnes pour former les arcs, partie arrondie des portiques qui forment la structure principale. L'enveloppe est réalisée en panneaux de Typha, massette du Sénégal, en tressage de cannes fendues ou d'osier pour la voûte.

Faire l'expérience collective de construire à l'échelle 1 l'espace habité, permet d'enrichir sa compréhension de la matière et de ses possibilités. Le faire, avec ses échecs et les nouveaux essais qui s'en suivent, est un exercice pédagogique qui fait appel à d'autres intelligences que l'intelligence cognitive mobilisée par les enseignements purement théoriques. Par le geste, par les émotions suscitées par le contact avec la matière et grâce à la magie qui naît de l'expérience physique de l'espace architectural, on apprend autrement.



# Architecture

118

---

« [L'] éloge du simple et du vernaculaire n'est nullement un appel à l'immobilisme. Avoir l'humilité d'apprendre des bâtisseurs anonymes qui nous ont précédés ne nous dispense pas de jeter un regard critique sur ce savoir-faire traditionnel, ni d'intégrer des pratiques contemporaines. C'est à ce prix, et à condition de faire évoluer l'enseignement en ce sens, que l'on pourra construire un habitat moderne, adapté aux défis de notre temps et restant en accord avec les traditions locales et le contexte culturel. »

---

Propos d'Henri Van Damme, recueillis dans «En guise de postface...» du livre de Laetitia Fontaine & Romain Anger, *Bâtir en terre : du grain de sable à l'architecture*, édité par Belin en 2009.



Cette roue présente les différentes  
fonctions des fibres végétales dans le bâti.



PORTANT

PORTER VERTICALE  
FRANCHIR

ARC/VOUTE/  
COUPOLE

HORIZONTALE

PAR COUCHES/  
NAPPES  
SUPERPOSÉS

REVÊTEMENT  
DE TOITURE

COUVRIR

ARMER FIBRER

REVÊTEMENT  
DE FAÇADE

DANS LA MASSE  
ENDUITS/BRIQUES  
MORTIERS

PAROIS

LIER

HABILLER

PANNEAUX  
FILTRANT  
H+V

ISOLANT  
DANS LA MASSE  
TERRE ROSEAU

FILTRER

PANNEAUX  
ISOLANTS  
H+V

COFFRER

ISOLER

FIBRES  
VÉGÉTALES

PROTÈGEANT

RENFORÇANT

FILTRANT

ISOLANT



Maison Ainu, Japon



# Habitats de fibres *vernaculaire*

120

Zulu hut, Afrique du sud



Tombe royale, Rwanda



Chefferie Bandjoun, Cameroun



Hutte Dorze, éthiopie

Chefferie kanak, Nouvelle-Calédonie



maison «Rong» , village Bahnar, Vietnam



121



Ile de Flores, Indonésie



Ile de Ratenggaro, Sumba Island, Indonésie

# Habitats de fibres *vernaculaire*

122

Hutte en écorce, USA



Case Sidama, Ethiopie



Temple, Tribu des Nilgiris, Inde



Village, de seongeup, Corée du Sud

Tente touareg, Mali



Cabane de pêcheur, Sardaigne



Moulin, Pays-Bas



Cottage avec toit de chaume, Royaume-Uni



Kasubi Tomb, Ouganda

# Habitats de fibres

124

---

*aujourd'hui*

Arjen Reas architecte, Zoetermeer, Pays Bas, 2009-2010



Daycare Centre Felsoord,  
Möhn-Bouman Archi-  
tects, Delft, Pays-Bas

Wright-House-  
by-Elmo-Swart-  
Architects



driegatenbrug leiderdorp groosman partner



Wright House, Elmo Swart Achitects, Durban, Afrique du Sud



Casa Areia, studio d'architecture Aires Mateus  
Portugal, 2010

# Habitats de fibres

126

---

*aujourd'hui*

Living Tebogo, Base habitat, Afrique du Sud, 2005

jardin-etoile Kinya Maruyama, 2011



Yusuhara Yusuhara Town Hall, kango kuma et associés, Japon, 2006

Laren house, Monk architect, Pays-Bas, 2008



Centre de découverte, de culture scientifique et de recherche sur l'environnement et la biodiversité, La Roche-sur-Yon (85), Guinée Potin architectes, 2013

