

**MATÉRIALITÉS  
CONTEMPORAINES**

—  
**MATERIALITY  
IN ITS  
CONTEMPORARY  
FORMS**

—  
**ARCHITECTURE, PERCEPTION, FABRICATION, CONCEPTION**

**SOUS LA DIRECTION DE  
PHILIPPE LIVENEAU ET PHILIPPE MARIN**

**MC2012 SYMPOSIUM**



**MATÉRIALITÉS  
CONTEMPORAINES**

—

**MATERIALITY  
IN ITS  
CONTEMPORARY  
FORMS**

—

**ARCHITECTURE, PERCEPTION, FABRICATION, CONCEPTION**

**SOUS LA DIRECTION DE  
PHILIPPE LIVENEAU ET PHILIPPE MARIN**

**MC2012 SYMPOSIUM**

**MATÉRIALITÉS CONTEMPORAINES**

**CONCEPTION, FABRICATION, PERCEPTION DE L'ESPACE BÂTI**

Actes du colloque MC2012, organisé aux Grands Ateliers.

Une version électronique des articles est disponible en version pdf  
à l'adresse <http://mc2012.lesgrandsateliers.org>

**MATERIALITY IN ITS CONTEMPORARY FORMS**

**ARCHITECTURAL PERCEPTION, FABRICATION AND CONCEPTION,**

Proceedings of MC2012 symposium organised by Les Grands Ateliers.

An electronic copy of the papers in pdf format is available  
at the following address : <http://mc2012.lesgrandsateliers.org>

ISBN : 978-2-913962-14-9

Achever d'imprimer en novembre 2012 à Grenoble.

Copyright© 2012 by the authors

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement  
ou partiellement le présent ouvrage sans autorisation de l'éditeur.

### **RESPONSABILITÉ SCIENTIFIQUE \_ CONFERENCE CHAIR:**

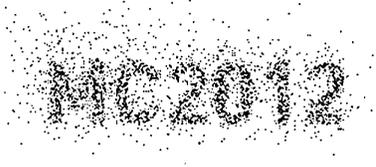
- Philippe Liveneau (ENSA Grenoble)
- Philippe Marin (ENSA Lyon)

### **COMITÉ SCIENTIFIQUE \_ SCIENTIFIC COMMITTEE:**

- Paul Acker (Scientific Director, Lafarge)
- Laury Barnes-Davin (Groupe Vicat)
- Romain Anger (ENSA Grenoble)
- Olivier Baverel (ENSA Grenoble)
- Hans Buri (EPF Lausanne)
- Thierry Ciblac (ENSA Paris - La Villette)
- François Fleury (ENSA Lyon)
- Gwenaël Delhumeau (ENSA Versailles)
- Tiana Delhome (CEA Grenoble)
- Antonin Fabbri (ENTPE)
- Gilles Lenon (CTP)
- Stéphane Magnin (ENSBA Nice)
- Dimitris Papalexopoulos (NTUA Grèce)
- Nicolas Pauli (ENSA Montpellier)
- Christian Père (ENSAM Cluny)
- Vinicius Raducanu (ENSA Montpellier)
- Silvana Segapeli (ENSA Saint Etienne)
- Rémi Rouyer (ENSA Versailles)
- Georges Teyssot (FAAAV Laval Canada)
- Maria Voyatzaki (AUTH Grèce)
- Henri Vandamme (ESPCI)

### **COMITÉ D'ORGANISATION \_ ORGANIZING COMMITTEE:**

- Pascale Besch (CCI Nord-Isère)
- Luc Bousquet (ENSA de Lyon)
- Hélène Casalta (ENSA de Grenoble)
- Luc Delattre (ENTPE)
- Michel André Durand (Grands Ateliers)
- Philippe Liveneau (ENSA Grenoble)
- Philippe Marin (ENSA Lyon)
- Jacques Porte (ENSA Saint Etienne)





# EDITO

## ACTES DU COLLOQUE MATÉRIALITÉS CONTEMPORAINES MC2012

Les Grands Ateliers fêtent en 2012 leur dixième anniversaire. Pôle d'enseignement, de recherche et d'expérimentation de la construction les Grands Ateliers ont développé l'essentiel de leur activité dans la formation des architectes et des ingénieurs à travers des modules pédagogiques dont la mise en œuvre a largement fait appel à l'expérimentation. Les Grands Ateliers qui souhaitent ancrer davantage la recherche dans leur quotidien ont choisi de marquer cet anniversaire en organisant un colloque qui permette de rassembler la communauté scientifique avec ses composantes du monde académique et du monde de l'entreprise.

Le thème retenu : Matérialités contemporaines conduit à s'interroger sur la confrontation entre les transformations technologiques et sociétales qui imprègnent notre vie courante d'une part, la conception et la production du cadre bâti, de nos espaces de vie et de travail d'autre part.

Les six thématiques retenues : matière sensible, matière énergie, matière structure, matière ambiance, matière innovante et matière information vont conduire à identifier les évolutions majeures et à définir les concepts à mettre en œuvre pour concevoir et produire le cadre bâti correspondant aux matérialités de ce début du XXI<sup>e</sup> siècle. Ces thématiques font ressortir qu'au-delà de la matière physique, atomique, il existe de nouveaux matériaux à prendre en compte qui relèvent de l'immatériel qu'il s'agisse de performances, d'informations ou de données numériques. De nouveaux savoirs, de nouvelles pratiques vont émerger qui au-delà des approches sectorielles invitent à imaginer les combinaisons qui permettront de travailler l'architecture de la qualité de vie, du bien-être et de la santé, de produire « l'architecture de l'invisible » selon l'expression de Richard MAZUCH.

Les Grands Ateliers sont en veille attentive pour s'en saisir et poursuivre, dans la mixité culturelle, leur mission de formation, de recherche, de diffusion des savoirs et savoir-faire pour la construction durable.

**MICHEL A. DURAND**

Directeur



# SOMMAIRE \_ CONTENT

## INTRODUCTION

- **INTRODUCTION\_PRESENTATION** p 11  
Philippe Liveneau, Philippe Marin

## CONFÉRENCES \_ KEYNOTES

- **MATERIALIZING DESIGN** p 31  
Lawrence Sass
- **ARCHITECTURE OF CHANGE: BUILDING DYNAMICS AND KINETIC MATTER** p 39  
Branko Kolarevic
- **RECHERCHE ET ENSEIGNEMENT À L'IBOIS** p 47  
Yves Weinand

## PENSER LA MATÉRIALITÉ \_ THINK OF THE MATERIALITY

- **MATIÈRE INTENSIVE ET MÉTASTABLE ; ARCHITECTURE NUMÉRIQUE INFORMÉE PAR L'OPTIMISATION TOPOLOGIQUE** p 55  
Bernier-Lavigne Samuel
- **PERFORMATIVITÉ. LE PARADIGME INFORMATIONNEL ET ARCHITECTURE SYSTÉMIQUE** p 65  
Cifuentes Quin Camilo
- **BETWEEN STATIC SOLIDS AND UNSTABLE PIXELS** p 73  
Rimkus Carla
- **DIGITAL ORNEMENTATION: THE INVERSE RELATION BETWEEN INFORMATION AND FORM** p 79  
Abondano David

## VERS LA MATÉRIALITÉ \_ TOWARDS THE MATERIALITY

- **THE GRASPING HAND AS FORM GENERATOR. GENERATIVE MODELLING IN PHYSICAL AND DIGITAL MEDIA** p 91  
Dimitriou Maria, Vyzoviti Sophia
- **LE NUAGE, FIGURE D'UNE MATÉRIALITÉ CONTEMPORAINE. L'EXEMPLE DE L'ÉCOLE D'ARCHITECTURE DE NANTES PAR LACATON ET VASSAL** p 101  
His Ghislain
- **LE CHOIX DES MATÉRIAUX ET LA PENSÉE SYSTÉMIQUE. REFLEXIONS À PARTIR D'UNE ANALYSE TEXTUELLE** p 113  
Adolphe Luc, Bonneaud Frédéric, Tornay Nathalie

## MATÉRIEL - IMMATÉRIEL \_ MATERIAL - IMMATERIAL

- **MATIÈRE ET AMBIANCES : LES FORMANTS SENSIBLES À LA MATIÈRE** p 123  
Chelkoff Grégoire
- **LA MATIÈRE VÉGÉTALE : DE LA PRAGMATIQUE DU JARDINAGE À LA CONCEPTION D'UNE POLITESSE DES MAISONS** p 133  
Paris Magali
- **ORIGINALITÉ ARCHITECTURALE DU SILENCE. PEUT-ON COUPER LE SILENCE EN DEUX ?** p 145  
Bouajila Ben Afia Syrine
- **MATIÈRE ET COMPORTEMENTS PSYCHOMOTEURS. LE CAS D'ENFANTS PRÉSENTANT DES TROUBLES PSYCHIQUES GRAVES** p 155  
Léothaud Isabelle
- **A SPATIAL NAVIGATION SYSTEM WITH AUTO-3D TRACKING AND AUTO-STEREOSCOPIC CONVERGENCE** p 163  
Wu Yen Liang



- **HACKING ARCHITECTURE TO LET COLLECTIVE INTELLIGENCE IN** p 171  
Renk Alain, Simone Walter
- **SULPHUR, ARCHIVAL TRACES AND NARRATIVES OF HYPER-MATERIALITY** p 177  
Kotsani Efthymia, Tellios Anastasios, Tsakiridis Giorgos
- **CANOPEA : DES NANOTOURS SOLAIRES INTÉGRÉES DANS UN ÉCO SYSTÈMES URBAIN** p 185  
Balaÿ Olivier, Rollet Pascal

#### MATIÈRE PHYSIQUE \_ PHYSICAL MATERIAL

- **ACTIVE ETFE FAÇADE SYSTEMS** p 199  
Riether Gernot
- **LE BÉTON À LA CARTE : PERTE D'IDENTITÉ OU MATÉRIAUX IDÉAL ?** p 205  
Acker Paul
- **DE « GRAINS DE BÂTISSEURS » À L'ATELIER « MATIÈRES À CONSTRUIRE »** p 215  
Anger Romain, Doat Patrice, Durand Michel-André,  
Fontaine Lætitia, Houben Hugo, Olagnon Christian, Van Damme Henri
- **ETUDE DE L'IMPACT DES MATIÈRES PREMIÈRES  
SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES ET THERMIQUES DES BÉTONS DE CHANVRE** p 227  
Arnaud Laurent, Gourlay Etienne

#### MATIÈRE ET DONNÉES \_ MATERIAL AND DATA

- **ETUDE HYGROTHERMIQUE DES PAROIS ANCIENNES  
ASSOCIÉES À DES MATÉRIAUX CONTEMPORAINS ISOLANTS** p 239  
Burgholzer Julien, Djahanbani Keivan, Floissac Luc,  
Héberlé Élodie, Perrin Bernard, Valkhoff Hans, Vervisch-Fortuné Isabelle
- **DECISION AIDING & MULTI CRITERIA GENETIC OPTIMIZATION  
FOR EXISTING BUILDINGS HOLISTIC ENERGY RETROFIT** p 251  
Baverel Olivier, Peuportier Bruno, Rivallain Mathieu
- **EMERGENCE OF SPATIAL FORMATIONS THROUGH AGENTS' DYNAMIC INTERACTION** p 261  
Kerkidou Maria, Pechlivanidou-Likata Anastasia
- **I-MATTERS: IN\_FORMING MATERIALITY** p 271  
Voyatzaki Maria

#### EXPÉRIMENTATIONS - PROTOTYPES (1) \_ EXPERIMENTS - PROTOTYPES (1)

- **LA ROSÉE ANNONCE LE BEAU TEMPS. DES ARCHITECTURES DE ROSÉE** p 281  
Beysens Daniel, Brogginì Filippo, Tixier Nicolas
- **UTILISATION DE RESSOURCES NON-STANDARD POUR LA CONCEPTION  
DE STRUCTURES ARCHITECTURALES À FAIBLE IMPACT ENVIRONNEMENTAL.  
APPLICATION À L'UTILISATION D'ÉLÉMENTS EN BOIS TRANSFORMÉS** p 291  
Bignon Jean-Claude, Duchanois Gilles, Monier Vincent
- **RECIPROCAL SYSTEMS BASED ON PLANAR ELEMENTS** p 299  
Baverel Olivier, Pugnale Alberto
- **TWIN SHAPE COMPOSED BEAM, PASSERELLE EN MATÉRIAUX COMPOSITES** p 309  
Ambrosini Marco, Brogginì Filippo, Diviani Luca, Martignoni Ugo

#### EXPÉRIMENTATIONS - PROTOTYPES (2) \_ EXPERIMENTS - PROTOTYPES (2)

- **MORPHOLOGY AND STRUCTURAL INVESTIGATION OF INTERCONNECTED GRID SHELLS** p 321  
Baverel Olivier, Jensen Tim-Joachim
- **UNE MÉTHODE DE MODÉLISATION CROISÉE  
POUR CONCEVOIR DES STRUCTURES EN BOIS : LES DÉFIS DU BOIS** p 335  
Besançon Franck, Bignon Jean-Claude, Duchanois Gilles



Figure 1  
Le passage, stratostructure, transformation continuée de la forme et modulation des intensités lumineuses, 64 sections uniques, MDF de 8 mm, découpe CNC 5 axes des Grands Ateliers

1

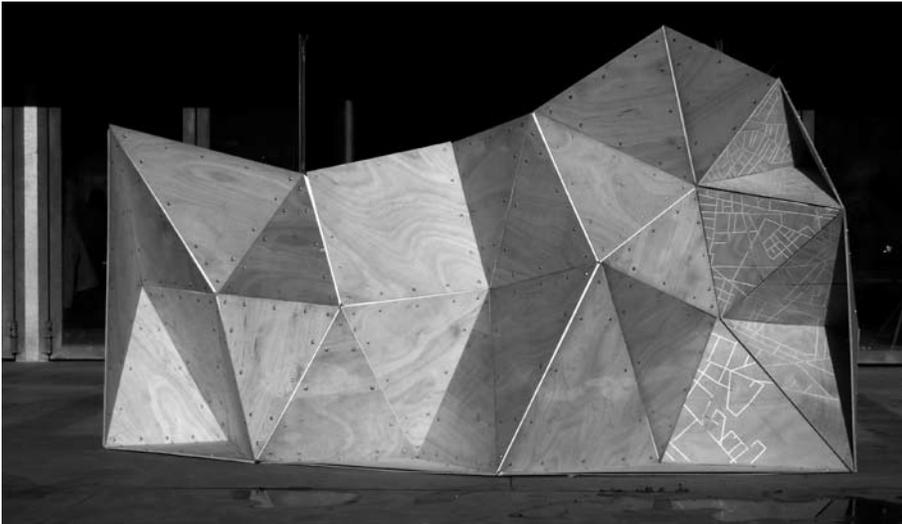


Figure 2  
Modélisation dynamique et tessellation, CP 3 mm

2

# INTRODUCTION

**PHILIPPE LIVENEAU<sup>1</sup>, PHILIPPE MARIN<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble, Laboratoire Cresson UMR CNRS 1563.

<sup>2</sup>Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Lyon, Laboratoire MAP-ARIA UMR CNRS-MCC 3495

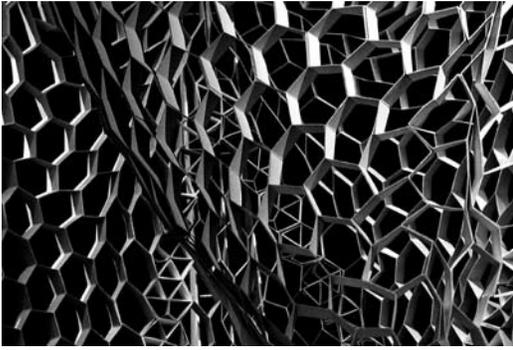
The far-reaching technological and societal changes which characterize our time go hand-in-hand with the re-organization and renewal of the issues associated with the design and construction of our built environment. Our symposium will centre on the question of materiality in its multiple forms, addressed from a multi-disciplinary, polysemic point of view. Atomic matter has always been and remains pivotal to humankind's building activities, but this matter now has an immaterial extension in the conditions, effects or indeed performance which have become design materials in their own right. These project vectors thus give rise to new practices, know-how and construction techniques, in such a way that the modalities of project planning, design and production, every bit as much as the usual architectural modalities, configure the force field which gives shape to projects. So the notion of materiality takes on a broader sense, encompassing invisible, normative, physical, sensory, digital and societal components. Once completed an architectural project should be understood as a synthesis by which the form of forces configures the force of a form, but new forms of materiality grasped in a performative rationale nevertheless strengthen sectoral expertise. Following six specific threads our prime aim is to present the emblematic changes and innovations which are accompanying the renewal of the paradigms associated with the construction of our physical and human environment.

## **Matter for the senses**

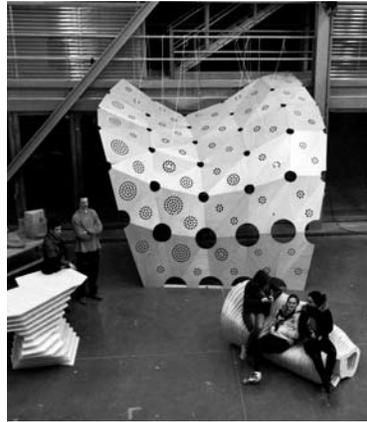
Given the shift to an increasingly cybernetic world and the information era which is now building an augmented reality, how does the sensory dimension of the architectural experience connect to the prospect of a dual materiality, made of waves and bytes, both informed by the ergonomic immersion of humans in publicized interaction with their surroundings? How then is the relation between body and space organized, starting from gestures which calibrate and grasp materiality?

## **Matter as energy**

Given the obligation to optimize the energy consumption of our buildings in keeping with the increasing rarity and/or emergence of energy sources, how does managing the environmental footprint of resource materials become a key vector in framing positive-energy projects?



3



4

Figure 3  
Conque de lecture, maille nid d'abeille déformable  
Carton plat alimentaire  
450 gr.

Figure 4  
Surface paramétrée par les conditions environnementales. Découpe numérique CP 3 mm.

### **Matter as structure**

Given the revolution of the past 10 years in digital technology and energy, coupled with advances in the development of new materials, how is structural engineering reconfiguring the way it calculates and its models while constantly optimizing the static and dynamic performance of its objects.

### **Matter as a source of innovation**

Given our contemporary nanometric perspective, and scope for determining the physical qualities and properties of material in which instruments are embedded, making it programmable, how is applied research, or R&D in cellulose, cement and glass firms, fashioning smart materials or more broadly smart surfaces? Such materials do not just contribute to producing architectural envelopes, but become the quasi-subjects and/or objects of interactive ergonomics, multi-sensory components repositioning humans in a relational dynamic with their environment.

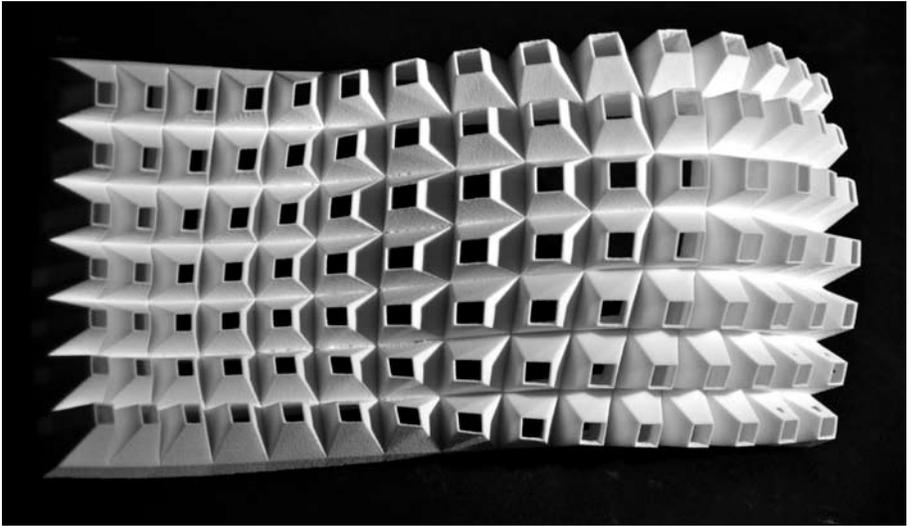
### **Matter as information**

Given the instrumentation of matter, the convergence of bytes and atoms in the definition of the attributes of our contemporary materiality, how does architecture, and in particular its envelopes, integrate the spread of ubiquitous space in an invisible layer of information superimposed on physical reality to build a data continuity which assimilates matter and information?

### **Matter as ambiance**

Given the digital revolution and the outlook for the environment, how can contemporary architecture, seen from a morphogenetic and atmospheric perspective, bring new order, in the definition of its materiality, related to both a pragmatic understanding of usage and the energy performance of its envelopes? How does the phenomenological and cultural re-inscription of a technical object change the processes by which we design, understand and appropriate our environment?

Figure 5  
Composant  
paramétrique  
propagé sur  
une surface.  
Maquette  
impression 3D  
Frittage



5

Drawing on these sub-themes, the second aim of the symposium is to map out the modalities of hybridization and cross-breeding, which supersede sector-specific approaches and enable us to establish iconic design paths, specific to the new forms of materiality at work in the 21st century, and which may be characterized by deploying innovative pedagogy, in research and industry, but also in project management. These contributions illustrate the procedures, experiments and conventions which continue to redefine our relations with the physical world. They reflect the hybridization of disciplines and the integration of hard science and the humanities in a dynamic which marks the ways we design, build and perceive our built environment.

The six initial themes have taken shape through the ordered emergence of a web tying together the threads in this work and the symposium: from epistemological reflexivity on what the notion of materiality itself refers to, as it seeks to come to terms with evolving technology and the associated cognitive models, to innovative ways of deploying proto-forms, proto-types and projects.

### **CONCEPTUALIZING MATERIALITY**

Before actually shaping matter, the modalities of digital instrumentation make allowance for its particularities. With Samuel Bernier-Lavigne, we see how the form-force-matter triptych may be seen from the point of view of its relational dynamic leading to the emergence of an intensive, metastatic matter. Camilo Andrés Cifuentes Quin takes a new look at the increasingly widespread use of information theory and the contribution of cybernetics integrated in a performative approach to architectural design. Following on from this, Carla Rimkus considers characteristic recent work, highlighting the emergence of new methods, practices and ultimately forms of spatiality associated with digital technology. David Abondano shows how innovative ornamentation comes about through interaction between architecture, a new digital materiality and bio-inspiration.

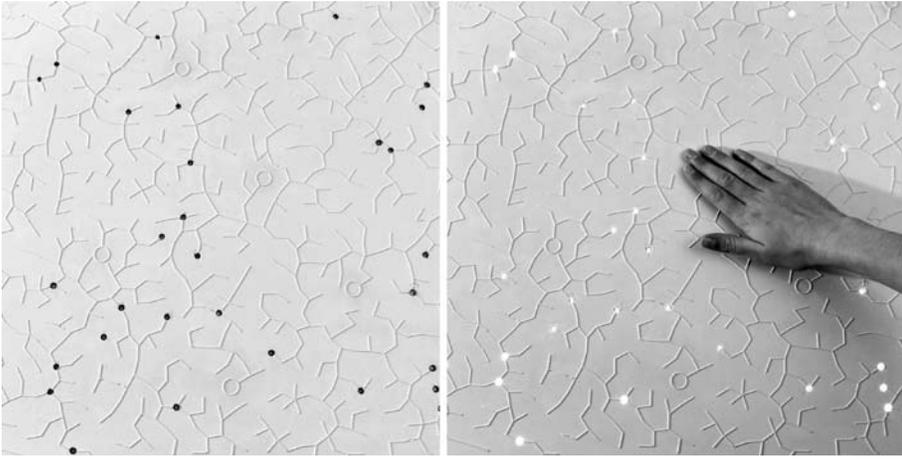


Figure 6  
Panneau  
de béton  
instrumenté  
interactif.  
Béton Ductal  
Lafarge,  
carte Arduino,  
capteurs  
capacitifs, Led

6

## TOWARDS MATERIALITY

Sophia Vyzoviti et al explore the fruitful hybridization between the intuitive physical gesture involved in shaping matter and the use of digital models. Ghislain His focuses on issues related to physical and social ecology, integrating usage and ambiance variables, and characterizes the cloud concept symbolic of contemporary materiality. Drawing on textual analysis, Nathalie Tornay et al propose to characterize the ecological, technical and sensory dimensions which designers entertain with materials.

## IMMATERIAL MATTER

Taking a medial approach, building a track to bridge the gap between the physical reality of the material world and the phenomenal quality of sensory experience, Grégoire Chelkoff looks at how changing technology offers new ways of integrating ambiance factors in the design of our environment. Magali Paris shows how plant matter, over and above its organic nature and physical reality, builds a singular sociability and becomes the matter of a new form of urbanity. Syrine Bouajila Ben Afia seeks to characterize silence as the matrix of spatial experience of the in-between in architecture. Lastly, drawing on the case of children displaying serious psychic disorders, Isabelle Léothaud identifies, in their psycho-motor behaviour, regimes for interaction between the material world and sensory experience.

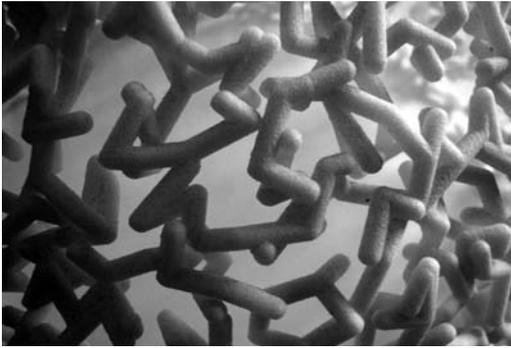
## IMMATERIAL MATTER II

Yen-Liang Wu develops peripheral devices for navigating virtual reality, opening the way for new ways of visualizing space. Renk Alain et al are working on digital tools for collaborative intelligence. Anastasios Tellios et al are experimenting, in a dystopian perspective, the modalities of robotic manufacturing controlled by organically inspired algorithms. Olivier Balaÿ et al present a prototype self-sufficient dwelling integrated in an urban ecosystem.

## PHYSICAL MATTER

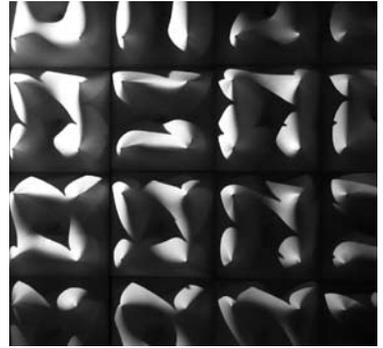
Ongoing changes in materials science are leading to a radical shift in our understanding of what a material is. Starting from the basic knowledge of granular or fibrous elementary

**Figure 7**  
Morphologie  
bio inspirée.  
Maquette  
impression  
3D Frittage,  
morphogénèse  
de type  
Diffusion par  
Agrégation  
Limitée (DLA)



7

**Figure 8**  
Dunes,  
modulation  
et variation  
répétitive.  
Lyca



8

particles, and the ways they may be transformed or behave in various combinatorial forms or under the effect of an additive, matter in the process of becoming a material offers as many conceivable or possible outcomes controlled in such a way that the generic designation of a material covers a particular field of structural, physical or qualitative properties. Riether Gernot presents the active properties of a surface made of Ethylene tetrafluoroethylene (ETFE). Paul Acker recalls the story of concrete, revealing the multiple forms of this material including high-performance fibre-reinforced concrete (FRC), perhaps its ideal expression. Laetitia Fontaine et al articulate basic learning on earth as a material, physical and chemical reactions specific to particular morphologies, achieved using techniques such as stacking, granular segregation, or the capillary bonding obtained by adding water. Following a research and innovation rationale, Laurent Arnaud et al present the mechanical and hygro-thermal properties of hempcrete depending on variations in the density of hemp particles and the associated bonding agents.

## **MATTER AND DATA**

Running parallel to our growing understanding of materials and their behaviour, in particular thanks to advances in the methods of observation and analysis, modelling tools offer increasing scope for exploring and optimizing the performance of materials. Assisted by a software tool, Isabelle Vervish-Fortuné et al present their comparative analysis of the hygro-thermal impact of rehabilitating old walls with modern materials.

Mathieu Rivalain et al present a multiple-criteria decision aid for optimizing the overall energy balance of existing structures. Maria Kerkidou et al focus on the development of a generic platform based on spatial emergence triggered by interaction between dynamic agents. Lastly Maria Voyatzaki, surfing on the digital turn in architecture and computational design, presents four modalities for characterizing the notion of materiality.

## **EXPERIMENTS AND PROTOTYPES**

In two separate sessions the problematic, reflexive and epistemological thrust of questioning on contemporary forms of materiality presented above takes shape with the pragmatic, concrete realization of full-scale prototypes. On each occasion determination and realization are the result of disciplinary hybridization or reasoned convergence of selected, manipulated data. Daniel Beysens et al present a dew architecture, a prototype which capitalizes on the fit between environmental characteristics and morphological potential in the service of environmentally-aware water management. Jean-Claude Bignon et al explore a new structuralism thanks to interaction between tools for modelling



Figure 9  
Ombrière  
Canopée 1.  
Nouvelle  
ornementation

9

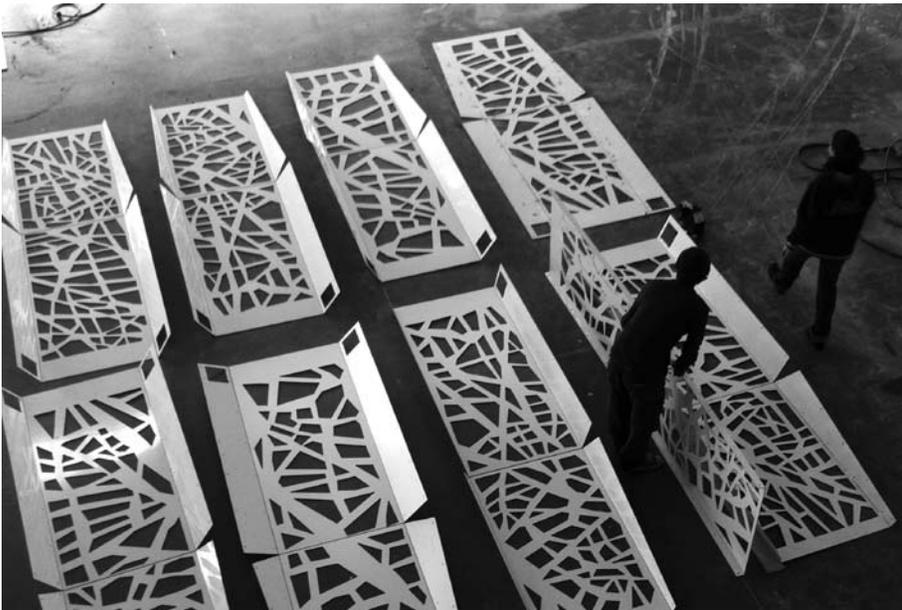


Figure 10  
Développé  
de surface  
Canopée 3  
Iconique  
chapelle Fête  
des lumière  
de Lyon

10

non-standard morphologies and the properties of wood. Olivier Baverel et al look at the structural potential of reciprocal systems based on planar components, articulating advanced geometry, structure and device materiality. Filippo Brogini presents a completed carbon footbridge, drawing on innovative technology combining material, morphological, productive and ambiance-related determination. Olivier Baverel et al describe the realization of a grid-shell structure, a direct offshoot of structural geometry, and the potential afforded by parametric modelling tools. Lastly, in a similar vein, Franck Besançon et al present, as part of a project to develop a crossover modelling method, the articulation between design models, the semantic model, the analog, geometrical and structural model, and the prototype model.

Taking these topics a little further Lawrence Sass presents his work on digital pre-fabrication, characteristic of the transformations associated with manufacturing methods in the context of digital technologies and mass-personalization. Branko Kolarevic considers buildings in their interactive dimension and materials as a dynamic, moving component.

Yves Weinand presents the works and researches conducted in the laboratory IBOIS pursuing a multidisciplinary approach bringing together architects and engineers. Researches concern the software development and implementation related in the generation of complex shapes in the control and design as well as for controlling CNC machines.

From being a constraint materials have become a design parameter, part of the extendable field of possibles, a singular configuration of variables which has its place in science and technology, natural science, the humanities, art and culture, playing a part in the ongoing reformulation of materiality as a concept.

## WORKSHOP

The experimentation seminar associated with MC-2012 focuses on experimentation on the modalities of design and manufacture in the light of the third industrial revolution. Designers must fit their offerings to an economy of variety, a manufacturing rationale based on mass-personalization. The modalities of parametric design and the inscription of the designed object in a continuum through variation opens the way for conceptualizing multiplicity. Here the designer no longer works on defining a single solution but rather a population of solutions. The device he or she realizes reveals a particular instance of a set of possibilities with the potential for being actualized. In turn these principles weigh on the modalities of digital fabrication which allow the resulting device to be individualized and leave room for non-standard morphologies. During the workshop numerical control lathes, laser cutting machines and robotic arms will be available to produce the architectural devices participants have designed.

At the same time the development of 'smart materials' implies new forms of interaction with the end-user. These interaction devices -materials integrating sensors, actuators, memory and processing capacity- take on board notions of situation, information and temporality. Inert objects have given way to relational systems, devices and objects, to objects capable of interfacing, informing and communicating, in short to ambient objects. They represent conjunctions of situation, interaction and representation. The modalities of design, fabrication and interaction will be experimented with the production of an interactive light installation.

# EXHIBITION

The exhibition associated with MC-2012 presents 12 pieces relevant to the field of non-standard architecture as well as a series of models. They represent ambient quasi-objects – prototypes and micro-architectures illustrating the modalities of digital design and fabrication in the service of user-friendly ergonomics. This work was done as part of courses jointly taught by the Ecole Nationale Supérieure d'Architecture, in Grenoble and Lyon respectively, as part of the Strategies for Advanced Eco-Design programme led by Philippe Liveneau and Philippe Marin, and funded by the Rhône-Alpes regional council. The exhibits featured among the installations laid on for the Fête des Lumières in Lyon but also the concluding event of the celebrations marking the 50th anniversary of the Grenoble University campus. They were also part of a joint course for architects and engineers organized respectively by Ensa Grenoble and Grenoble INP Pagora (the International School of Paper, Printed Communication Media and Biomaterials).

This work fits into the larger context of digital design and fabrication technologies. It questions the design-fabrication continuum through instrumentation and experimentation which lead to the production of models using laser-cutting tools and 3D printers, and of prototypes on the same scale as bodies in movement using a five-axis Rover A CNC system at Les Grands Ateliers.

Students must come to grips with an exercise in imagining and modelling an object for design, but also materializing it through the use of digital cut-out techniques and rapid prototyping.

Design work is consequently based on defining a process for modelling then fabrication. The design-fabrication continuum is central to our concerns, so students acquire skills in both the instrumentation of emerging tools and the understanding of the associated cognitive continuum.

Solving architectural issues hinges on innovation and experimentation. The proto-architectural designs produced here are part of a parametric exploration of a population of possible solutions, among which the ones which have been selected reveal a significant moment in the established process of morphogenesis.

The 'ambiological' qualities at stake are underpinned by issues of whether the device can actually be made and its constructive resolution, of economic use of materials and allowance for environmental factors.

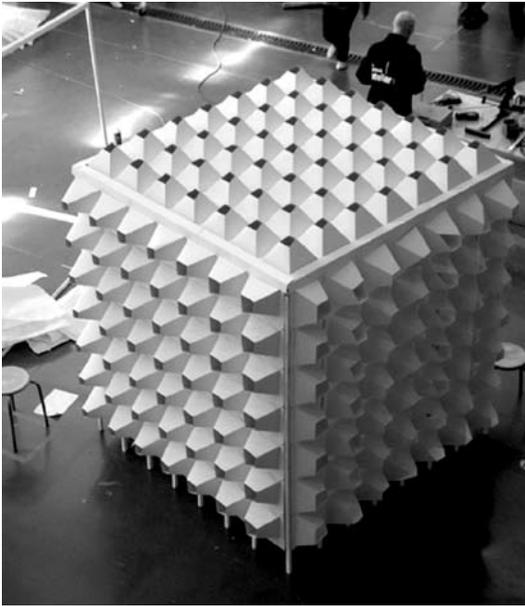
The ambient objects on show are formalized instances of ongoing design of form, only limited by our perceptive capacities, and by interaction between users and society. They are the remarkable expression of an optimum, the realization of a proto-form which has become a prototype through parametric selection and combination of the project's vectors and dimensions. This process of informed convergence and coalescence of the relevant data redirects the formal flow by which the form of forces becomes the force of a form, information as form, ambiance as form. From the ambient determinants of form to the configurations and conformations of ambiance, they build an event, the emotional effervescence of their realization suiting individual experience.

**Figure 11**  
Flying  
honeycomb.  
Nid d'abeille  
extrudé  
en double  
courbure  
Développé  
de surface en  
alucobond-  
Rhino  
Grasshopper  
Découpe /  
rainage CNC  
5 axes des  
Grands Ateliers



11

**Figure 12**  
Pyramide box  
Sérialisation  
du singulier  
Variation des  
développés  
de surface



12

#### TABLE DES ILLUSTRATIONS

- Figure 1 Evenement 50 ans du campus de Grenoble 2012 - Atelier Liven eau - Ensag photographie ©Liveneau  
 Figure 2 Workshop (in)form - 2009 - ENSAG/ENSAL - Photographie ©Marin  
 Figure 3 Courtine de Tir, Bastille - Imaginer Maintenant 2010 - Maison de la culture de Grenoble MC2  
 Collaboration Architectes Ingénieurs - Atelier Liveneau, photographie ©Liveneau  
 Figure 4 Workshop (in)form - 2011 - ENSAL - Photographie ©Marin  
 Figure 5 Workshop (in)form - 2012 - ENSAL - Photographie ©Marin  
 Figure 6 Projet de recherche Matérialité Numérique - 2012 - Blanchi, Liveneau, Marin, Superlab, CEA Grenoble.  
 Photographie ©jp Angei  
 Figure 7 Blanchi, Marin - Exposition 2006 - Le Dojo Nice - Photographie ©Marin  
 Figure 8 Imaginer Maintenant - Maison de la culture de Grenoble, MC2  
 Atelier Liveneau, photographie ©Caroline Cieslik  
 Figure 9 Les Grands Ateliers sur la Place - Région Rhône-Alpes - Atelier Liveneau, photographie ©Liveneau  
 Figure 11 Événement 50 ans du campus de Grenoble - Atelier Liveneau - Ensag, photographie ©jp-angei  
 Figure 12 Workshop Expérimentation plastique Gestualité tectonique / Imaginer Maintenant - Maison de la culture  
 de Grenoble, MC2 - Atelier Liveneau, photographie ©Liveneau



Figure 1  
Nef Alucobond  
Cintrage,  
découpe,  
rainage - CNC  
5 axes Grands  
Ateliers

# INTRODUCTION

PHILIPPE LIVENEAU<sup>1</sup>, PHILIPPE MARIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble, Laboratoire Cresson UMR CNRS 1563.

<sup>2</sup>Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Lyon, Laboratoire MAP-ARIA UMR CNRS-MCC

Ce colloque scientifique s'inscrit dans les perspectives de développement des activités de recherche des Grands Ateliers. Il se veut rassembleur d'une communauté régionale, nationale et internationale, il est résolument prospectif et orienté vers la recherche et l'innovation.

Les transformations technologiques et sociétales profondes qui caractérisent notre époque s'accompagnent d'une réorganisation et d'un renouvellement des enjeux associés à la conception et la construction de notre espace bâti. Les travaux présentés ici sont centrés sur la question des matérialités appréhendées sous un angle pluridisciplinaire et polysémique. Si la matière atomique est depuis toujours et demeure au centre des activités de construction de l'humanité, cette matière trouve aujourd'hui un prolongement immatériel à travers les conditions, les effets ou encore les performances qui deviennent les matériaux de la conception. Ces vecteurs de projet engendrent ainsi des pratiques, des savoir-faire et des mises en œuvre nouvelles de telle sorte que les modalités de programmation, de conception, de production, tout autant que les modalités d'usage de l'architecture configurent le champ des forces intégrées qui donnent forme aux projets. La notion de matérialité s'entend alors aussi dans un sens élargi à des composantes invisibles, normatives, physiques, sensibles, numériques, sociétales.

Si le projet architectural doit être compris à son terme comme une synthèse par laquelle la forme des forces configure la force d'une forme, les nouvelles matérialités appréhendées dans une logique performative renforcent l'expertise sectorielle.

À travers six entrées spécifiques, l'objectif premier est de présenter les évolutions et les innovations emblématiques qui accompagnent le renouvellement des paradigmes associés à la construction de notre environnement physique et humain. L'appel à communication proposait ainsi :

## **Matière sensible :**

Assumant le tournant cybernétique et l'ère de l'information qui construisent aujourd'hui une réalité « augmentée », comment la dimension sensible de l'expérience architecturale articule-t-elle aujourd'hui l'horizon d'une matérialité duale faite d'ondes et d'octets qui s'informent mutuellement à même l'immersion ergonomique de l'homme en interaction médiatisée avec son environnement ? Comment s'organise alors le rapport du corps à l'espace à partir d'une gestualité qui étalonne et sollicite la matérialité .

## **Matière Energie :**

Assumant l'obligation d'une optimisation énergétique de nos édifices en adéquation avec la raréfaction et/ou l'émergence de sources d'énergie, comment la gestion de l'empreinte écologique des matières ressources devient-elle un vecteur central de développement de projets à énergie positive ?



Figure 2  
Tessalation et  
ornementation.  
Maquette  
impression 3D  
Frittage.

2

### **Matière structure :**

Assumant la double révolution numérique et énergétique de ces 10 dernières années, tout autant que les avancées sur la mise au point de nouveaux matériaux, comment l'ingénierie des structures reconfigure-t-elle ses modalités de calcul tout autant que ses modèles dans la constance d'une optimisation des performances statiques et dynamiques de ses objets.