# Conclusion

128

---

Ce mémoire, qui marque la fin de la formation DSA Architecture de terre, est le début d'un nouveau parcours sur la matière en fibres. Le travail d'assemblage des productions des personnes qui ont contribué à l'élaboration de ce contenu est riche d'apprentissages, tant sur le fond que sur la forme. Cette compilation de pistes de recherche et d'exploration des fibres végétales et animales constitue une base d'échange dont le résultat sera un ouvrage amàco, de la matière à l'architecture.

Si concevoir, diffuser et valoriser du contenu pédagogique en développant des formations sur le cycle de la construction, grâce à une approche sensible de la matière, est une mission d'amàco, ce n'est pas la seule.

---

Amàco a également vocation à diffuser ces contenus en réalisant des ouvrages destinés à un large public comme Bâtir en terre, mais aussi des expositions (Grains de Bâisseurs, Ma terre première pour construire demain, etc.). En outre, amàco participe à des événements comme Experimenta, salon de rencontre entre arts et sciences, pour toucher un autre public que celui de ses formations.

Amàco, c'est aussi une équipe pluridisciplinaire qui participe avec des partenaires à des projets de recherche pour faire avancer les pratiques sur le terrain. Créer et entretenir des liens étroits entre recherche, formation, valorisation et applications sur le terrain est de prime importance.

---

Le projet de recherche Béton d'Argile Environnemental (financement C2D2) est construit sur ces synergies. Les recherches ont permis, entre autres, de développer la technique de la terre coulée sur plusieurs chantiers. Cet exemple vient aujourd'hui enrichir les cours d'amàco et de CRAterre sur les transferts de technologies entre le béton de ciment et la construction en terre ainsi que sur les propriétés et caractéristiques du matériau terre.

Le projet Typha qui vient de voir le jour au Sénégal, est aussi bâti sur ces allers-retours entre recherche, application, formation et valorisation. Ce projet, transversal aux trois thématiques de l'unité de recherche AE&CC (habitat, patrimoine, matériaux), a pour objectif de répondre à la demande sociale : comment utiliser une plante invasive locale, la massette du genre Typha, pour améliorer le bâti existant et le rendre performant énergétiquement ? L'amélioration de l'habitat est un enjeu définitivement contemporain et mondial pour le climat.

Mon projet professionnel s'inscrit dans cette démarche alliant valorisation, recherche, application sur le terrain et formation au sein du projet amàco ainsi que dans les valeurs que porte l'expression « construire avec ce que l'on a à portée de main » pour améliorer le vivre ensemble.

# Remerciements

129

---

Merci à Laetitia et Romain, directeurs de ce mémoire, à qui je dois mon parcours professionnel. Merci pour leurs innombrables qualités humaines, leur justesse scientifique et leur exigence dans le travail qui nous pousse à donner le meilleur de nous même.

Merci à Bettina Horsch, Etienne Guyon, José Bico et Arnaud Misse d'avoir bien voulu faire partie de mon jury. Je remercie encore Arnaud pour sa contribution à la mise en page.

Merci à Hugo Houben, Henri Van Damme, Dominique Gauzin-Müller, Christian Olagnon, Patrice Doat, Sandrine Maximilien et Yves Jorand, pour leurs conseils avisés.

Merci à tous les chercheurs qui ont contribué de près ou de loin à ce mémoire. Je remercie en particulier, Olivier Arnoult, Etienne Reyssat, Benoît Roman, Laetitia Martinié, Véronique Lazarus, Olivier Dauchot, Cécile Monteux, Serge Mora, Jean-Christophe Géminard, Etienne Cliquet, David Quéré, Evelyne Kolb, Teresa Lopez-Leon et Marie Christine Trouy

---

Merci à Bakonirina Rakotomamonjy pour l'organisation de la formation et en particulier la soutenance du mémoire.