### **Matière innovante :**

Assumant les horizons nanoscopiques contemporains tout autant qu'une détermination possible des qualités et propriétés physiques d'une matière instrumentée à programmer, comment la recherche appliquée ou les centres de recherche et développement des industries celluloseuses, cimentières ou verrières (...) fabriquent-elles un matériau intelligent, ou plus généralement des « smart surface », qui ne concourent plus seulement à la réalisation de simples enveloppes architecturales, mais deviennent des quasi sujet/objet d'ergonomie interactive, des composants multi-sensoriels réinscrivant l'homme dans une dynamique relationnelle avec son environnement.

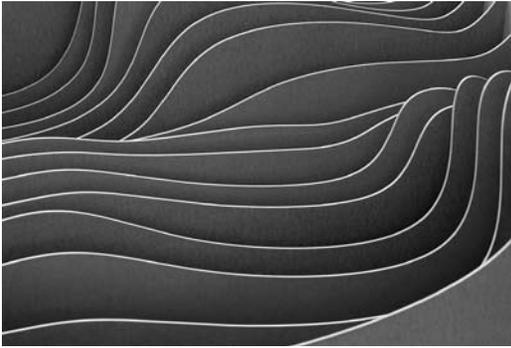
### **Matière information :**

Assumant l'instrumentation de la matière, la coalescence de l'octet et de l'atome dans la définition des attributs de la matérialité contemporaine, comment l'architecture et en particulier les enveloppes intègrent-elles la généralisation d'un espace ubiquitaire, la superposition d'une couche informationnelle invisible à la réalité physique en construisant le continuum informationnel qui assimile matière et information ?

### **Matière ambiance :**

Assumant le tournant numérique tout autant qu'une perspective écologique, comment l'architecture d'aujourd'hui, appréhendée dans une double perspective morphogénétique et atmosphérique, réordonnent-elle, dans la définition de sa matérialité, ce qui relève d'une pragmatique de l'usage et ce qui relève des performances énergétiques de ses

**Figure 3**  
Ondulations.  
Panneaux  
médium 8 mm  
découpés.



3

**Figure 4**  
Déformation  
topologique.  
Thermoformage plaque  
PMMA et bois.



4

enveloppes ? Comment les réinscriptions phénoménales et culturelles de l'objet technique modifient les processus de conception, de compréhension et d'appropriation de notre environnement ?

À la lecture de ces sous thématiques, les contributions rassemblées ici dressent la cartographie des modalités d'hybridation et de traverse qui, par-delà les approches sectorielles, permettent d'établir les chemins de conception iconiques et spécifiques aux nouvelles matérialités de ce début de 21ème siècle, caractérisables autant dans la mise en œuvre de pédagogie innovante, que dans la recherche et l'industrie ou que dans le champ de la maîtrise d'œuvre. Ces contributions illustrent des démarches, des expérimentations, des acceptions qui contribuent à redéfinir les relations que nous entretenons avec la chose physique, elles marquent une hybridation des disciplines et l'intégration des sciences dures et des humanités dans une dynamique qui constitue les marqueurs de nos modes de conception, de fabrication et de perception de l'espace bâti.

Les six thématiques initiales ont pris corps à travers l'émergence ordonnée d'une trame qui constitue le fil de l'ouvrage et celui du colloque : depuis une réflexivité à caractère épistémologique sur ce que désigne la notion même de matérialité aux prises avec l'évolution des techniques et modèles cognitifs associés jusqu'aux mises en œuvre innovantes des proto-formes, proto-types et projets.

## **PENSER LA MATÉRIALITÉ**

Dans ce qui précède la mise en forme, les modalités d'instrumentation numérique intègrent les singularités de la matière. Avec Samuel Bernier-Lavigne, nous voyons comment le triptyque « forme, force, matière » est considéré dans sa dynamique relationnelle conduisant à l'émergence d'une matière intensive et métastable. Camilo Andrés Cifuentes Quin revient sur la généralisation de la théorie de l'information et sur les apports de la cybernétique intégrées à une approche performancielle de la conception architecturale. En prolongement, Carla Rimkus considère des travaux caractéristiques récents pour montrer l'émergence de méthodes, de pratiques et in fine de spatialités nouvelles associés aux technologies numériques. David Abondano montre comment une ornementation innovante naît des relations entre architecture, nouvelle matérialité numérique et bio-inspiration.

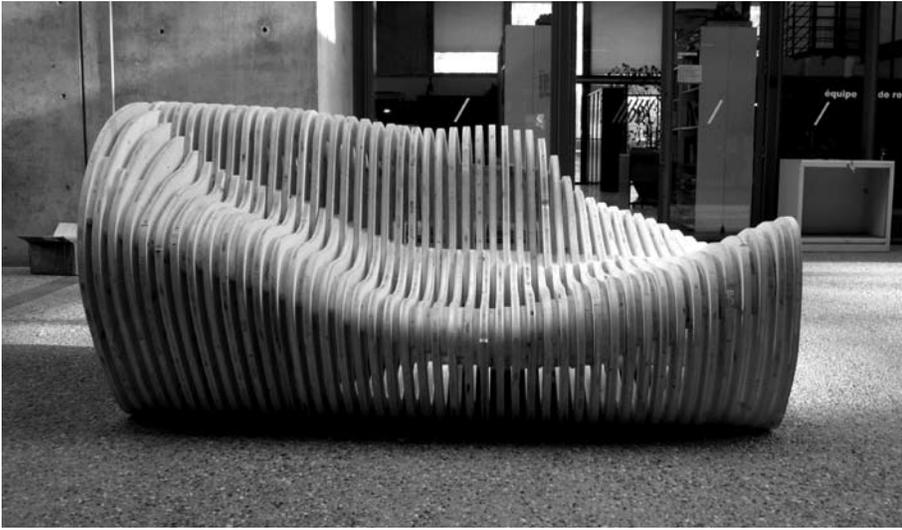


Figure 5  
Banc Extra  
Small  
Anamorphose.  
Plaques de  
Trois Plis Pin  
Colle Extérieur,  
23mm.

5

## VERS LA MATÉRIALITÉ

L'hybridation fructueuse entre le geste physique intuitif de mise en forme et l'utilisation de modèles numériques est explorée par Sophia Vyzoviti et alii. Ghislain His revient sur les questions d'écologie physique et d'écologie sociale en intégrant des variables d'usage et d'ambiance et il caractérise la figure du nuage symbole d'une matérialité contemporaine. Nathalie Tornay et alii proposent de caractériser les dimensions écologique, technique et sensible que le concepteur entretient avec les matériaux à travers une analyse textuelle.

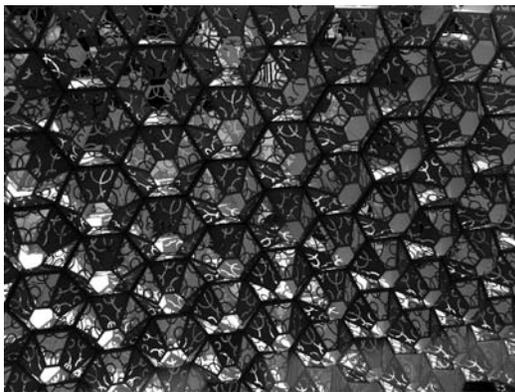
## MATÉRIEL IMMATÉRIEL (1)

Suivant une approche médiale, construisant un chemin de traverse entre la réalité physique du monde matériel et la qualité phénoménale de l'expérience sensible, Grégoire Chelkoff propose d'envisager comment l'évolution des techniques, offre une intégration nouvelle des facteurs d'ambiance dans le design de notre environnement. Magali Paris expose comment la matière végétale, au-delà de son organicité et de sa réalité physique, opère la construction d'une sociabilité singulière et devient la matière d'une nouvelle forme d'urbanité. Syrine Bouajila Ben Afia tente une caractérisation du silence comme matrice d'une expérience spatiale de l'entre-deux, en architecture. Enfin, en s'appuyant sur le cas d'enfants présentant des troubles psychiques graves, Isabelle Léothaud identifie à travers leurs comportements psychomoteurs, des régimes d'interaction entre monde matériel et expérience sensible.

## MATÉRIEL IMMATÉRIEL (2)

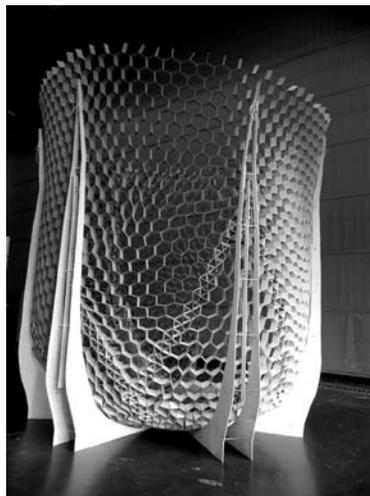
Yen-Liang Wu développe des périphériques de navigation en réalité virtuelle et autorise de nouvelles visualisations spatiales. Renk Alain et alii travaillent sur des outils numériques d'intelligence collaborative. Anastasios Tellios et alii expérimentent, dans une perspective dystopique, les modalités de fabrication robotisée conduites par des algorithmes bio inspirés. Olivier Baläy et alii présentent un prototype d'habitat autosuffisant intégré à un écosystème urbain.

**Figure 6**  
Vibration  
lumineuse  
Eco-éclairage  
Structure  
en carton  
Découpe CNC  
dédiée



6

**Figure 7**  
Conque de  
lecture  
Nid d'abeille  
en carton plat



7

## MATIÈRE PHYSIQUE

Les évolutions contemporaines des sciences de la matière conduisent à un bouleversement des modes d'intelligibilité de ce qu'est un matériau. À partir de la connaissance fondamentale de particules élémentaires, de type granulaires ou fibreuses et plus encore de leurs transformations et comportements sous des formes combinatoires ou sous l'effet d'adjuvants, la matière en devenir de matériau offrent autant de pensables que de possibles maîtrisés. Ainsi la désignation générique d'un matériaux recouvrent plutôt un champ de propriétés, structurelles, physiques ou qualitatives. Riether Gernot présente les propriétés actives d'une surface en ETFE. Paul Acker revient sur l'histoire du béton et présente ce matériau comme une multiplicité dont les Befup ou bétons fibrés à ultra-haute performance représentent une forme idéale. Laetitia Fontaine et alii articulent connaissances fondamentales du matériau terre, des réactions physico-chimiques spécifiques aux morphologies singulières qui en découlent à partir de principes comme l'empilement ou la ségrégation granulaire ou les forces et cohésions capillaires par ajout d'eau. Suivant une logique de recherche et d'innovation, Laurent Arnaud et alii présentent les propriétés mécaniques et hygro-thermiques d'un béton de chanvre en fonction des variations densitométriques des particules de chanvre et des liants associés aux échantillons.

## MATIÈRE ET DONNÉE

Parallèlement à la connaissance accrue des matières et de leurs comportements, en particulier grâce à l'évolution des méthodes d'observation et d'analyse, les outils de modélisation offrent une puissance d'exploration et d'optimisation performentielle des matériaux. Isabelle Vervish-Fortuné et alii présentent ainsi l'analyse comparative à l'aide d'un outil logiciel de l'impact hygrothermique de réhabilitation de parois anciennes par des matériaux contemporains. Mathieu Rivalain et alii présentent un outil multicritère d'aide à la décision pour l'optimisation énergétique globale de bâtiments existants. Maria Kerkidou et alii présentent le développement d'une plateforme générique fondée sur l'émergence spatiale à partir de l'interaction d'agents dynamiques. Enfin, Maria Voyatzaki, assumant le tournant numérique de la discipline architecturale et du design computationnel, présente quatre modalités selon lesquelles la notion de matérialité peut être caractérisée.

## EXPÉRIMENTATIONS PROTOTYPES

À travers deux sessions, les formes problématiques, réflexives et épistémologiques du questionnement sur les matérialités contemporaines présentées ci-dessus prennent corps avec la réalisation pragmatique et concrète de prototypes réalisés à l'échelle 1. Les déterminations de ses réalisations relèvent à chaque fois d'une hybridation disciplinaire ou d'une convergence raisonnée de données sélectionnées et manipulées.

Ainsi Daniel Beysens et alii présentent une architecture de rosée, un prototype qui potentialise l'adéquation entre des caractéristiques environnementales et un potentiel morphologique au service d'une gestion écologique de l'eau. Vincent Monier et alii explorent un nouveau structuralisme par l'interaction d'outils de modélisation de morphologies non-standard et des propriétés du bois. Olivier Baverel et alii explorent le potentiel structurel des systèmes réciproques basés sur des éléments planaires, articulant ainsi géométrie avancée, structure et matérialité des dispositifs. Filippo Brogгинi et alii présentent la réalisation d'une passerelle en carbone, une innovation technologique basée sur la combinaison de déterminations matérielle, morphologique, productive et d'ambiance. Olivier Baverel et alii décrivent la réalisation d'une structure « gridschells » en droite ligne du champ de la géométrie structurale et des potentiels offerts par les outils de modélisation paramétriques. Enfin dans le même ordre de questionnement, Franck Besançon et alii présentent dans le cadre du développement d'une méthode de modélisation croisée l'articulation entre les modèles de conception, le modèle sémantique, le modèle analogique, géométrique, structurel et le modèle prototype.

Pour prolonger ces thématiques, Lawrence Sass présente ses travaux en matière de préfabrication numérique, caractéristique des transformations associées aux méthodes de fabrication dans le contexte des technologies numériques et des méthodes de personnalisation de masse. Branko Kolarevic considère le bâtiment dans sa dimension interactive et les matériaux comme étant une composante mouvante et dynamique. Yves Weinand présente les travaux et recherches conduits au sein du laboratoire IBois en poursuivant une approche pluridisciplinaire rassemblant architectes et ingénieurs. Les recherches s'intéressent au développement et à la mise en relation des logiciels dans la génération des formes complexes, dans le contrôle et le dimensionnement ainsi que pour la commande des machines à contrôle numérique.

De contrainte, le matériau est devenu un paramètre de conception, il appartient au champ extensible des possibles, il est une configuration singulière de variables et il s'inscrit à la fois dans le champ des sciences et techniques, des sciences de la nature, des sciences humaines, des arts et de la culture pour participer à la reformulation continue de la notion de matérialité.

## ATELIER

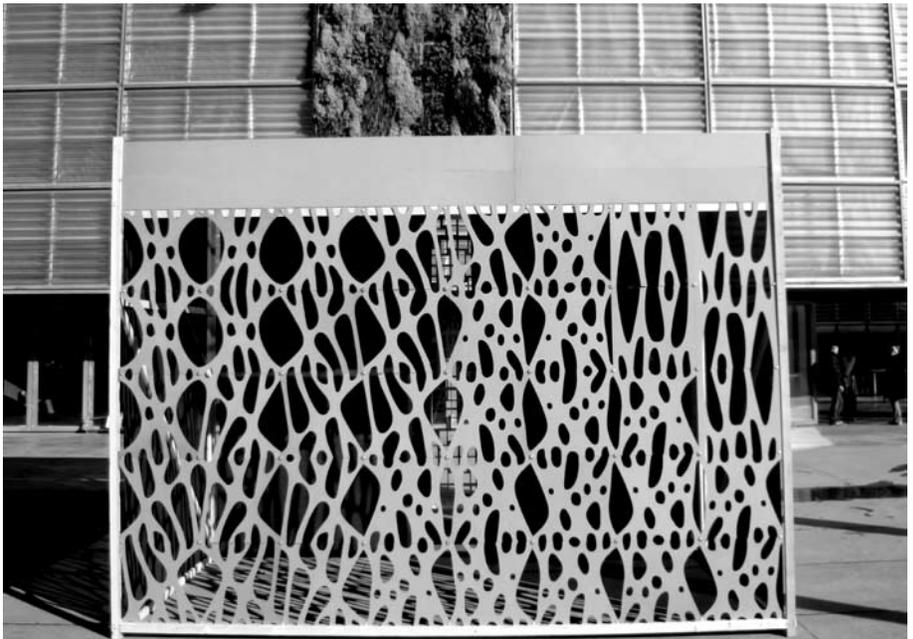
Le séminaire d'expérimentation associé à MC2012 porte sur une expérimentation des modalités de conception et de fabrication à l'aune de la 3<sup>ème</sup> révolution industrielle. Le concepteur inscrit ses propositions dans une économie de la variété, une logique de fabrication basée sur la personnalisation de masse. Les modalités de conception paramétrique et l'inscription de l'objet conçu dans un continuum par variation ouvrent la voie à une pensée de la multiplicité. Ici, le concepteur ne travaille plus à la définition d'une solution unique mais plus à une population de solutions. Le dispositif réalisé révèle une instance particulière d'un ensemble de possibilités en puissance d'actualisation. Ces principes reposent sur des modalités de fabrication numérique qui autorisent une individualisation du dispositif fabriqué et offrent l'opportunité de morphologies non-standard. Au cours de l'atelier ce sont à la fois les machines d'usinage à commande numérique, à découpe laser ou l'usage de bras robotisés qui permettront la mise en œuvre des dispositifs architecturaux conçus.

Figure 8  
Surface à  
luminance  
variable  
Tesselation  
tellurique  
Surface  
plissée.

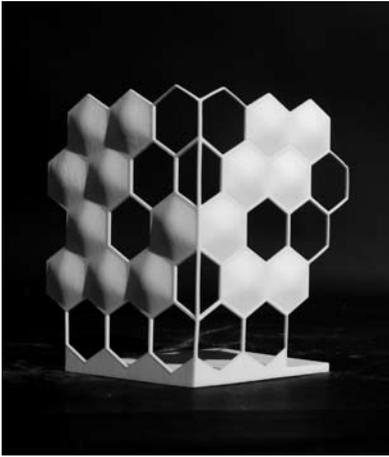


8

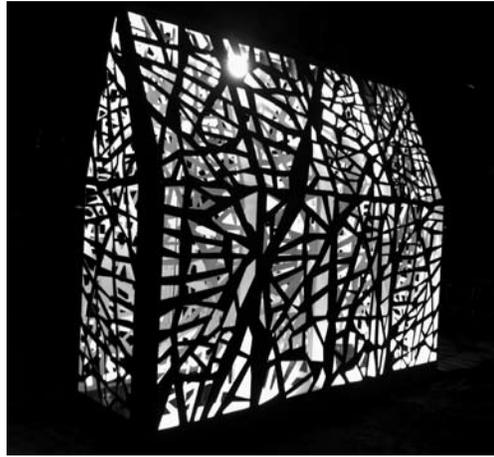
Figure 9  
Mur liquide,  
surface  
immersif,  
médium  
3 mm



9



10



11

Figure 10  
Maquette  
de façade.  
Maquette  
Impression 3D  
Frittage

Figure 11  
Canopée 3  
Iconique  
chapelle, Fête  
des lumière  
de Lyon  
Motif bio  
inspiré,  
cellulose vue  
au microscope.

Parallèlement, le développement des « matériaux intelligents » implique de nouvelles modalités d'interaction avec l'utilisateur. Ces dispositifs d'interaction, matériaux instrumentés de capteurs, d'actionneurs, de capacité de mémorisation et d'analyse, intègrent les notions de situations, d'information, de temporalité. Les objets inertes ont laissé la place à des systèmes, des dispositifs, des objets relationnels, des objets interfaces, des objets d'information et de communication, des objets ambiants. Ils représentent des conjonctions de situations, d'interaction et de représentation. Les modalités de conception, de fabrication et d'interaction sont expérimentées à travers la réalisation d'une installation lumineuse interactive.

## EXPOSITION

L'exposition associée à MC2012 présente 12 pièces inscrites dans le champ de l'architecture non-standard ainsi qu'un ensemble de maquettes. Elles représentent des quasi-objets ambiants, elles sont prototypes et micro-architectures illustrant des modalités de conception et de fabrication numériques au service d'une ergonomie d'usage.

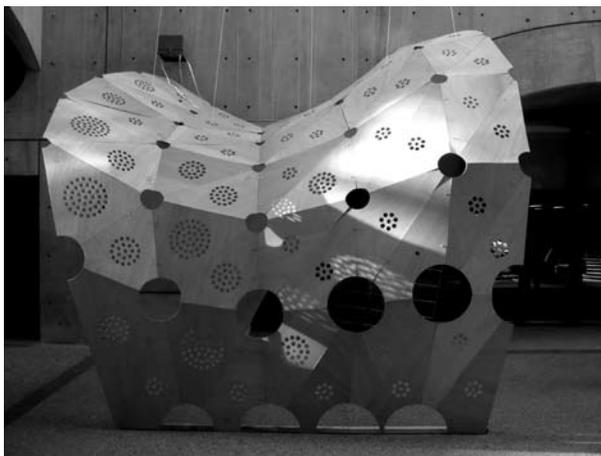
Ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'un enseignement partagé des ENSA de Grenoble et Lyon, programme Stratégie d'Eco-design Avancé sous la responsabilité de Philippe Liven eau et Philippe Marin et financé par la région Rhône Alpes, dans le cadre des installations pour la Fête des Lumières de Lyon, mais également de l'événement de clôture des cinquante ans du campus de Grenoble et dans le cadre d'un enseignement croisé entre architecte (Ensa de Grenoble) et Ingénieur (Grenoble INP Pagora, École Internationale du Papier de la Communication Imprimée et des Biomatériaux).

Ces travaux s'inscrivent dans le contexte des technologies de conception et de fabrication numérique. Le continuum conception-fabrication est questionné à travers une instrumentation et une expérimentation qui conduisent à la réalisation de maquettes en découpe laser, en impression 3D et de prototypes à l'échelle du corps en mouvement au moyen de l'utilisation du CNC 5 axes Rover A aux Grands Ateliers.

Les étudiants sont confrontés à la fois à un exercice de figuration et de modélisation d'un objet en conception mais aussi à sa matérialisation à travers l'utilisation des techniques de découpe numérique ou de prototypage rapide.

Le travail de conception repose ici sur la définition d'un processus de modélisation et

Figure 12  
Surface  
paramétrée par  
les conditions  
environnementales. Découpe  
numérique CP  
3mm.



12

d'un processus de fabrication. Le continuum conception-fabrication est au centre de nos préoccupations, les étudiants acquièrent des compétences à la fois dans l'instrumentation des outils émergents et dans l'appréhension du continuum cognitif associé.

La résolution de la question architecturale passe ici par le terrain de l'innovation et de l'expérimentation. Ainsi les proto-architectures réalisées s'inscrivent dans une exploration paramétrique d'une population de solutions dont celles retenues révèlent un instant significatif du processus de morphogénèse établi.

Les qualités ambiologiques en jeu reposent sur les questions de fabricabilité du dispositif et de résolution constructive, d'économie de matière et de prise en compte des paramètres environnementaux.

Les objets ambiants ainsi exposés sont les instances formalisées d'une conception continuée de morphologie dont l'horizon est une qualité perceptive, d'interaction usagère et sociale. Ils sont l'expression remarquable d'un optimum, l'actualisation d'une proto-forme devenue prototype par sélection et combinaison paramétrique des vecteurs et dimensions du projet. Ce processus de convergence et coalescence informé des datas opère l'inflexion du flux formel par lequel la forme des forces devient force d'une forme, une forme information, une forme ambiance. Des déterminants ambiants de la forme aux configurations et conformations de l'ambiance, ils construisent un événement, l'effervescence émotionnelle de leur actualisation à même l'expérience de chacun.

#### TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 Événement 50 ans du campus de Grenoble 2012 - Atelier Liven eau - Ensag, photographie ©jp-angei

Figure 2 Bianchi, Marin - Exposition 2010 - MA38 - Photographie ©JP Angei

Figure 3 Workshop SEDA - 2012 - ENSAG/ENSAL - Photographie ©M Janda

Figure 4 Workshop SEDA - 2012 - ENSAG/ENSAL - Photographie ©M Janda

Figure 5 Workshop (In)form - 2011 - ENSAL - Photographie ©Marin

Figure 5 Domaine Etude de Master SPAA - 2011 - ENSAL - Photographie ©Etudiant

Figure 6 Collaboration Architectes Ingénieurs 2012 - ENSAG - Grenoble INP pagora, Atelier Liveneau, photographie ©Liveneau

Figure 7 Collaboration Architectes Ingénieurs 2011- ENSAG - Grenoble INP pagora, Atelier Liveneau, photographie ©Liveneau

Figure 8 Couvent Sainte Cécile 2011 - Siege des édition Glénat - Exposition Peinture + Architecture Atelier Liveneau, photographie ©Liveneau

Figure 9 Workshop (in)form - 2011 - ENSAL - Photographie ©Marin

Figure 10 Domaine d'étude de Master Spa - 2011 - Photographie ©Etudiant

Figure 11 Lyon Fête des lumière - Atelier Liveneau, photographie ©Liveneau

Figure 12 Workshop (In)form - 2011 - ENSAL - Photographie ©Marin

CONFÉRENCES \_ CONFERENCES

# MATERIALIZING DESIGN

LAWRENCE SASS

Massachusetts Institute of Technology, MIT, Department of Architecture - USA

## INTRODUCTION

On the rise is research involving design production with computers and computer-controlled machines or CAD/CAM. It is an emerging area of professional investment and academic research within architecture that allows for rapid production of creative ideas. The Digital Design and Fabrication Group at MIT has developed a building production system centered on the delivery of personalized affordable buildings of all scales. It is believed that an industrialized method of building delivery, guided by computers will change the way people design buildings by removing process steps and waste from physical production. An industrialized method is opposition hand crafted methods currently used to produce all buildings from cabins to skyscrapers. A new industrialized building production system will allow designers to rapidly realize their visual and physical goals from three-dimensional CAD (computer-aided design) models. It will also support upcoming twenty first century concept of mass customized production of many structures of all types each instance customized for its purpose.

## DIGITAL AGE OF MAKING

Results of many years of research have rendered a computational system of production referred to as *materialization* (Sass/Oxman 2005<sup>1</sup>). It builds on decades of research in Greenberg's work in computer visualization for design<sup>2</sup>, Stiny's rule-based design systems with shapes<sup>3</sup> and Chen's work in computing techniques for layered manufacturing<sup>4</sup>. *Materialization* is a three-stage process of shape transformation from (a) an initial shape model to (b) CAD/CAM manufacturing and (c) assembly by hand or with robots (figure 1). We believe that it will be possible to produce any building style, shape, or size from the same three-stage *materialization* process. The key research question centers on how to *materialize* buildings as cost- and energy-effective forms. The contribution of this system is that it defines the mathematical relationship between the designer's CAD model and the physical building production - the critical step in going from computer-aided design to computer-aided manufacturing. This process will elevate building construction from a nineteenth-century hand-crafted production model to twenty-first-century *whole building delivery*. Such a precision industrialized building process, employing CAD/CAM technologies, is a necessary component of a green building economy.

<sup>1</sup> Sass, L., Oxman, R. (2005), Materializing design: The implications of rapid prototyping in digital design, in *Design Studies*, 27(3), pp. 325-355

<sup>2</sup> Cohen, M., Chen, S., Wallace, J., Greenberg, D. (1988), A progressive refinement approach to fast radiosity image generation, in *Computer Graphics*, 22(4), pp. 75-84

<sup>3</sup> Stiny, G. (1980), Introduction to shape and shape grammars, in *Environment and Planning B*, 7(3), pp. 343-351

<sup>4</sup> Chen, Y., Wang, S. (2008), Computer-aided product design with performance-tailored mesostructures, in *Computer-aided Design and Application*, 5(1-4), pp. 565-576

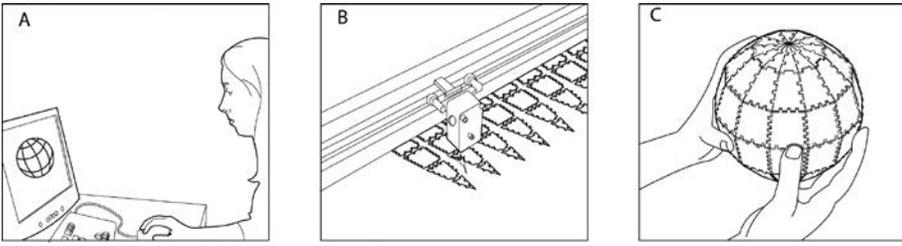


Figure 1  
Rapid production of a spherical shape materialized in CAD (a), manufactured by CAD/CAM (b) and assembled by hand (c).

1

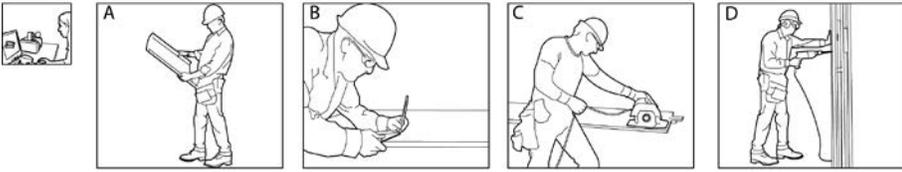


Figure 2  
Typical building production.

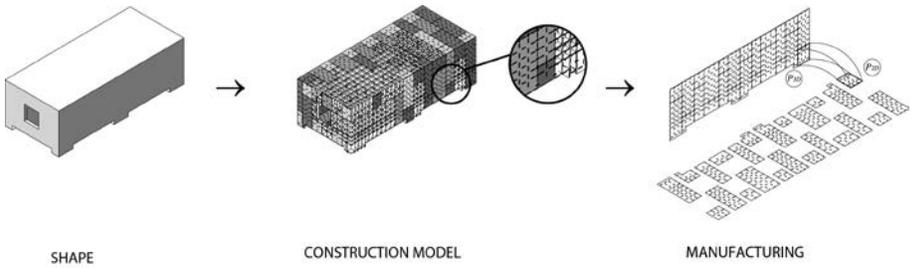
2

Creative design activity and solutions will be an everlasting characteristic of architectural production. However, professionals agree that levels of creativity are limited by the relationship between design representation and physical construction. In spite of the introduction of CAD drafting in the mid 1980s and the recent developments of *Building Information Modeling* (BIM), architects and contractors continue to use drawings printed on paper as the primary means by which to describe, measure, and control what is constructed. I have identified three core functions in physical production when using paper documents: manual measuring, low-precision manufacturing, and assembly of elements with power tools. The common steps in the production of a conventional artifact such as house require a construction worker interpreting the designer's intent and information from the drawing being manually transferred to a material substrate, which is hand cut (c), and then assembled with handheld tools (d). This is a low-precision process with unpredictable amounts of time required to measure and cut each element. Steps b (measuring), c (cutting), and d (assembly) are repeated hundreds of times throughout the construction process (figure 2). The interpretation process is not industrialized production. Each building is a non-repeatable, handcrafted artifact that cannot take advantage of any economy of scale. Such interpretation of drawings limits design creativity and results in conservative design proposals for projects with limited budgets.

**A COMPUTATIONAL SYSTEM FOR PHYSICAL PRODUCTION**

The phenomenological aspects of *materialization* through activity and observation are explored through computer modeling and programming followed by machine manufacturing. We developed the process to *materialize* a 3D model of a house (figure 3) in ways similar to the process used to *materialize* the sphere in figure 1. The first step is to capture geometric characteristics of the starting shape (a) for structural analysis and data storage. If the shape is structurally sound, the next step is structural contouring along the three axes (x, y & z); otherwise, a new shape is generated or edited for structural compliance. The resulting geometric model (b) is a finished collection of elements. The last function is the translation or development (c) of three-dimensional elements into two dimensions—a function commonly found in the field of descriptive geometry.

**Figure 3**  
 Shape model, formulation of a construction model generated as part of a series of calculated steps and the finished files for CAD/CAM Manufacturing



3

Developed elements and their attachment features are packed and sorted in two dimensions before CAD/CAM fabrication. Construction modeling of the type in figure 3b is complex, labor-intensive CAD modeling using keyboard entry of commands. In spite of the complexities in data production this method shows the potential of physically producing the entire building directly from a 3D CAD model.

### CONSTRAINTS WITH DIRECT MANUFACTURING

There are many reasons why design and construction industries have not developed a method for direct manufacturing from 3D CAD models. First, research exploration in the field has focused on design representation in CAD and less on industrialized building production with CAM. In the short span of two decades, design technologies for architects have evolved from CAD drafting, to solid modeling and now *Building Information Modeling* (BIM), which is an advanced form of CAD modeling. Each new design approach assumes ways to control labor via greater access to information. By contrast, the construction industry's methods of producing buildings and, in particular, homes have not changed in the past two centuries. With a few high-tech exceptions, most homes are built by hand of dimensional lumber—even those prefab homes built in factories. Industrialized production systems such as CAD/CAM are considered specialty manufacturing; they are not integrated into the construction industry. Note that the aerospace and automobile industries do not make the same assumptions about the control of labor. Production control is fixed into the manufacturing of each component by embedded assembly logic between parts. These industries manufacture the whole product directly from whole produce models in CAD and CAD/CAM without intermediate labor. Unfortunately there are few researched examples to support direct *whole building* manufacturing from a 3D CAD model with CAD/CAM manufacturing.

### WHOLE BUILDING MANUFACTURING

Materialization is progress toward the development of *whole building manufacturing* through the development of a rule-based system that guides the generation of building components in CAD. Via physical testing and manufacturing in lab sessions, we have uncovered new knowledge through rule application. The rules act as sets of decisions for systematic transformation of a 3D shape model into 2D patterns for controlled cutting. Best of all, the materialization allow for manufacturing of any shaped design. For example, my system can transform a 3D CAD model of a Queen Anne house,



Figure 4  
Laser cut  
model of  
a section  
through the  
corner of a  
building and  
its foundation.

4

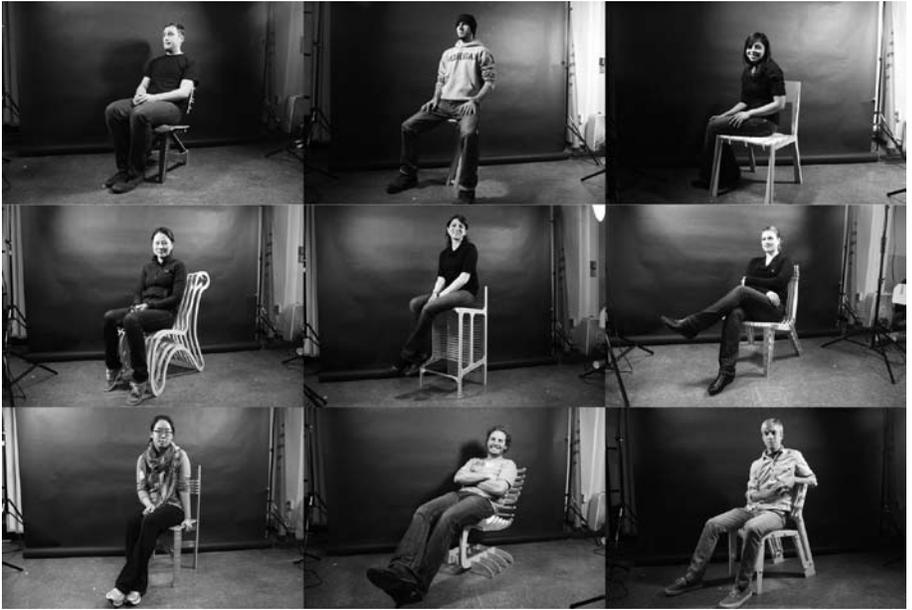
composed of cylindrical rooms and cone-shaped turrets, into 2D cutting patterns for CAD/CAM manufacturing from sheet material. After cutting, elements are recomposed of real material as a 3D assembly of parts. Physical precision is assured from an interlocking connection between each piece of geometry, ensuring direct design production. In the end, whole building manufacturing and assembly will be reliable because of systematic generation of manufacturing data. In other words, it will be possible to manufacture the entire building using CAD/CAM technologies.

The phenomenological aspects of *materialization* are challenged through physical production. For professional architects who create one-of-a-kind buildings as sculptural artifacts and complex geometrical installations with CAD/CAM machines, the process of considering high tech machinery to deliver designs is a new frontier. Design commissions completed by architects such as Frank Gehry, Greg Lynn, Bernhard Cache and Iwamoto/Scott are proof of the creative potential behind these new technologies. These architects represent their designs with advanced curved surfaces as well as solid and parametric modeling software, and then physically produce complex designs by CAD/CAM manufacturing. They employ a combination of sophisticated technologies to simplify areas of design complexity. As mentioned earlier, these architects fabricate a portion of the building using CAD/CAM technologies, but they have yet to solve the problem of direct manufacturing of the *whole building* from 3D CAD models.

## COMPUTING ASSEMBLED ARTIFACTS

*Materializing* design is a transformational approach to building design and construction that started as a decision to manufacture furniture-size architectural models from 3D CAD models and laser cutters. These are much like the architectural models built by hand in top design offices. The system requires creation of physically large models, just as architects have used since the Renaissance (figure 4). This practice is in opposition to the emerging phenomenon of architects manufacturing small models with rapid prototyping machines. We build large models because they allow for physical study of interior spaces - a design

Figure 5  
Digitally  
fabricated  
chairs in the  
Materializing  
Design course.



5

activity now explored through the use of computer visualization. They are ideal for real-world study of the exterior skin, structural behavior, and interior surfaces. Most importantly, *materializing* a design will serve to replace handmade model making that suffers from similar issues found in handcrafted building construction (figure 2).

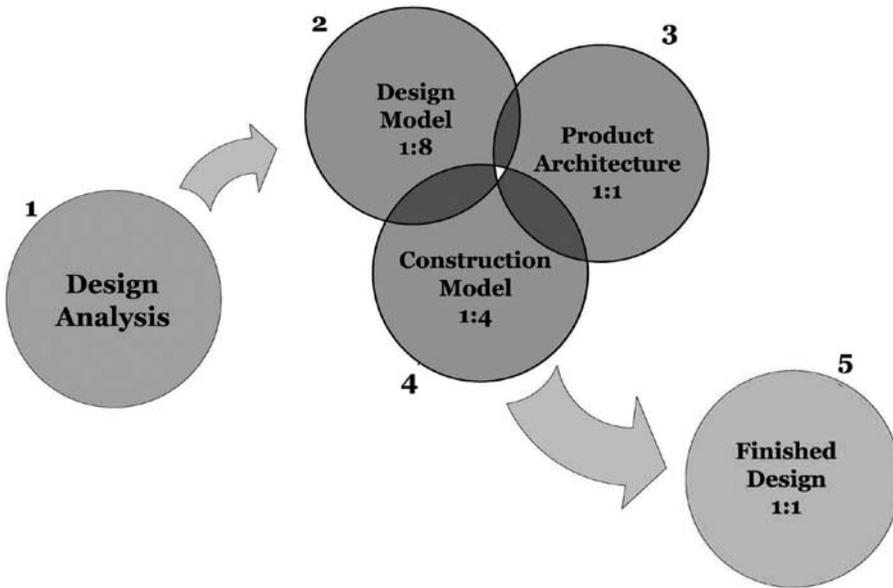
Pilot studies with design models manufactured on the laser cutter revealed three prime limitations. The first limitation is the size of the standard laser-cutter bed, which forces the manufacture of small parts; the machine will almost always be smaller than the artifact it is trying to build. Second, the parts need a mechanism for attachment. And third, all of the components, including any attachment features, must be modeled in 3D. This results in the production and assembly of a model composed of potentially thousands of 3D elements. These three limitations focused the program studies in the group. After many failed attempts at manufacturing models in a variety of materials and sizes with different machines, a consistent production system emerged. *Materializing* design is a production system that generates compliant geometries as 3D elements from any starting shape, manufactured within the limits of standard machines as components, each with multiple integrated assembly features. A major contribution of materialization is its potential for *whole building* production.

## COMPUTING FURNITURE

For the past five years graduate students in MIT's graduate course, *Materializing Design*, have participated in the production of many wonderful chair designs almost ready for prime time production. They generate and manufacture these products in less than five weeks with basic CAD software and access to three types of CAD/CAM machines.

The goal of the assignment is design and physical production of a chair ultimately manufactured with a computer-controlled machine. Once the final chair has been approved (the chair has to hold their weight) it can be authored and uploaded to a website such as Ponoko or Cloudfab for sale and distribution as a digital product (figure 5).

Figure 6  
Process  
diagram  
from analysis  
to finished  
product



6

Digital manufacturing is new for architects yet not so new in product design. The design and production process is a mixture of architectural question and product design processing virtually in CAD. Designs are questioned and problems are solved physically with many models small and large representing ideas at many scales (figure 6). First, students analyze drawings, photos and physical prototyping of chairs designed by well know architects and product designers. For example, one student in the course chose the Eames chair to begin his study. His analysis produced data on comfort, chair size, curves and lines and some styling. This operation is best performed through reconstruction of the chair in CAD and manufacturing as a 3D print one eight the size of the real chair [1]. Second, the student starts designing their chair by synthesis of their ideas about chairs and the design analysis. Design at this stage is a discussion between classmates, teaching staff and most importantly themselves. 3D prints of designs are manufactured of plaster and plastic also one-eight full scale. The goal is to study the chairs form. Next, we leap to from miniature to modeling components one to one of real materials, designing, manufacturing with the CNC machine and testing connections for ease of assembly, appearance and strength at full scale [3]. Design is finished off at one to four with the laser cutter and a greater understanding of real materials, machines and production methods discovered designing the products architecture (figure 7). Within the class we refer to these hand size artifacts as construction models [4].

The design is challenged by destroyed the model with hand pressure, dropping and shaking as a way to challenge structure and assembly. If successful the models are scaled from 1:4 to 1:1 and manufactured on a larger CNC machine of plywood and in some cases aluminum (figure 5) [5].

Figure 7  
Laser cut  
construction  
models 1:4  
full scale



7

Figure 8  
The Instant  
Cabin  
manufactured  
of plywood  
components,  
starting with  
design models  
(cut by laser  
cutter) to test  
for errors.  
Note the  
cardboard and  
thin-plywood  
models (a),  
assembly  
of the final  
structure in  
progress (b),  
and the final  
assembled  
example (c).