Merci à Michel André Durand de m'avoir accueilli au sein des Grands Ateliers.  
Merci à toute l'équipe permanente des Grands Ateliers.

Mes plus chaleureux remerciements vont à l'équipe amàco. Merci à Marion et Anne-Marie pour leur bonne humeur et les petites attentions quotidiennes. Merci à Lucile, Mariette, Nuria, Martin, Julien, Miguel et Franco, pour leur contribution et leur bienveillance, pour l'ambiance de travail agréable et riche. Merci à Roland Gaudin et Zoé Tric qui ont largement contribué à ce mémoire et que l'on espère revoir bientôt.

Merci à Thomas, ce magicien qui dessine la vie en couleur.

---

# Bibliographie

130

---

## 1. ORIGINE DES FIBRES NATURELLES

- Fried, G.** (2012). *Guide des plantes invasives*. Belin
- FAO. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.** *Fibres du futur*, [En ligne]. <http://www.fao.org/economic/futurefibres/fibres/fr/> (consulté en septembre 2014)
- Reis, D. et al.** (2006). *Le monde des fibres*. Belin
- Chawla, K. K.** (1998). *Fibrous materials*. Cambridge University Press
- 

## 2. COMPRENDRE LA MATIÈRE EN FIBRES

### Fibres et fibres

- Corbineau P. & Flandin J.-M.** (2009). *Identification des bois, Description et esthétique*. Vial
- Luc V.** (2013) D'après nature, Lee Jae-Hyo, Clés, n°82, p. 38-40.
- Mujica Bayly S.** (n.d.). *El puente Q'eswachaka, ingeniería y tradición andina*. QuapaqÑan, Perú, Ministerio de Cutlura. 1 DVD vidéo, 10min.
- Guyon, E et al.** (2010). *Matière et matériaux : de quoi est fait le monde ?* Belin.
- Hernandez, C. & Pascual, E.** (2014). *La vannerie, techniques et réalisations*. Eyrolles.
- Gauzin-Müller, D.** (2014). *Matières en lumière*. EK villes en transition architectures durables, n°39, p 48-105.
- Lepot, C.** (2014). *Bioressources dans le bâtiment*. EK villes en transition architectures durables, n°39, p 108-116.
- ### Fibres et grains
- Fontaine, L., & Anger, R.** (2009). *Bâtir en terre: du grain de sable à l'architecture*. Belin.
- Anger, R.** (2011). *Approche granulaire et colloïdale du matériau terre pour la construction*. Thèse de doctorat, INSA Lyon, 236p.
- Vidal, H.** (1972). *La terre armée*. Annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics, supplément au n°299.

**Guyon, E. & Troadec, J. P.** (1994). *Du sac de billes au tas de sable*. Odile Jacob, Paris.

#### Fibres et eau

**Bico, J.** (2011). *Élasto-capillarité : poils mouillés, origamis, cloques*. Thèse HRD. Université Pierre & Marie Curie.

**Reyssat, E.** (2013). *Les bilames, un effet versatile*. vidéo réalisée par David Bento. Universciences. [En ligne]. <http://www.universcience.tv/video-les-bilames-un-effet-versatile-5586.html> (consulté en septembre 2014)

**Reyssat, E.** (2007). *Gouttes, films et jets : quand les écoulements modèlent les interfaces*. Thèse de doctorat, Paris 7-Denis Diderot

**De Gennes, P. G. et al.** (2002) *Gouttes, bulles, perles et ondes*. Belin

#### Fibres et matière molle

**Martinie, L.** (2010). *Comportement rhéologique et mise en œuvre des matériaux cimentaires fibrés*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est.

#### Fibres et matière liante

**Sedan, D. et al.** (2007). *Interaction fibre de chanvre/ciment : influence sur les propriétés mécaniques du composite*. Matériaux & Techniques, 95(2), 133-142.