8

## COMPUTING A BUILDING SHAPE

### Computing a Cabin

The first pilot study was a small cabin built of plywood sheets that were fabricated directly from a *whole building model* and a single CAD/CAM machine (figure 8). This research project, sponsored by the Center for Bits and Atoms, is a demonstration of building-scale fabrication directly from desktop models. This project confirmed our ability to learn from layered manufacturing techniques (*rapid prototyping*) by producing a structure in layers along three axes (Sass 2006). The photos (figure 8) demonstrate the fabrication of three scales of physical production, all from the same 2D cutting patterns.

### Digitally Fabricated House for New Orleans

A second example is was an opportunity to build a working example from our *materializing* system at the Museum of Modern Art in New York City (figure 9). My proposal was one of just five projects selected from over 400 entries to be built at full scale for MoMA's 2008 Home Delivery exhibit. This project, entitled The Digitally Fabricated House for New Orleans, embodies next-generation prefabrication by moving beyond the idea of building prefab homes only in factories. The structure was designed and measured digitally, and it allowed us to challenge the productive aspects of the *materializing* system.

The challenge was to manufacture the structure off-site for assembly only on-site (i.e., no materials could be cut on-site). The structure was a large interlocking set of elements similar in structural patterning to the Instant Cabin; however, here we redesigned the elements in the construction kit and fabricated components with two computer-controlled machines. We optimized the four-stage system and discovered ways to automate some of the modeling process through computer programming. The project also provided an opportunity to design for a particular context-New Orleans. The design of a New Orleans shotgun house was my personal interest; design production was in the hands of students, as I provided a scaffold for them to attach their ideas and CAD models.



Figure 9  
 Assembly of CAD/CAM components (a), a scaled model laser cut using the same data as the data used for full-scale fabrication (b), the MoMA exhibit opening (c), progress photo during assembly of the roof panels (d), and CNC cutting of structural members (e).

9

The exhibit was publicized widely and has had a major impact on the field and my research path (Sass, 2009). The innovation in my research program has been physically challenging creative design with CAD modeling and CAD/CAM manufacturing. We derived the theoretical framework from a relationship between concepts found in shape grammars, to produce geometry, various concepts in integral attachment theory, and rapid prototyping. Unlike computer-based rendering or animation, physically based CAD modeling and fabrication provide deep understanding of behaviors in assembly, structural stability, and finished appearance. From these three research projects and others, one of our greatest discoveries has been that a *materialized* design scales well. *Materializing* design will transform building design and fabrication from a nineteenth-century craft to twenty-first century customized green product system of building production.

## REFERENCES

- Sass, L., Oxman, R. (2005), Materializing design: The implications of rapid prototyping in digital design, in *Design Studies*, 27(3), pp. 325-355
- Cohen, M., Chen, S., Wallace, J., Greenberg, D. (1988), A progressive refinement approach to fast radiosity image generation, in *Computer Graphics*, 22(4), pp. 75-84
- Stiny, G. (1980), Introduction to shape and shape grammars, in *Environment and Planning B*, 7(3), pp. 343-351
- Chen, Y., Wang, S. (2008), Computer-aided product design with performance-tailored mesostructures, in *Computer-aided Design and Application*, 5(1-4), pp. 565-576
- Sass, L. (2006), Physical design grammar: A production system for layered manufacturing machines, in *Automation in Construction*, 17(6), pp. 691-704
- Knight, T., Sass, L. (2009), Looks count: Computing and constructing visually expressive mass customized housing, *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing*
- Sass, L. (2009), A digitally fabricated house, *Automation in Construction*

# ARCHITECTURE OF CHANGE: BUILDING DYNAMICS AND KINETIC MATTER

KOLAREVIC BRANKO

University of Calgary

## FROM PSYCHOTROPIC TO EMOTIVE HOUSES

"The plastex swam and whirled like boiling toothpaste, then extruded itself into a small ledge. Stammers sat down on the lip, which quickly expanded to match the contours of his body, providing back and arm rests." -J.G. Ballard, *The Thousand Dreams of Stellavista*

James Graham Ballard, the British novelist, describes in his short story "The Thousand Dreams of Stellavista" (1962), a "psychotropic house," a machine-like, mood-sensitive house that responds to and learns from its occupants. The imagined sci-fi house is made from a material Ballard referred to as "plastex," a combination of plaster and latex that allows the house to change its shape as needed. Furthermore, the house features, distributed over it, many "senso-cells," which are capable of "echoing every shift of mood and position of its occupants, such that living in one was like inhabiting someone else's brain."

While Ballard's "psychotropic house" belongs to science fiction, the "E-motive House" by Kas Oosterhuis (2002) edges closer to contemporary technological and material reality. Oosterhuis describes a responsive, interactive house that can develop its own emotions, "a house with a character of its own, sometimes unyielding, sometimes flexible, at one time sexy, at another unpredictable, stiff and unfeeling." The goal is to create an "emotional relationship between the house, its occupiers and the elements." The E-motive House can be a "reactor" as well as an "actor," where the "acting will be made possible by a cooperative swarm of actuators like pneumatic beams, contracting muscles and hydraulic cylinders." The house is also capable of reacting: "The movement of the users and the changes in the weather are registered by a diversity of sensors, and are translated by the brain of the house into an action." In 2003, Oosterhuis and his Hyperbody research group designed and constructed the *Muscle*, a working prototype of a programmable building that can reconfigure itself "mentally and physically." The *Muscle* is a pressurized soft volume, wrapped in a mesh of tensile Festo "muscles," which can change their own length and, thus, the overall shape of the prototype. The public connects to the prototype by sensors and quickly learns how the *Muscle* reacts to their actions; the *Muscle*, however, is programmed to have a will of its own, making the outcomes of interactions unpredictable. The ultimate goal of the project is to "develop an individual character for the *Muscle*." The *Muscle* has demonstrated that the E-motive House is not so techno-utopian - and that Ballard's "psychotropic" house could perhaps become a reality of our inhabitation in the future.

## TOWARDS ARCHITECTURE THAT IS ADAPTIVE, FLEXIBLE, INTERACTIVE, RESPONSIVE...

A common thread that runs through Ballard's "psychotropic house" and Oosterhuis's E-motive - House is a vision of an architecture in which buildings can change their shape, their form, the configuration and appearance of space, and environmental conditions - on the fly - in response to patterns of occupation and contextual conditions (and shape those, in return, too). Buildings will become adaptive, interactive, reflexive, responsive...

The first concepts of an adaptive, responsive architecture were born in the late 1960s and early 1970s, primarily as a result of parallel developments in cybernetics, artificial intelligence, and information technologies, in general, and as a response to architecture's rigid, inflexible articulation of space and its configuration. Cedric Price was the first to adopt concepts from cybernetics and use them to articulate a concept of "anticipatory architecture," manifested in his *Fun Palace* and *Generator* projects. Nicholas Negroponte was among the first to propose in the late 1960s that computing power be integrated into buildings so that they could perform better. In his book *Soft Architecture Machines* (1975), he moved beyond the "architecture machines" that would help architects design buildings and proposed that buildings could be "'assisted,' 'augmented,' and eventually 'replicated' by a computer." The ambition was to "consider the physical environment as an evolving mechanism." In the last chapter, he made a prediction that "architecture machines" (in the distant future) "won't help us design; instead, we will live in them," echoing the sci-fi "psychotropic houses" of J.G. Ballard. At roughly the same time that Negroponte was working on his "architecture machines," Charles Eastman (1972) developed the concept of "adaptive-conditional architecture," which self-adjusts based on the feedback from the spaces and users. Eastman proposed that automated systems could control buildings' responses. He used an analogy of a thermostat to describe the essential components: sensors that would register changes in the environment, control mechanisms (or algorithms) that would interpret sensor readings, actuators as devices that would produce changes in the environment, and a device (an interface) that would let users enter their preferences. That is roughly the component makeup of any reactive system developed to date.

Jean Nouvel's *Institut du Monde Arabe*, completed in 1989 in Paris, was the first significant, large-scale building to have an adaptive envelope. The building's kinetic curtain wall is a technological interpretation in glass and steel of a traditional Arab *mashrabiya* lattice screen. It is composed of some 30,000 photosensitive diaphragms that control light levels and transparency in response to the sun's location (the system no longer works due to mechanical problems). Hoberman Associates ([www.hoberman.com](http://www.hoberman.com)) is a leading contemporary practice that has designed several kinetic, performance-based adaptive shading systems for building projects by firms such as Foster and Partners and Nikken Sekkei. Chuck Hoberman and Craig Schwitter (from Buro Happold) launched the Adaptive Building Initiative ([www.adaptivebuildings.com](http://www.adaptivebuildings.com)), which is "dedicated to designing a new generation of buildings that optimize their configuration in real time by responding to environmental changes." Their joint effort is focused presently on designing environmentally responsible building facades. Chuck Hoberman has developed several innovative adaptive façade systems in collaboration with Zahner Metals from Kansas City: *Tesselate* consists of stacked, perforated panels that move slightly relative to each other and thus create patterns of varying density, i.e. opacity, regulating light and solar gain, ventilation and air flow, privacy and views; *Strata* adaptive shading system consists of modular units of telescopic fins that retract into a single slender profile; when expanded, units extend to form a nearly continuous surface. Currently, more and more designers and firms are beginning to experiment with innovative sensing, control, and actuation technologies to create kinetic, adaptive performance-based systems. The goal is to "shape change", as expressed by Chuck Hoberman.

When it comes to designing adaptive, responsive environments, there are currently four main types of actuation systems that are being used: motor-based (or mechanical), hydraulic, pneumatic and material based ones. The main problem in designing and operating adaptive systems based on mechanical actuation is *friction* and the need for continuous periodic maintenance, which, depending on the design and the climactic conditions, could range from daily to monthly. Without regular (and frequent) maintenance – which could be costly – all motor-based, mechanically actuated systems would eventually fail.

Instead of using mechanical activation, Enric Ruiz Geli of Cloud9 ([www.ruiz-geli.com](http://www.ruiz-geli.com)) deployed patterned tri-layered ETFE air-cushions to create a pneumatic sun shading skin at the *media-TIC* building in Barcelona; while the first layer of ETFE is transparent, the second and third layers have a reverse pattern that creates shade when inflated and joined together. On the west-facing façade, nitrogen (mixed with oil) is introduced into the ETFE pressurized cushions which creates a “fog” that provides for variable shading that could reduce substantially the solar heat gain.

Particularly interesting are material-based actuation systems that use the so-called “smart” or “designed” materials which can change their shape or volume when subjected to external stimuli, such as the shape-memory alloys (SMA) and shape-memory polymers (SMP). For example, the SMA “muscle” wire contracts when electricity is applied, due to molecular restructuring resulting from heating. Two commercially available muscle-wire products called *Nitinol* and *Flexynol* have been used widely in many experimental small-scale prototypes in architectural research. Several problems, however, emerge in scaling up such prototypes to the sizes typically encountered in architecture. Most commercially available SMA materials come in diameters measured in micro-millimeters and are expensive at even such small sizes. Even if a centimeter-thick SMA wire were to exist, it would be very expensive per linear centimeter; its actuation would require a powerful electrical current that would bring a host of new problems to its operation. The issues of full-scale implementation are further compounded by the simple fact that materials behave differently at different scales.

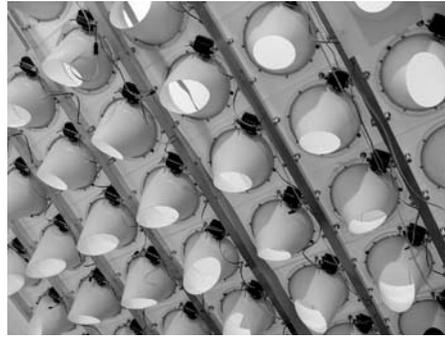
The fact that friction presents an inescapable problem in all mechanically-activated systems and that the issue of scale (and cost) renders most material-based actuation systems as currently inapplicable at architectural scales has forced a number of designers to look into *hybrid* systems that combine mechanical, hydraulic, pneumatic and material-based actuation in creative ways. For example, in his remarkable *Hylozoic Ground* installation at the 2010 Venice Biennale ([www.hylozoicground.com/Venice](http://www.hylozoicground.com/Venice)), Phillip Beesley amplifies the change in length of the Flexinol wire with the use of levers to produce fairly rapid, clearly discernible motion. In the near future, most full-scale implementations of adaptive systems are likely to employ hybrid mechanic and pneumatic actuation, with limited use of material-based actuators. A shift from mechanical to “organic”, biologically-inspired paradigms of kinetic actuation, however, is already taking place and is likely to attain greater traction with the design research community as new advances are made in adaptive building materials.

## **CALGARY EXPERIMENTS**

In our research group, Laboratory for Integrative Design (LID), at the University of Calgary, we have several ongoing research projects focused on the adaptive, responsive system in architecture. The *iConic* performative skin (figures 1 and 2), designed by Matthew Knapik, is a prototype building facade system comprised of mechanized, electronically controlled truncated cones. Simple conic modules rotate independently, altering the orientation of their elliptical apertures to produce a series of performative effects. Beyond their functional capacity as dynamic sun shades (or scoops), the cones offer the ability to curate outward



1



2

Figure 1-2  
iConic  
performative  
skin, designed  
by Matthew  
Knapik,  
University  
of Calgary.

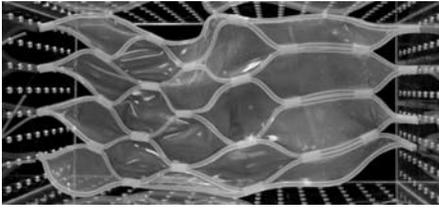
views, and produce urban-scale performances across the exterior field. In its urban-scale presence, the system has the capacity to produce highly ordered patterns, raster imaging, and a random motion routine that creates a constantly changing building skin.

While there were a number of issues related to mechatronics that had to be resolved during iConic's design and production, an insurmountable obstacle was the friction, as expected. The rotating, truncated-cone units initially worked smoothly, but soon the entire prototype was producing a cacophony of squealing, squeaking sounds. A variety of fixes were attempted, but none worked. There was a considerable wear and tear in the units' rotating components, and so after several replacements of the parts, we finally had to turn off the entire system. The issues associated with the geometry, production, actuation, and the custom electronics and software we had to develop were all successfully resolved, but we had no effective solution for the problem of friction. This was not a surprise: we knew all along that friction would be an issue, but didn't expect that it would become such a pronounced problem so quickly.

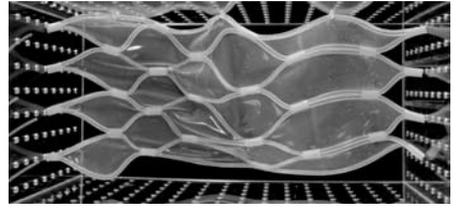
The "*Soft*" Kinetic Network (SKiN) project (figures 3 and 4), designed by Vera Parlac, consists of small scale prototypes of an adaptive kinetic material system designed as integrated layers that make up a "tissue" capable of accommodating dynamic change. The SKiN surface is organized around the network of "muscle" wires that change shape under electric current; the wires were incased in silicon tubes, which were then embedded into a layer of cast silicon rubber. The network of SMA wires provides for a range of motions and facilitates surface transformations through soft and muscle like movement. The layered material system developed around the wire network is variable and changes its thickness, stiffness, or permeability within its continuous composite structure. The variability in the material system enables it to behave differently within surface regions, vary the speed and degree of movement, change surface transparency, and enable other levels of performance such as capture of heat produced by the muscle wire and distribution of heat within the surface regions. One of the key ideas is that variability of the material system can bring us closer to the seamless material integration found in biological organisms.

The focus on seamless material integration and capture of emitted energy hints at a broader goal of creating a more productive relationship between architecture and the larger ecologies in which it participates. One possible application of the SKiN is to provide a heated surface/street furniture/structure that is capable of mediating environmental conditions in cold climates in order to make outdoor public spaces active year-round (figure 5). The SKiN Surface would have the capacity to register weather conditions as well as the number of people nearby and adjust accordingly; energy used by the surface

Figure 3-4  
"Soft" Kinetic  
Network  
(SKiN) surface  
prototypes,  
designed by  
Vera Parlac,  
University  
of Calgary.



3



4

Figure 5  
SKiN Surface  
envisioned as  
a mediator of  
environmental  
conditions in  
cold climates.



5

structure to adjust its shape would be transferred into heat and stored in liquid heat "sinks" which would mediate the temperature around/on/below the surface.

The fundamental challenge in the *SKiN* project is scaling it up using materials and technologies available today. As discussed previously, the SMA muscle wire has no full (architectural) scale equivalent, meaning that something similar to pneumatic *Festo* actuators (used by Kas Oosterhuis in his 2003 "Muscle" project) would have to be used. Another challenge would be to find a stretchable, sufficiently thick material similar in behavior to silicon rubber used in the prototypes. In addition to these purely material challenges, there is also the issue of accurately modeling, simulating, and controlling the network action of hundreds of embedded pneumatic actuators.

## TOWARDS ARCHITECTURE OF CHANGE

"Accepting the dynamics of buildings and cities... can turn architectural change into an ecologically efficient process as well as a new urban experience."  
Ed van Hinte, et al., *Smart Architecture*

The quest for an architecture of change is a reflection of the context in which we live and work. An ever-increasing pace of change is what defines contemporary life: socio-economic, political, cultural, and, in particular, technological context are constantly shifting, altering the norms, customs, and expectations and affecting how we use and

relate to space. A rapidly changing socio-economic, cultural, and technological environment demands buildings that can adapt quickly.

The primary goal of constructing a truly responsive, adaptive architecture is to imbue buildings with the capacity to interact with the environment and their users. Architecture that echoes the work of Nicholas Negroponte could be understood as an adaptive, responsive machine - a sensory, actuated, performative assemblage of spatial and technical systems that creates an environment that stimulates and is, in turn, stimulated by users' interactions and their behavior.

It is rather obvious that responsive, adaptive, flexible, interactive architectures are all about change, which in turn, is all about time. The change - and time - in architecture, however, are far from being adequately addressed or explored theoretically, experimentally, or phenomenologically. There are fundamental questions that have yet to be adequately addressed. The kind of changes we should seek out in the buildings (over time) need to be explored and the ends we seek with those changes need to be fully articulated. Changes can occur at different scales (component/interior and exterior surface or volume) and different speeds (minutes/hours/days/seasons/years), and they affect us differently. How buildings adapt and how they respond to change depends obviously on the nature of change, i.e., on the context in which the change occurs (programmatic use, building systems, weathering, etc). With that in mind, we need to determine which changes are useful, which ones are necessary, and which ones are meaningful. This brief list of questions is far from being exhaustive.

There are several scholarly and research texts completed recently that provide useful references for researchers interested in the thematic richness of adaptive, responsive architecture. In *Responsive Architecture* (2006), Phillip Beesley and his colleagues predict that "the next generation of architecture will be able to sense, change and transform itself," but they fail to say clearly towards what ends. Even though they ask what very well may be the key question - how do responsive systems affect us? - they do not attempt to answer it explicitly. Similarly, Michael Fox and Miles Kemp, in their *Interactive Architecture* book (2009), avoid explaining fully - and admit as much - why interactive systems are necessary, meaningful, or useful, and simply state, "the motivation to make these systems is found in the desire to create spaces and objects that can meet changing needs with respect to evolving individual, social, and environmental demands." Fox and Kemp position interactive architecture "as a transitional phenomenon with respect to a movement from a mechanical paradigm to a biological paradigm," which, as they explain, "requires not just pragmatic and performance-based technological understandings, but awareness of aesthetic, conceptual and philosophical issues relating to humans and the global environment." In *Flexible: Architecture that Responds to Change* (2007), Robert Kronenburg argues that for a building to be "flexible," it must be capable of (1) adaptation, as a way to better respond to various functions, uses, and requirements; (2) transformation, defined as alterations of the shape, volume, form, or appearance; (3) movability; and (4) interaction, which applies to both the inside and the outside of a building. Such capacities in buildings will be provided by "intelligent" building systems, which will be driven by many factors, from environmental ones, such as the control of energy use, to changing the appearance of the building through varying images and patterns. The systems could be either automatic or "intuitive," suggesting a capacity of the system to infer from the context an appropriate set of responses without overly explicit inputs.

If we are to accept change as a fundamental contextual condition - and time as an essential design dimension - architecture could then begin to truly mediate between the built environment and the people who occupy it. As Ed van Hinte and his colleagues note in *Smart Architecture* (2003), "instead of being merely the producer of a unique three-dimensional product, architects should see themselves as programmers of a process

of spatial change." The principal task for architects is to create "a field of change and modification" that would generate possibilities instead of fixed conditions. The inhabitable space would then become an indeterminate design environment, subject to continuous processes of change, occurring in different realms and at various time scales:

It is the form that is no longer stable, that is ready to accept change. Its temporary state is determined by the circumstances of the moment on the basis of an activated process and in-built intelligence and potential for change. Not product architecture then, but a process-based architecture whose form is defined by its users' dynamic behaviour and changing demands and by the changing external and internal conditions; an architecture that itself has the characteristics of an ecological system, that emulates nature instead of protecting it and therefore engages in an enduring fusion of nature and culture.

As Ed van Hinte and his colleagues point out, "that would be a truly ground-breaking ecological architecture."

#### **ACKNOWLEDGMENTS**

This paper is based on the "Exploring Architecture of Change" paper written by the author and published in *reForm()*, Proceedings of the 2009 Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA), edited by Tristan Sterk and Russell Loveridge. Matthew Knapik, Eric and Mike Kryski were the members of the design team for the iConic project. Vera Parlac led the team that completed the SKiN project, with contributions from Richard Cotter, Todd Freeborn and Adam Onulov. Both projects were made possible through funding from the University of Calgary.

#### **REFERENCES**

- Ballard J. G., (2001), *The Thousand Dreams of Stellavista*, in *Vermilion Sands*, London, Vintage, originally published in 1971
- Beesley P, Hirose S, Ruxton J., Trankle M., Turner C. (2006), *Responsive Architectures: Subtle Technologies*, Riverside Architectural Press
- Eastman C., (1972), *Adaptive-Conditional Architecture*, in N. Cross, ed., *Design Participation*, Proceedings of the Design Research Society Conference, London, Academy Editions, pp. 51-57
- Fox M., Kemp M. (2009), *Interactive Architecture*, New York, Princeton Architectural Press
- Van Hinte Ed., Neelen M., Vink J., Vollaard P. (2003), *Smart Architecture*, Amsterdam, 010 Publishers
- Kronenburg R. (2007), *Flexible: Architecture that Responds to Change*, Laurence King
- Negroponte N. (1975), *Soft Architecture Machines*, Cambridge, MA: MIT Press



# RECHERCHE ET ENSEIGNEMENT À L'IBOIS

YVES WEINAND

Laboratoire IBOIS, EPFL - Suisse

L'IBOIS est le laboratoire de construction en bois de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Depuis 2004, ses activités sont consacrées au développement des structures en bois, qui sont en même temps innovatrices et fabricable dans une manière économique. Pour ce faire, on poursuit une approche interdisciplinaire qui remet en question la relation entre science de l'ingénierie et conception architecturale. Tout en cherchant une collaboration plus proche entre architectes et ingénieurs, on vise également l'échange avec des mathématiciens et des informaticiens.

Cela est particulièrement important pour la solution des problèmes liés à la géométrie et la production. Le développement d'outils informatiques spécifiques et spécialisés apparaît toujours plus nécessaire: nos recherches s'intéressent au développement et à la mise en relation des logiciels qui agissent à divers niveaux, de la génération des formes complexes au contrôle et dimensionnement des éléments finis, mais aussi pour la commande des machines à contrôle numérique.

La connotation du bois comme "matériau traditionnel" représente un avantage pour légitimer socialement les recherches plus avancées sur les formes complexes et les surfaces libres. S'intéresser aux géométries complexes à partir d'un point de vue de la "construction" (en bois) et non seulement de la seule morphogenèse peut signifier affirmer une distance critique face aux seuls phénomènes de "mode stylistique" de la "blob architecture". De nombreux bâtiments récents issus de la mode formaliste de la "blob architecture" démontrent une totale ignorance des problèmes du développement durable, soit en raison du choix des matériaux de construction, soit à cause de l'extrême difficulté de leur maintenance énergétique et des hauts coûts de manutention. La construction en bois a sûrement un grand futur face aux défis planétaires du développement durable. Les avantages sont connus au niveau de la faible consommation d'énergie pour la production des composants de construction (planches, panneaux, poutres, etc.), et la recherche sur le bois soudé pourrait à ce titre avoir des débouchés industriels extrêmement intéressants. Les gains de temps et de consommation d'énergie sont aussi évidents pour les processus de montage et démontage des structures en bois. Mais les défis du développement durable concernent également la question de la forme architecturale. Comment inscrire un processus d'innovation formelle et technologique dans une perspective de longue durée ?

Renouveler les techniques constructives et les répertoires formels liés à l'utilisation du bois et affirmer les valeurs "traditionnelles" de la construction en bois peut contribuer à favoriser une expansion de l'utilisation du matériau dans la construction contemporaine. Il s'agit, encore et toujours, d'affirmer les principes de "longue durée" à la base de l'idée même de la modernité : "moderne est ce qui dure". Ceci s'inscrivant dans la politique des

écoles polytechniques suisses, renommées par tradition sur le plan international pour l'enseignement de la construction.

L'IBOIS est également engagé dans l'enseignement. Les deux activités sont intimement liées. Par conséquent, l'approche interdisciplinaire se retrouve aussi dans l'enseignement. Solidement ancré dans l'Institut d'ingénierie civile, l'IBOIS, et plus spécifiquement l'atelier Weinand, sont ouverts à la section d'architecture puisqu'un atelier d'architecture est inscrit au plan d'études au niveau du master. La coopération visée entre architectes et ingénieurs constitue une occasion de créer une "communauté scientifique" élargie pour les disciplines du projet dans le panorama des écoles d'architecture européennes. Cette approche met en œuvre le leitmotiv de la faculté ENAC : « projeter ensemble ».

L'objectif du cours est de sensibiliser les architectes et ingénieurs civils à comprendre, assimiler, concevoir et dimensionner des constructions en bois innovantes et intéressantes d'un point de vue architectural et structurel. Il s'agit de comprendre le bois en tant que matériau contemporain s'inscrivant dans une technologie contemporaine.

L'objectif du semestre d'été est d'approfondir les connaissances techniques à travers l'étude d'exemples construits et les recherches actuellement en cours à l'IBOIS.

Le cours dispense quelques éléments théoriques venant en complément au cours de constructions en bois I: le traitement et la protection du bois, la protection incendie, l'acoustique, les aspects énergétiques.

Parallèlement, à travers des exercices, les étudiants continuent à réfléchir à des problèmes relatifs au matériau bois : comprendre, dessiner et analyser le fonctionnement d'un assemblage traditionnel japonais, préparer une découpe automatisée, dessiner et calculer un pont en bois existant, dessiner et calculer des structures complexes en bois actuellement en cours de recherche à l'IBOIS. En somme tous des problèmes permettant d'analyser et de façonner le bois pour nos constructions contemporaines.

L'objectif pédagogique de l'atelier est l'intégration de contraintes structurelles dans la conception architecturale. Les notions d'architecture et de structure sont intimement liées. Des ingénieurs seront intégrés dans le processus de mise au point de la forme et de la géométrie du projet. L'objectif de cette intégration est l'enclenchement de processus inventifs (en complément aux processus créatifs) lors de la mise au point d'une forme et/ou d'une géométrie en faisant subir à ces formes la critique de l'ingénieur civil. Par le dialogue avec les ingénieurs, les architectes seront amenés à réfléchir simultanément à la forme et sa construction. Le moyen de communication privilégié de ce dialogue sera la maquette. Que ce soit au niveau de la forme générale, du principe constructif ou du détail, la maquette sera le point de cristallisation du processus inventif.

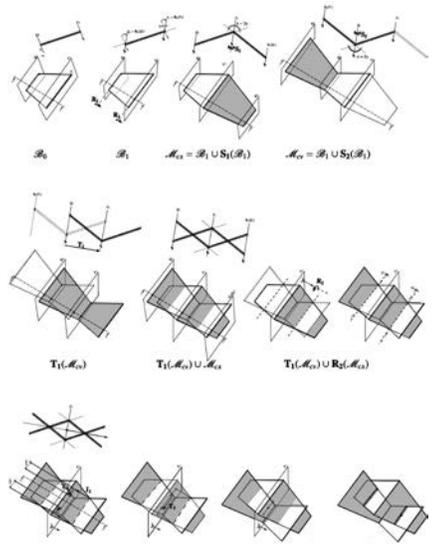
L'impact de cette approche est illustré à l'aide d'un projet de recherche et de plusieurs projets d'étude exemplaires. Le premier exemple est un projet pour une salle de fête, conçu par l'étudiant Bastien Thorel. Il propose une structure en voûte formée par des panneaux de bois imbriqués. Seuls deux panneaux différents créent la structure qui remplit également les rôles de couverture et d'enveloppe du bâtiment. La disposition de ces panneaux dans l'espace génère une texture légère et lumineuse, apportant une dimension poétique et particulièrement adaptée à cette salle de fête. Pour vérifier sa réalisabilité et afin d'identifier des points structurellement faibles, le projet était construit sur le campus de l'EPFL à l'échelle d'un pavillon. En parallèle, une série d'études géométriques et mécaniques étaient effectuées par Sina Nabaei, ingénieur et doctorant à l'IBOIS. Basé sur les résultats de ces études, différentes propositions de joints alternatifs ont été développés (voir images 1 - 4).

**Figure 1**  
 Prototype  
 d'une  
 construction  
 voûtée sur le  
 campus de  
 l'EPFL  
 Photo  
 ©Alain Herzog



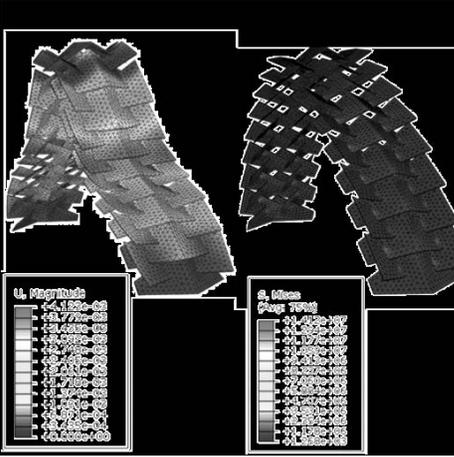
**Figure 2**  
 Analyse  
 géométrique  
 et para-  
 métrisation  
 du module de  
 base.

1



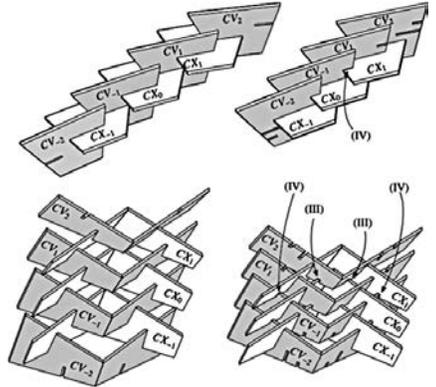
2

**Figure 3**  
 Simulation des  
 déformations  
 et sollicitation  
 des éléments  
 rendus par  
 un logiciel  
 d'éléments  
 finis.

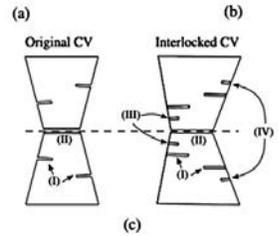


3

**Figure 4**  
 Comparaison  
 des variantes  
 de connexion  
 pour  
 développement  
 ultérieur.



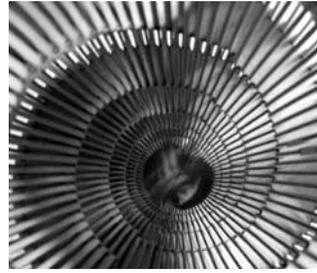
(III): Internal supplementary U-joint typology  
 (IV): External supplementary U-joint typology



4



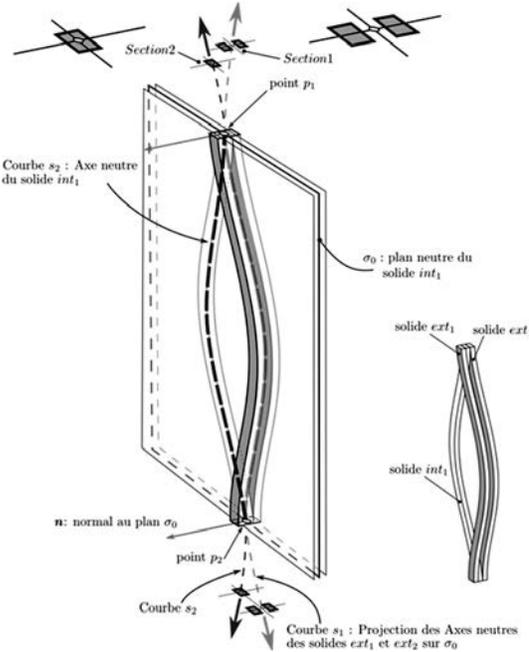
5



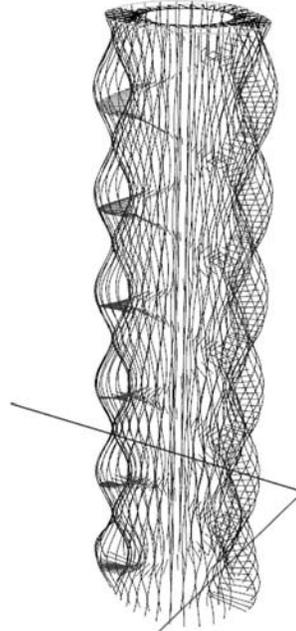
6

Figure 5  
Image de présentation de la tour sur le site du festival.

Figure 6  
Vue intérieure de la tour.



7



8

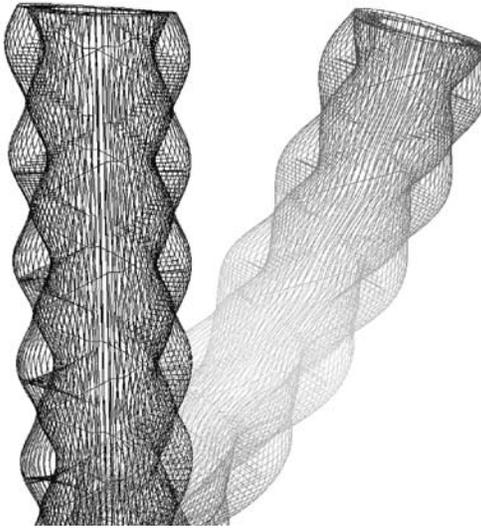
Figure 7  
Analyse géométrique du module de base.

Figure 8  
Modèle digital de la géométrie de base de la tour.

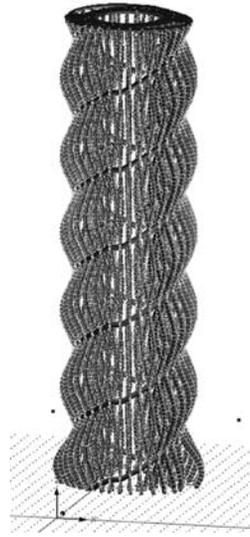
Un autre exemple est un projet pour une tour d'observation, conçu par l'étudiant Steve Cherpillod. La particularité de ce projet est la proposition de construire une tour à partir d'un seul élément. Ce seul et unique élément préfabriqué en bois lamellé et pré courbé permet par sa démultiplication de créer une forme globale d'une grande élégance. L'écartement entre ces pièces apparaît d'autant plus naturel ou toutes ces pièces sont posées de façon exclusivement jointive. Par la suite, l'intégration de l'escalier dans l'épaisseur même de la paroi porteuse est particulièrement réussie. Le résultat final est une tour d'une grande force et simplicité. Grâce à l'intervention des étudiants en génie civil, on a pu simuler la déformation de la structure sous charge du vent. Par la suite, des stratégies ont été développées pour renforcer la tour au niveau des détails de connexion. (voire images 5 - 11).

Ces exemples montrent que la prise en considération simultanée des aspects architecturaux et structuraux a le potentiel d'aboutir à des projets de qualité. Cette approche permet de faire comprendre aux étudiants les relations entre structure, construction, forme et espace. L'intégration préalable de contraintes constructives et structurelles rend ces projets réalisables.

**Figure 9**  
Représentation  
des  
déformations  
de la tour  
(hors échelle)



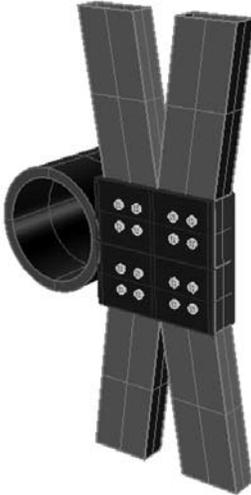
**Figure 10**  
Modèle  
digital de la  
tour incluant  
un renfort  
en forme  
hélicoïdale.



9

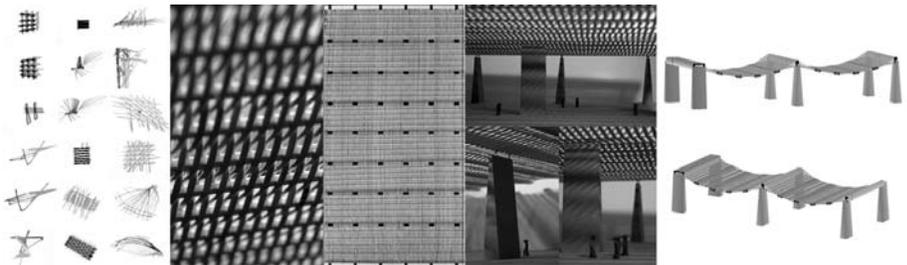
10

**Figure 11**  
Une  
possibilité de  
renforcement  
est l'intégration  
d'un tube  
en forme  
hélicoïdale qui  
suit l'escalier.

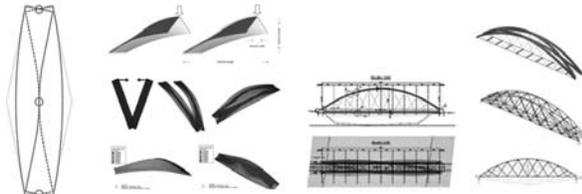


11

**Figure 12**  
Projet pour  
un marché de  
poissons à  
Tokio, conçu  
par Sophie  
Carpentieri.

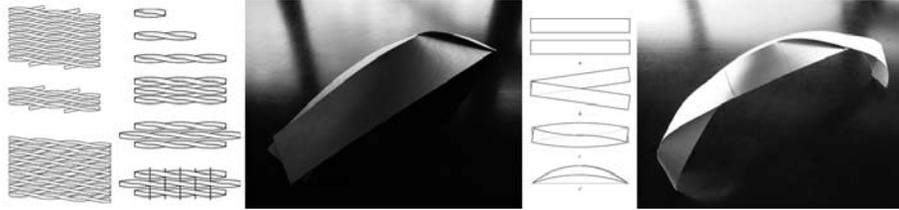


12



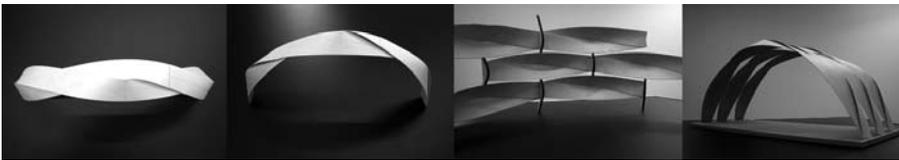
**Figure 13**  
Application potentielle d'une structure Timberfabric en pont suspendu.

13



**Figure 14**  
Basé sur le « Timberfabric Module », une grande variété des structures peut être conçue.

14



**Figure 15**  
La connexion longitudinale et transversale des éléments est crucial pour le développement du projet.

15

**PENSER  
LA MATÉRIALITÉ**

**-**

**THINK OF  
THE MATERIALITY**



# MATIÈRE INTENSIVE ET MÉTASTABLE

ARCHITECTURE NUMÉRIQUE INFORMÉE  
PAR L'OPTIMISATION TOPOLOGIQUE.

**BERNIER-LAVIGNE SAMUEL**

Université Laval, Québec - Canada

## ABSTRACT

The introduction of digital tools in the architectural practice has led to a strong convergence with the field of engineering, opening a discussion focused on the technical performances of structures. This paper offers a theoretical background to the dialogue, with the exploration of different aspects of the form finding process, which is expressed by the continuous interaction between form, force and matter.

The intentions here are to describe a fraction of the ideas that led to an architecture digitally informed by the material characteristics. It all starts with a critique of the Aristotelian's hylomorphism by the introduction of force in the relation between form and matter. That will lead to an understanding of matter as an intensive and metastable entity. These theories of the twentieth century now find echoes in the most advanced digital processes, such as topological optimization of structures.

These algorithmic protocols can literally integrate an associative relation between form, force and matter, within the whole design process.

The generation of these intensive «material forms» are now questioning different notions of structure and space in contemporary architecture.

Keywords: Forme-force-matière, matière intensive, métastabilité, optimisation topologique, architecture numérique

## INTRODUCTION

L'introduction des outils numériques dans la sphère architecturale (Teyssot & Bernier-Lavigne, 2011) a permis une forte convergence avec l'ingénierie, ouvrant un dialogue axé sur la performance technique des structures. Cet article propose une introduction théorique à ce dialogue, selon les différents concepts de prise de forme matérielle qui s'expriment par l'interaction continue entre forme, force et matière. L'intention est de décrire une fraction de l'évolution diachronique des idées, qui ont mené à l'émergence d'une architecture numérique informée par les caractéristiques matérielles. Cela s'érige par une critique de la doctrine aristotélicienne de l'hylémorphisme, avec l'introduction nécessaire de la notion de force dans le couple forme-matière, qui mènera à l'exploration de l'idée d'une matière intensive et métastable. Ces théories de la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle trouvent aujourd'hui écho dans des processus numériques les plus avancés tels que l'optimisation topologique de structures. Approfondissant les recherches des Antonio Gaudi, Frei Otto, Heinz Isler, ces protocoles algorithmiques permettent d'intégrer littéralement la relation associative entre forme, force et matière, au processus

de conception. La génération de ces «formes matérielles» intensives entraîne un questionnement nouveau sur les notions de structure et de spatialité dans l'architecture contemporaine numérique.