**Magniont C.** (2010). *Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources*. Thèse de doctorat, Toulouse 3.

### 3. CONSTRUIRE AVEC CE QUE L'ON A À PORTÉE DE MAIN

**Houben, H. & Guillaud, H.** (1995). *Traité de construction en terre*. Parenthèses

**Guillaud, H. et al.** (2014). *Versus : leçons du patrimoine vernaculaire pour une architecture durable*. CRAterre-ENSAG.

**Goldsworthy, A.** (1991). *Hand to earth*. W. S. Maney & Son Ltd.

**Schittich, C.** (2012) *Building simply two*. Birkhaeuser

# Crédits photographiques

132

---

*de gauche à droite et de haut en bas  
(sauf mention contraire)*

**couverture** amàco | **p. 2** Sergio Grazia | p. 5-6 amàco

## 1. ORIGINE DES FIBRES NATURELLES

**p. 10-11** *(dans le sens des aiguilles d'une montre en commençant par en haut)*  
amàco | droits réservés | Claude Dufour | Barbetorte  
| Martine Schnoering | Société Coopérative Agricole  
de Vanneriel bambou | Martin Olsson | Arnaud Payen |  
amàco | amàco | K. Hinze/Biosphoto | Pehel/Fotolia | **p.**  
**12-13** Giuseppe Penone | Eustache | covobois | MTG-  
Rénovation | amàco | Scierie Gunstett | amàco | **p. 14-15**  
Barbetorte | Aleks | Natrij | Sauvageot | AnRo0002 | Claude  
Dufour | Castellins NV | la galerie créative | **p. 16-17**  
Shahnoor Habib Munmun | Abu Nayeem | Landscape  
Communications Inc. | tissu adeline | Gordon Leppig &  
Andrea J. Pickart | amàco | Bb143143 | Subodhthok | **p.**  
**18-19** amàco | **p. 20-21** Thierry Duchamp | D. Guerin |  
Christophe Finot | Studio 1984 | Ninja | droits réservés |  
Drost + van Veen architecten | Hiss Reet | **p. 22-23** amàco  
| Donati | Donati | Canya Viva | annieo76 | droits réservés |  
droits réservés | Chong Fat | **p. 24-25** David Nance | amàco  
| Franck Schneider | isonat | Kurt Stüber | Pehel/Fotolia  
| Leklektik | Enkev | **p. 26** BC Architects & Studio | **p. 27**  
amàco | BC Architects & Studio | **p. 28-29** droits réservés  
| amàco | amàco | K. Hinze / Biosphoto | Arnaud Payen | **p.**  
**30-31** amàco | Wouter Hagens | Jean Michaux | ouassim05

| cetiom | Claude Prigent/Le Télégramme | **p. 32** amàco |  
**p. 33** droits réservés | **p. 34-35** métisse® | droits réservés  
| droits réservés | Vyncke | Green | La ferme du grand pré |  
David Monniaux |

## 2. COMPRENDRE LA MATIÈRE EN FIBRES

### Fibres et fibres

**p. 39** Naquib Hossain | **p. 40-41** amàco | **p. 42** Becker  
affutage | **p. 43** amàco | **p. 44-45** Lee Jae-Hyo | **p. 46**  
**tissus** | **p. 47** droits réservés | **p. 48-49** Emmanuel  
Heringer | **p. 50-51** ICD University of Stuttgart | **p. 52**  
droits réservés | **p. 54-55** Jonathan Brillant | **p. 56-57**  
Laura Ellen Bacon et Chris Elliot | **p.58-57** droits réservés  
| Jérôme R. | amàco | amàco | amàco | Juldu | **p. 60-61**  
amàco | droits réservés | J-P. Rubinstein | amàco | **p.**  
**62-63** amàco sauf schémas Laetitia Martinié |