## RÉVISION DE L'HYLÉMORPHISME

L'hylémorphisme est une doctrine aristotélicienne voulant que tout être, individu, ou objet, soit constitué de façon complémentaire d'une matière et d'une forme. Du grec *hylé* (matière, bois) et *morphé* (forme)<sup>1</sup>, ce concept oppose directement forme et matière; la première est active alors que la seconde est totalement passive. La matière devient donc le support indéterminé d'une forme singulière, tel que Platon avait initialement énoncé, avec l'idée d'une «cire fondamentale» (1992), et qu' Aristote viendra ensuite clarifier dans *Physique* (1973) :

«[...] le rapport de l'airain à la statue, ou du bois au lit, ou en général de la matière et de l'informe à ce qui a forme, antérieurement à la réception et possession de la forme, tel est le rapport de la matière à la substance, à l'individu particulier, à l'être. La matière est donc l'un des principes, bien qu'elle n'ait l'unicité, ni l'espèce d'existence de l'individu particulier ; ce qui correspond à la forme [...]».

Parmi les principales oppositions face à cette doctrine, l'on trouve Gilbert Simondon qui, par la démonstration de son incomplétude en offre une révision dans sa thèse principale de 1964 : *l'individu et sa genèse physico-biologique*. Selon ce dernier, il y aurait un élément manquant au cœur même du mécanisme hylémorphique; élément qui pourrait caractériser, et surtout préciser, la relation dans laquelle la forme vient informer la matière :

« Le schéma hylémorphique correspond à la connaissance d'un homme qui reste à l'extérieur de l'atelier et ne considère que ce qui y entre et ce qui en sort ; pour connaître la véritable relation hylémorphique, il ne suffit pas même de pénétrer dans l'atelier et de travailler avec l'artisan : il faudrait pénétrer dans le moule lui-même pour suivre l'opération de prise de forme aux différents échelons de grandeur de la réalité physique.» (Simondon, 1964)

Il décide donc de remédier au manque d'information, dû à l'hermétisme de cette «boîte noire» que représente l'hylémorphisme, et introduit un troisième paramètre dans l'équation, la *force*. Par ce fait, il établit conceptuellement le noyau de l'opération technique de la prise de forme en intégrant les conditions énergétiques dans le dialogue. Cela a pour conséquence l'édification d'une «plateforme de communication», siège de la résonance interne entre les trois constituants, que l'on viendra éventuellement qualifier de système.

Simondon explique qu'avec l'utilisation d'une matière réelle, lors de la fabrication des briques par exemple, ces dernières ne peuvent résulter de l'application du parallépipède parfait sur l'argile comme le voudrait l'hylémorphisme avec ses matières abstraites. Il se doit d'y avoir une opération technique et concrète de prise de forme. Le moule en bois permettra d'accomplir cette tâche, non pas en imposant sa forme à l'argile, mais bien l'amenant à l'équilibre. Cette opération stabilisatrice de la matière, où le moule guide et limite l'expansion de celle-ci, s'effectue par une réaction de forces entre les parois solides et la matière malléable. Il s'agit davantage d'une *modulation* de la matière que d'un moulage à proprement dit; dans l'optique où le moule ne donne pas directement sa forme à l'argile, mais c'est bien l'argile qui comble la forme du moule. D'ailleurs, Gilles Deleuze apporte une précision sur la différence entre mouler et moduler, où la modulation admet une variation continue de la matière, passant d'une phase d'équilibre à une autre : «moduler, c'est mouler de manière variable et continue, mais on dira aussi bien que mouler

<sup>1</sup> <http://www.cnrtl.fr> (Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales)

c'est moduler de manière constante et finie, et déterminée dans le temps.» (Deleuze, 1979). Il semble maintenant évident que l'entre-deux, cet élément énergétique entre le moule et l'argile, vient résoudre une des problématiques initialement soulevées dans l'hylémorphisme.

## FORCES ET CONDITIONS ÉNERGÉTIQUES DES SYSTÈMES.

Après une première apparition de la force comme « quantité mesurable » dans le *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* de Sir Isaac Newton, en 1687, c'est réellement avec la fondation de la thermodynamique que l'on pourra entrevoir une corrélation scientifiquement cohérente du couple force-matière. Alors que la mécanique classique représentait une nature idéalisée, où toute complexité semblait être écartée des équations Newtonienne, les thermodynamiciens décidèrent de se confronter à une nature réelle, fragmentée et riche en potentiel. Par l'intégration d'un dialogue expérimental ; à « la rencontre entre la technique et la théorie, [...] entre l'ambition de modeler le monde et celle de le comprendre » (Prigogine & Stengers, 1980), ceux-ci furent en mesure de développer une expérimentation pratique au niveau de l'interaction entre force et matière, surpassant l'idéalisation de l'hypothèse. Ils offrirent donc ce qu'il manquait initialement au schéma hylémorphique, la notion de système, qui supporte cette véritable « communication » entre les parties (Barthélémy, 2005).

Parallèlement à l'émancipation de la thermodynamique, certains physiciens développèrent une théorie où cette fois, espace, force et matière seraient intrinsèquement liés. Initialement découverts par Michael Faraday lors de ses travaux sur l'électromagnétisme, *les champs de forces* ont permis de constater que : « l'espace n'est pas un milieu inerte, mais un champ d'énergie, parcouru de ligne de force » (Macé, 1998). L'emplacement spatial d'un objet, par conséquent son positionnement dans le champ, détermine directement la relation qu'il entretient avec l'énergie en présence. Un élément primordial qui découle des travaux de Faraday est l'élaboration : « [d']une nouvelle représentation des forces, [...] où [celle-ci] au lieu d'être représentées par des « équations », c'est-à-dire par une écriture algébrique, sont représentées par des « lignes », c'est-à-dire par une écriture diagrammatique. » (Balibar, 1992). Il est alors possible de concevoir la notion de force sans référer à une quelconque action substantialiste, surpassant la physique newtonienne. Les recherches bien connues d'Albert Einstein permettront d'unifier les différentes hypothèses concernant les champs, par la démonstration explicite d'une conversion entre matière, énergie et espace; de la célèbre équation  $E=mc^2$ , où la différence entre Énergie et masse (matière) n'est due qu'à une différence de vitesse. La matière résulte d'une concentration extrêmement intense d'énergie, donnant ainsi une loi capable d'expliquer physiquement les formations naturelles, selon une structure valide, et ce, peu importe l'échelle :

« Le champ représente de l'énergie, la matière représente de la masse. [...] La théorie de la relativité nous a appris que la matière représente d'immenses réservoirs d'énergie et que l'énergie représente de la matière. Nous ne pouvons pas ainsi distinguer qualitativement entre la matière et le champ, puisque la distinction entre la masse et l'énergie n'est pas d'ordre qualitatif. La plus grande partie de l'énergie est concentrée en matière, mais le champ qui entoure la particule représente également de l'énergie, bien qu'en quantité incomparablement plus petite.[...] » (Einstein & Infeld, 1974)

Ce positionnement du concept de force au centre de l'équation, celle même qui relie forme et matière, entraîne un questionnement fondamental sur l'organisation des systèmes matériels. Quels sont les processus qui expliquent le rapport entre forme, force et matière ? Et de quelle façon ces processus peuvent-ils venir informer la conception de l'architecture ?

## MATIÈRE INTENSIVE ET MÉTASTABLE

Parmi les explications proposées à ce questionnement se trouve l'approche théorique à la genèse de l'individu chez Gilbert Simondon, selon laquelle : « le principe d'individuation [est] l'opération qui réalise un échange énergétique entre la matière et la forme, jusqu'à ce que l'ensemble aboutisse à un état d'équilibre. » (Simondon, 1964). Notons que l'individu chez Simondon se décline en 2 possibles : soit l'individu physique; résultat d'une individuation complétée tels le cristal ou la molécule; soit l'individu vivant; qui est en constante individuation. Son originalité vient de l'introduction d'une temporalité irréversible à cette opération, dans le passage d'un stade pré-individuel à l'individuel. Ce n'est donc plus le rôle de la matière ni de la forme d'entraîner une différenciation, mais bien celui de : « l'opération par laquelle la matière a pris forme dans un certain système de résonance interne. » (Simondon, 1964)

Un système peut alors être en devenir constant, bifurquant d'une phase potentielle à une autre, dépendamment des forces qui agissent en lui. Afin d'expliquer ce phénomène, Simondon fait appel à un concept de la thermodynamique loin de l'équilibre : *la métastabilité*. Celle-ci surpasse la simple stabilité, elle qui exclut tout devenir possible, par l'introduction d'une énergie potentielle. Les fluctuations énergétiques entraîneront une dissymétrie, permettant au système d'adopter différentes structures d'équilibres selon une logique de multi-phases. De ce fait, la « forme » devient l'état de stabilisation où : « la Bonne Forme n'est plus alors la forme simple, la forme géométrique prégnante, mais la forme significative, c'est-à-dire celle qui établit un ordre transductif à l'intérieur d'un système de réalité comportant des potentiels. » (Simondon, 1964).

Il y a donc une délimitation imprécise entre le commencement de l'individu physique et la fin des relations qui l'ont initialement formée. Fortement influencé par la physique de son époque, il mettra en évidence la relativité de ces objets, puisqu'ils entretiennent une relation énergétique continue par le biais de champs de force. L'interaction avec ces champs se produit de deux façons différentes. Premièrement, l'individu encaissera l'influence du champ : « il est soumis aux forces du champ; il est en un certain point du gradient par lequel on peut représenter la répartition du champ » (Simondon, 2005). Deuxièmement, sa présence dans ce même champ influence le degré de différence : « il intervient dans le champ à titre créateur et actif, en modifiant les lignes de force du champ et la répartition du gradient; on ne peut pas définir le gradient d'un champ sans définir ce qu'il y a en tel point. » (Simondon, 2005). Simondon démontre alors l'importance de l'associativité dynamique et réciproque entre l'individu physique et son milieu énergétique.

Gilles Deleuze, autre philosophe des processus, oppose aussi un refus au schème hylémorphique, par la proposition d'une théorie immanente de la matière. Enracinée dans la philosophie d'Henri Bergson, celle-ci envisage de : « retrouver les vraies différences de nature ou les articulations du réel » (Deleuze, 2004); les vraies différences sont ici les processus constitutifs des choses. Pour Deleuze, ces différences sont synonymes de « nouveautés » ; des possibilités créatives. Elles sont des différences positives où leurs variations s'expriment ultimement à travers la notion d'intensité.

L'intensité désigne alors une caractéristique qui rend la matière dynamique ou plastique, et permet de délimiter des points critiques dans sa formation, là où se produisent les différents changements de phase. C'est donc la différence d'intensité qui est responsable de l'oscillation de la matière, passant à répétition d'un côté comme de l'autre de ces mêmes seuils critiques. Tout comme les champs de forces chez Einstein, Deleuze propose une expression de la matière qui ne soit plus liée à la forme, mais bien à la force; à l'intensité (Macé, 1998). Il évoque la matière comme un flux, un « matériau-force plutôt qu'[une] matière-forme » (Deleuze & Guattari, 1980), porteuse de singularités telles sa



Figure 1  
Évolution d'une  
procédure  
d'optimisation  
topologique.

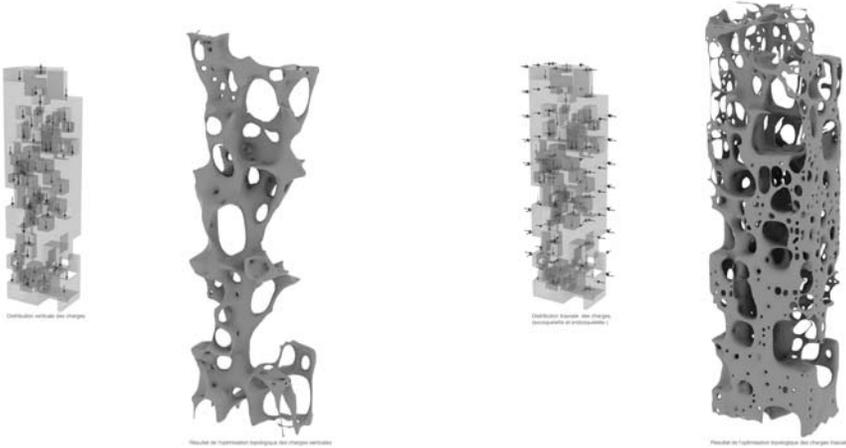
résistance, son élasticité et sa porosité, et qui est nécessairement : « inséparable des processus de déformation qui s'exercent sur elle, naturellement ou artificiellement » (Deleuze, 1979). Son devenir est intrinsèquement liée à aux forces qui l'habitent, celles-ci perçues comme « intensives, différenciatrices et différentielles » (Mengue, 2009).

Le devenir intensif est donc un *processus historique de formation* (Delanda, 2000), avec une orientation objective irréversible, selon la « flèche du temps » thermodynamique (Deleuze, 2011, p.288). Cette évolution morphogénétique s'illustre par une conversion énergétique ; où une première différence se supprime, en engendrant par le fait même, une autre différence plus singulière (Prigogine & Stengers, 1980). Il faut alors suivre les flux du champ de force, à la recherche de singularités matérielles, afin d'observer ces différences qualitatives que seule la matière, sous l'effet de la force, peut faire émerger. Ce qu'on y trouve est formellement anexact, pour reprendre le concept de Husserl avec sa proto-géométrie vague : « elle ne serait ni inexacte, comme les choses sensibles, ni exacte comme les essences idéales, mais anexact et pourtant rigoureuse » (Deleuze & Guattari, 1980). Guidée par l'énergie qui la parcourt, la matière va modifier sa topologie par différenciation progressive lors de son actualisation, afin d'atteindre un de ses multiples stades d'équilibres. En exécutant ce processus morphogénétique par différence intensive (Delanda, 2004), elle tendra assurément vers son optimum dans l'interrelation entre forme-force-matière, la rendant géométriquement anexacte, mais logiquement rigoureuse, puisqu'elle réagit aux pressions énergétiques internes. Pour que l'architecte puisse avoir accès à ce champ de force, il se doit de développer un dialogue expérimental entre l'espace, la forme, la force et la matière. Il en découlera un processus de prise de forme physique (Ang. *Form finding*), où l'on fera appel aux capacités numériques de l'optimisation topologique.

## OPTIMISATION TOPOLOGIQUE COMME ACTUALISATION NUMÉRIQUE D'UNE MATÉRIALITÉ INTENSIVE.

Tout d'abord, l'optimisation topologique est une méthode de calcul capable de produire des géométries qui démontrent une distribution idéale de la matière dans l'espace, en respectant ses comportements structuraux (Michalatos & Kaijima, Sawako, 2011). À travers une évolution continue des « formes structurales » (Dombernowsky & Sondergaard, 2009), ce processus tente de maximiser les performances du système structural analysé, tout en minimisant son poids total (Xie, Zuo, Huang, Tang, Zhao, & Felicetti, 2011). (Figure 1)

Selon une perspective théorique, l'optimisation topologique permet une compréhension précise du comportement matériel, par l'interactivité continue entre forme-force-matière et le déploiement de solutions dites optimales selon des contraintes prédéfinies. Afin d'obtenir une structure « légère » et résistante à la fatigue, la matière s'auto-organise



2

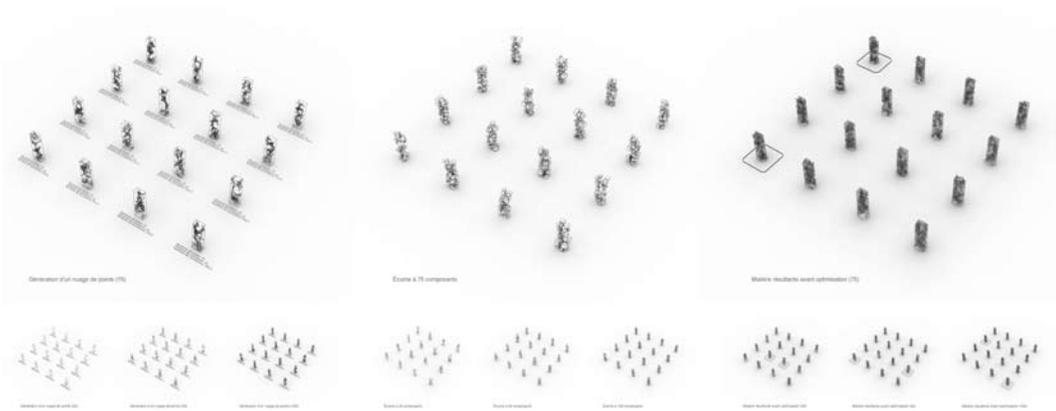
selon les forces qu'elle reçoit; en déployant un effort uniforme dans la repartitions des charges (Mattheck, Baumgartner & Harzheim, 1992). À l'image du champ de force, l'énergie devient matière lorsque l'intensité culmine, tout en s'orientant selon les lignes de force reliant les différentes charges aux points d'appui. Il est alors possible d'affirmer que l'optimisation topologique permet une conception numérique de la matière intensive. Son potentiel lié à une application dans la sphère architecturale est limpide; permettre à l'intensité des forces de s'exprimer dans le processus de formation et de matérialisation du projet :

« Puisque la différenciation progressive et spontanée est une façon naturelle d'explorer l'espace abstrait que représente l'ensemble des formes possibles, elle peut également être utilisée par les architectes et les ingénieurs afin de générer, à partir d'un état initial peu défini, une structure détaillée. L'interrelation étroite entre les forces intensives et les caractéristiques topologiques, peut alors expliquer les transformations et la prise de forme (Ang. form finding) de la matière. » (Delanda, 2004)

Figure 2  
Matière-flux  
et métastable  
générée par  
l'optimisation  
topologique.

Cela se concrétise avec l'analyse des résultats obtenus par cette procédure algorithmique d'optimisation; une multitude de géométries anexactes, mais rigoureusement définies, au moyen d'une matière-flux en constant devenir. Le traitement d'informations locales, telles l'emplacement des vides et leurs relations avec les forces guide la distribution de matière afin d'optimiser différentes régions spécifiques. De ce fait, nous obtenons un système métastable, tributaire des variations de son milieu d'implantation qui peuvent déclencher une bifurcation de l'ensemble à tout instant. (Figure 2)

Afin de démontrer les liens entre la théorie et la pratique, dans la compréhension de l'optimisation topologique comme matière intensive, nous proposons une série d'explorations conceptuelles par la génération d'objets architecturaux. Ceux-ci sont basés sur le concept de l'écume ; soit des agrégats pluriels d'espaces humains décentralisés démontrant à la fois des caractéristiques de co-isolation et de co-relation (Sloterdijk, 2005). À travers un processus algorithmique génératif, l'emplacement des spatialités émerge selon les contraintes initialement définies, telles que le domaine de diffusion, le type et le nombre de composants ainsi que leurs rapports de proximité, par une croissance compétitive propre aux écumes savonneuses. L'on obtient des formations qui s'apparentent davantage à des structures naturelles comme celles des solides cellulaires, où les spatialités seraient, en quelque sorte, les cellules d'air dans cette matière poreuse, nous éloignant ainsi des modèles architecturaux connus. (Figure 3)

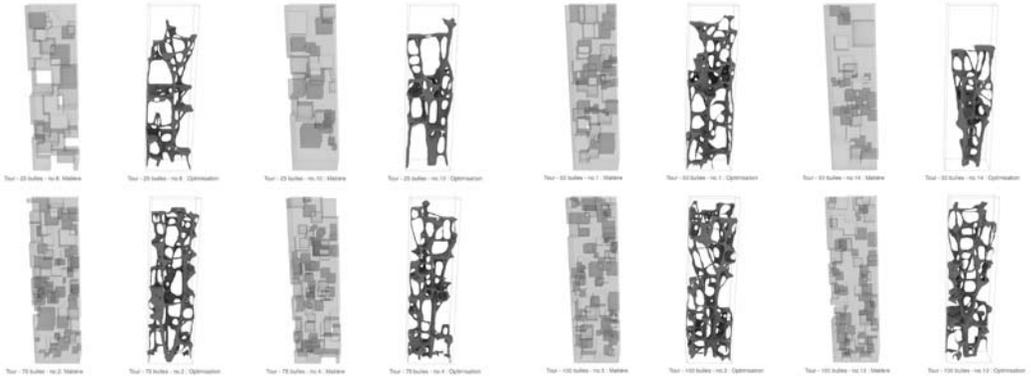


3

Figure 3  
Génération  
d'une série  
d'écume à  
l'intérieur  
d'un domaine  
volumétrique  
vertical.