### Fibres et grains

**p. 65** droits réservés | **p. 66-68** amàco | **p. 69** amàco sauf  
schémas de C. D. Johnston | **p. 70** Henri Vidal | Centro  
Ricerche Archeologica e Scavi di Torino | droits réservés  
| The Oriental Institute of The University of Chicago | **p. 71**  
droits réservés | droits réservés | CRATERRE-ENSAG | Nader  
Khalili/Cal-Earthe Institute/EPA/CORBIS | HESCO Bastion  
Concertainer | U.S. Navy Photo by Mass Communication

Specialist 2nd Class Patrick W. Mullen III | **p. 72** amàco |  
**p. 73** CRAtterre-ENSAG | **p. 74** amàco |

#### Fibres et eau

**p. 77** Tracey Shelton | **p. 78-79** amàco | Pasi Aalto | amàco  
 | Pascal Oudet | **p. 80-81** amàco | **p. 82-83** Etienne Cliquet,  
 photos extraites de Flottille, 2011, vidéo de 17 minutes  
 courtesy Fondation Wattwiller | **p. 84-85** amàco | **p. 86-87**  
 Hygroskin : Courtesy of ICD University of Stuttgart | **p.**  
**88-91** amàco | **p. 92** Stéphane Nagou | **p. 93** amàco |

#### Fibres et matière molle

**p. 95** Lazare Eloundou/CRAtterre-ENSAG | **p. 96-97** amàco

#### Fibres et matière liante

**p. 99** OTCM SA | **p. 100-101** amàco |

### 3. CONSTRUIRE AVEC CE QUE L'ON A À PORTÉE DE MAIN

**p. 104-105** Helene Høyer Mikkelsen/Realdania Byg | **p.**  
**106-107** Andy Goldsworthy | **p. 108-109** *(dans le sens des aiguilles*  
*d'une montre en commençant par en haut)* Métisse® | amàco | Naturlin  
 | Sauvageot | amàco | Bill TT/bozomagic | J. Lin Morris  
 | droits réservés | Batiplum | droits réservés | droits  
 réservés | Kurt Hoerbst | amàco | **p. 110-111** amàco | **p.**

**112** amàco | amàco | amàco | Sharon Barotz and Carrie  
 Bilodeau | **p. 113-117** amàco | **p. 118-119** *(dans le sens des*  
*aiguilles d'une montre en commençant par en haut)* D. Gordon E. Robertson  
 | droits réservés | droits réservés | CRAtterre-ENSAG  
 | droits réservés | CRAtterre-ENSAG | Holcim | droits  
 réservés | droits réservés | droits réservés | CRAtterre-  
 ENSAG | Isiwal | Ammar Al-dujaili | **p. 120-121** droits  
 réservés | Christian Muir | Jonathan K. | droits réservés |  
 Jens Klinzing | Fanny Schertzer | droits réservés | Doron |  
 Tony/contemporarynomad.com | **p. 122-123** K. Kris Hirst  
 | Pratheeps | chroniques africaines | Maurits Vermeulen  
 | Coco Busan | Ziounclesi | PA/The Telegraph | Quistnix  
 | Notphilatall | **p. 124-125** Arjen Reas | Möhn+Bouman |  
 Elmo Swart Architects | Groosman Partners architecten |  
 Foreign Office Architects | Elmo Swart **p. 126-127** Manuel  
 Aires Mateus | Sabine Gretner | Philmouss | Takumi Ota  
 | LEVS Architecten | Stephane Chalmeau | Stephane  
 Chalmeau |

#### LES PHOTOS « AMÀCO » SONT DE :

Nuria Alvarez-Coll, Romain Anger, Marion Bisiaux, Lucile  
 Couvreur, Julien Deseigne, Laetitia Fontaine, Miguel Garcia,  
 Roland Gaudin, Anne-Marie Meunier, Mariette Moevus-  
 Dorvaux, Gian Franco Noriega Garnett, Martin Pointet, Zoé  
 Tric, Aurélie Vissac



# amàco

ATELIER MATIÈRES À CONSTRUIRE

centre d'excellence pédagogique  
sur les sciences de la matière  
pour la construction durable



ANR - 11 - IDEF1 - 0008