Le questionnement devient donc complexe, à savoir quel archétype structural peut ultimement répondre à ces organisations spatiales rhizomiques. Il ne s'agit non pas d'améliorer une solution déjà en place, mais bien de mettre sur pied tout un système rétroactif, qui permet une réelle modulation de la matière au fil des itérations. Dans ce cas précis, l'optimisation topologique permet de figurer exactement la distribution des charges dans un ensemble qui, en définitive, est pratiquement impossible à résoudre autrement. Le processus débute par la définition d'un domaine volumétrique représentant l'ensemble des possibles de la matière, pour ensuite être subdivisé en éléments fins cubiques sur lesquels est performé un calcul des moments selon les contraintes. Alors que les trajectoires structurales se précisent, les éléments se trouvant à l'extérieur de celles-ci sont graduellement éliminés. Une convergence se manifeste vers une solution optimale théorique, où la stabilité structurale est atteinte avec un minimum de matière. L'inclusion d'une telle méthode dans le processus de conception doit absolument remettre en question la frontière entre le vide et le solide, en brouillant cette limite par diffusion graduelle de la matière dans l'espace (Michalatos & Kaijima, Sawako, 2011). Il ne s'agit donc pas de viser une optimisation structurale complète, au détriment des autres paramètres architecturaux et atmosphériques, mais bien d'accroître la compréhension du comportement matériel, défini spécifiquement pour chaque organisation spatiale. Nous sommes à la recherche des différences qualitatives que seule une matière soumise à la force dans son processus d'organisation peut démontrer. Il est donc littéralement question de se projeter dans cette matière, ou dans le moule comme le souhaitait Simondon, pour suivre l'opération de la prise de forme, en percevant la structure comme un unique matériau continue. (Figure 4)

Il en résultera de nouvelles compositions structurales; des diagrammes matériels intensifs et métastables, dictant le développement d'une architecture numérique hétérogène. Cette hétérogénéité qui se traduit dans la forme, le dimensionnement ou le motif, n'est plus une simple question stylistique, comme l'ont laissé entendre certains protagonistes du numérique au tournant du siècle, mais devient une nécessité à l'équilibre complexe du système. Toutefois, cette hétérogénéité place le concepteur devant un paradoxe évident. Alors que la Nature produit ce type d'organisation par économie de moyen, où aucun élément n'est superflu, il en est autrement pour l'architecture. Malgré les multiples avancés au niveau de la fabrication numérique et de la production de masse sur-mesure (Ang. Mass-customization), il reste assez complexe, et surtout très coûteux, de construire une architecture ne comportant aucun élément récurrent. D'autre part, si l'on introduit de un agent de répétition, par une rationalisation des résultats obtenus, cela aura nécessairement pour effet de diminuer le degré d'optimisation de la structure.



4

Le défi pour l'architecte est alors de trouver cette zone précise, où il est possible de tirer le meilleur des deux approches, afin que ces « pré-solution », ces diagrammes de matière intensive, puissent devenir projets singuliers.

Figure 4  
Matière de l'écume avant et après le processus d'optimisation topologique .

## REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont aux professeurs Georges Teyssot et Richard Pleau, pour la codirection de cette thèse et leurs précieux conseils afin de me guider dans ce projet complexe, ainsi qu'aux professeurs Philippe Barrière et Aaron Sprecher pour leurs commentaires et leur présence sur le comité doctoral.

## REFERENCES

- Aristote (texte établi et traduit par Henri Carteron) (1973), *Physique*, Tome 1, Les Belles Lettres, Collection des Universités de France
- Balibar F. (1992), *Einstein 1905; de l'éther au quanta*, Paris, Presses Universitaires de France
- Delanda M. (2004), *Materiality: Anexact and intense*, in L. Spuybroek, *Nox; Machining Architecture*, New York, Thames and Hudson, pp. 370-377
- Deleuze G. (1968), *Différence et répétition*, Paris, Presses Universitaires de France
- Deleuze G. & Guattari F. (1980) *Mille plateaux; capitalisme et schizophrénie 2*, Paris, Les éditions de minuits
- Dombernowsky P. & Sondergaard A. (2009), *Three-dimensional topology optimisation in architectural and structural design of concrete structures*, in A. Domingo et C. Lazaro (eds.), *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS); Symposium: Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures*, Valencia, pp. 1066-1077
- Einstein A. & Infeld L. (1974), *L'Évolution des idées en physique*, Paris, Payot
- Macé A. (1998), *La matière*, Paris, Flammarion
- Mengue P. (2009), *Dehors, chaos et matière intensive dans la philosophie de Gilles Deleuze: Nessie*, revue numérique de philosophie contemporaine, 1, pp. 1-25
- Michalatos P. & Kaijima S. (2011), *Intuitive material distribution: Mathematics of space*, *AD Architectural Design*, 81(4), pp. 66-69
- Platon (texte établi et traduit par Luc Brisson) (1992). *Timée*, Paris, Flammarion.
- Simondon G. (1964), *L'individu et sa genèse physico-biologique*, Paris, Presses Universitaires de France
- Sloterdijk P. (2005), *Écumes : Sphère III*, Paris, Hachette Littératures
- Teysot G. & Bernier-Lavigne S. (2011), *Forme et information. Chronique de l'architecture numérique*, in A. Guiheux (dir.), *Action Architecture*, Paris, Éditions de la Villette, pp. 49-87
- Xie Y., Zuo Z.H., Huang X., Tang J.W., Zhao B., & Felicetti P. (2011), *Architecture and Urban Design through Evolutionary Structural Optimisation Algorithms (Keynote Lecture)*, in *International Symposium on Algorithmic Design for Architecture and Urban Design (Algode)*, Tokyo, Japan, 11p.



# PERFORMANCE DESIGN: ARCHITECTURE AS A SYSTEMIC-CYBERNETIC DEVICE

CIFUENTES QUIN CAMILO ANDRÉS

Barcelona Tech - UPC - ETSAB - Spain

## ABSTRACT

In current architectural practice are taking place important shifts in the material definition of buildings. These changes are commonly associated with the growing use of new digital design and fabrication tools. Although the impact of information technologies in architectural design is unquestionable, this essential factor can not be isolated from other aspects involved in the theoretical and material definitions of architecture. One of these factors is the definition of new conceptual and epistemological frameworks.

Through the analysis of the discourses of performance oriented architectural design, this paper shows that this set of practices are constructed in relation to two fields of knowledge closely related with the rise of information society and digital culture: cybernetics and systems theory. Therefore, it is possible to argue that the emergent design methodologies and professional practices are not simply the outcome of the introduction of the pragmatics of computation. From the vision exposed here they are rather a medium of exploration to think and interpret the world according to concepts and ideas particularly influential in contemporary culture, many of which stem from information discourses.

Keywords: Computational design, Performance, Systems theory, Cybernetics.

In current architectural practice some important shifts in the tectonic definition of buildings are taking place. These changes, suggested by the title of this conference, are commonly associated with the growing use of new digital design and fabrication tools. Nevertheless, this kind of analysis, very typical in the field of architecture, is problematic since it promotes visions of the use of technology in the profession as an autonomous and determinist factor (Moe & Smith, 2012). Even though the impact of the use of information technologies in architectural design is unquestionable, this essential factor can not be isolated from many other aspects involved in the theoretical and material definitions of architecture. Indeed, as Ahrens et al. (2007) argue, the very choice of a technology or a tool includes other decisions and conditions that include also cultural, social and political aspects.

From this point of view, it will be argued here that the computational perspective in architecture<sup>1</sup> is inseparable of new theories and epistemological models that have

---

<sup>1</sup> The concept of computational perspective refers to the use of informatics in architecture (such as generative, formation and performance design models), that differ from what Terzedis (2006) calls computerization, i.e. computer applications for architectural representation as the traditional CAD, photo-realistic rendering and virtual three-dimensional modelling, based on the digitization of established design processes.

appeared simultaneously with the emergence of digital culture. For this reason, it is not a coincidence that many architectural practices today are defined in relation to scientific and philosophical models (such as systems theory, post-structuralism, molecular biology and ecology, among others) whose development has been closely linked to the emergence of information discourses. The particular case of performance based design models, a set of practices that represents one of the dominant research fields in contemporary architecture, can be studied from this perspective. The design approaches based on the performance of architecture embody a clear example of the theoretical and material redefinition of architectural problems in reference to new epistemological and conceptual frameworks that have emerged hand in hand with computer science.

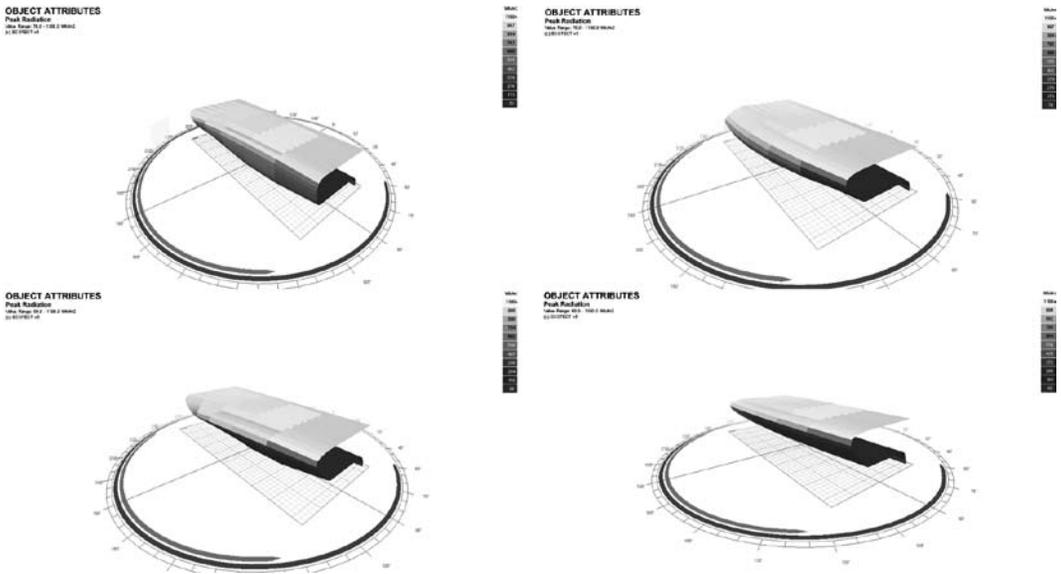
Although with the recent development of new digital design and analysis tools this type of approach has gained particular interest, performance design, as it is suggested by Antoine Picon, represents an old ambition renewed with the new aspirations that appear with the emergence of digital culture (Picon, 2012). The argument of Picon is significant because it helps to understand that the recent changes in architectural practice – usually explained as the result of the adoption of new digital technologies – is not related exclusively with the introduction of information technologies in the design process. Interestingly, since the middle of the last century many attempts were made to redefine the problems of architecture and design within the cybernetic paradigm. This would be the case of explorations based on the manipulation of geometric patterns, systems of signs and symbols, and typological investigations. Similarly, since its origins, the explorations of computational architecture included the redefinition of the traditional problems of design in relation to a series of concepts inherited of information discourses. For example, under the influence of structuralism, the seminal researches of the Centre for Land Use and Built Form Studies (LUBFS) focused primarily on the manipulation of formal languages and the exploration of architectural form as the result of rational, quantitative and scientific principles (Rocha, 2006). This kind of approach continues to be a dominant aspect in computational design. Therefore, the paradigm shift that we observe today in architecture is part of a more complex panorama associated with new ways of thinking the problems of architecture in relation to new concepts and thought models.

## PERFORMANCE ORIENTED DESIGN

The concept of performance, as it is used presently in architectural practice, is quite difficult to define. The reason is that this concept is used to categorize different approaches to design that explore issues as diverse as the formation of architecture, sustainable design, the material behavior of buildings, and their condition as mediation artifacts between the social and the atmospheric aspects of living space. The scope of this article doesn't allow examining in detail this variety of approaches. In a general way, performance design practices are considered here as operative design processes based in programmatic and contextual considerations. According to the definitions proposed by Rivka Oxman y Yehuda E. Kalay, performance based design models are formation processes that are driven by a desired effect (Oxman, 2006), where the relation between form and function in buildings is closely determined by the context (Kalay, 1999).<sup>2</sup> In other words, the evaluation of performance is oriented towards the definition of the capacity of a design to respond to certain necessities in particular contexts (Kalay, 1999).

More than presenting a complete panorama of current performance design practices, the main interest of this article is to analyze some central aspects common to the various approaches and their relation to a series of concepts elaborated in cybernetics and

<sup>2</sup> This includes, among others, the material, structural, social, economic and geographic factors involved in the definition of a project.



1

**Figure 1** Through the coupling of parametric design software (Grasshopper) and Analysis sustainable building design software (Ecotect), a form finding process is established to design a building's envelope. In this case, the results of a solar access analysis define the shape of the surface.

systems theory. The analysis of the connections between performative architecture and these two scientific models helps to appreciate that the computational perspective in architecture is not simply determined by the pragmatic of informatics, but is the product of redefining the profession in reference to certain ontological and epistemological changes closely linked to the emergence of what some authors have defined as information society. It is an aspect of performance based models that already appeared since its formulation in the 1960's.

William Braham reminds that in 1967 *Progressive Architecture* published a special volume about performance design. In the mentioned publication this approach was described as a set of practices that emerge of fields as general systems theory, operations research and cybernetics (Braham, 2005). It is interesting to observe that this kind of approach, which has become one of the dominant practices in contemporary architecture, finds its references in cybernetic and systemic concepts more than in computational production logic. Evidently, this does not deny the close relation existing between the idea of conceiving the problems of architecture as informational processes and the modes of operation allowed by information technologies: the manipulation of formal languages, quantification, algorithmic expression, etc.

According to the general definition of performance design proposed by Oxman and Kalay, it is clear that – independently of the emphasis made on the different aspects mentioned before – the various explorations based on the concept of performance share some fundamental principles. One of these principles is to think of buildings as totalities, as integrated wholes constituted of interacting elements, and as the product of the interaction among the multiple variables of reality that materialize in architecture. It is in reference to this definition of architectural problems that the relation between performance design and systems thinking appears clearly.

## A SYSTEMIC ARCHITECTURE

The influence of systems thinking in performance design can be already intuited through to the very meaning of the concept of performance. The concept of performance in architecture can refer to the action, behaviour or optimal output of a building. These concepts, as applied to architecture, imply rethinking the status of buildings as passive objects. In performance design approaches architecture is conceived in other terms that include its active role, be it as a mediating aspect between the inhabitants and the environment, or as a system composed of multiple elements that act together at different levels.

In the field of architecture, as it is proposed by Moe and Smith (2012), systems thinking appears as the acknowledgment that there are different ways of organizing the design practices, and that these follow multiple goals. The authors also suggest that this kind of approach imply defining the architectural project as a system. In his influential book *The Sciences of the Artificial*, Herbert Simon defines systems as hierarchies composed of various subsystems, where each subsystem can have its own hierarchy; or as a collection of parts with asymmetric relations organized as a whole (Simon, 1996). In architectural terms, the systemic approach implies determining the parts of a project, its connections and action networks, and a frame to define the answers to questions "such as systems function, scale, scope, hierarchy, inputs, outputs, and degrees of dynamic equilibrium, decay or otherwise." (Moe & Smith, 2012) In other words, systems thinking in architecture consists in the search of integrating the relations among diverse actors and forces that intervene in the architectural process.

The significance of systems thinking in performance oriented design is clearly exposed by Michael Hensel. According to Hensel, performative architecture "shifts the emphasis from perceiving the spatial and material organization complex as a static configuration that alone defines an object to intricate processes of interaction and the capacities and transformations that arise from these interactions." (Hensel, 2012) To explain this shift from the static to the dynamic in architecture, Hensel quotes the architectural critic Sanford Kwinter, who argues that from a systemic perspective, architectural and urban objects cease to exist as unities to become a set of relations among the elements of a system; "the object – be it a building, a compound site, or an entire urban matrix, insofar as such unities continue to exist at all as functional terms – would be defined now not by how it appears but rather by practices: those it partakes of and those that take place within it. On this reconception, the unitariness of the object would necessarily vanish – deflected now into a single but doubly articulated field (relations, by definition, never correspond with objects)." (Kwinter, 2001)

The result of the reconception explained by Kwinter is a vision of architectural and urban objects where these are constituted by the relations that are smaller than the object as well as for the relations that are bigger than the object. Kwinter refers to these two possible states as micro-architectures and macro-architectures, which is basically a translation to architectural terminology of the systemic principle that affirms that systems are sets constituted by subsystems and, simultaneously, components of broader meta-systems. Independently of the various approaches to the problem of performance in architecture, two notions emerge systematically in the literature: the already mentioned definition of buildings as systems, and the characterization of architecture as the product of the integration of multiple aspects of reality.

It is precisely in base to the notion of integration, inherent to the concept of system, that many architectural practices explore the connection of architecture and its context: be it as an approach based on the technical performance of buildings according to geographic variables, as an atmospheric approach based in the perception of the inhabitants,

or as a dynamic design process where the exchange with the program conditions and the site define the form of the building. Thus, from the notion of integration emerges another common aspect of the diverse approaches to performance design: the characterization of these exchanges as processes of information exchange.

## ARCHITECTURE AS A CYBERNETIC DEVICE

In systems thinking the idea of integration is directly related to the cybernetic communication model. The definition of information as a regulating mechanism in cybernetic theory is one of the premises that give rise to the notion of open system in the General Systems Theory (Bertalanffy, 1993). Therefore, it is in reference to the cybernetic notion of communication that the relation between architecture and context is thought as a process of information exchange. At the same time that architectural problems are defined as systems, information is conceived as the regulating element of the performative aspects (structural, formal, atmospheric) that define the design process. Aaron Sprecher reminds that with the development of information theories and technologies, the notion of performance in architecture has been inseparable of the capacity of any system to exchange information with its environment. According to Sprecher, the emergence of cybernetic theory, with its emphasis in the communicative nature of organisms and machines, gave rise to new conceptions of the architectural object. For example, the change in the conception of the building as a fix entity to become a reactive system, a kind of semi-organic machine that would behave as a living organism (Sprecher, 2012).

The close relation between the systemic concepts introduced in the theoretical constructions of architecture and the cybernetic model, appears clearly with the great amount of references, in the field of performance design, to the concepts developed by the cyberneticians. Besides the definition of the problems of architecture in reference to concepts inherited of systems theory, in the theoretical constructions of performance design is also common to find multiple references to cybernetic concepts. Among the allusions to cybernetic notions in architecture stands out the use of concepts as feedback, self-organization, regulation, entropy, as well as references to the concept of circular causality and the formerly mentioned role of information as a regulatory force in the design process.

Yasha J. Grobman, for instance, uses the metaphor of entropy to characterize the role of information in design.<sup>3</sup> For Grobman, the increase of information on architectural form should lead architects to a better spatial consciousness; such shift would imply a decay of the entropy of architectural problems. This definition of the role of information in architecture is linked to what the author considers a new dimension in the profession; such dimension is constructed through information hierarchies that are the outcome, thanks to the use of informatics, of the increase of the amount of information introduced in architectural design (Grobman, 2012).

The reference of Grobman to the role of information in the definition of architectural form highlights a point in which different critics and practitioners have explored diverse concepts developed by Wiener and other cyberneticians. For example, when Lars Spuybroek describes a design methodology that he defines as "intensive design techniques", he makes reference to various cybernetic themes. Spuybroek argues that "to map inward going and outward going forces, and to map contractive and expansive forces within one continuum, a networked self-organizing technique is required.

---

**3** In cybernetic theory information is considered as a measure of organization, and consequently information is also conceptualized as negative entropy (Wiener, 1962).

An intensive technique means to inform a virtual system, which, during the processing of that information, takes on an actual structure that is a registering of the information."(Spuybroek, 2005) In the description of Spuybroek, architecture appears as the product of a communicational process with inputs and outputs, as the product of an exchange of information that defines the architectural form, which in this case is at the same time a registering of such information. The same idea is expressed by Greg Lynn in his popular essay *Animate Form*. Lynn proposes that the context of design becomes an active and abstract space that defines the form inside a field of forces that can be registered as information in the definition of form (Lynn, 1999).

Along with the role agreed to information in the design process appear multiple references to the model of circular causality of cybernetic thought. In many cases, this aspect is presented as the integration dynamic which is established between the architectural object and the context. Ali Rahim, describes the performativity of a design as the material, organizational and cultural change that results of an emergent process that includes feedback loops among different actors. From this perspective the design process is conceived as the reaction to external stimuli that transforms a situation through the "feedback between a subject and the environment, and between architecture and its milieu."(Rahim, 2005)

Besides the characterization of performativity as the result of a feedback process among the architectural object and its context, the cybernetic analogy is extended to the interaction between the designer and the designed object. Therefore, the whole design process, including the designer's role, is conceived according to the model inaugurated in the 1940's by the discourses of information. Craig Shwitzer describes precisely a performance design methodology where it is fundamental to understand and develop meticulously the input data and the critical role of feedback in the design process to obtain and give shape to unknown output data. This reference to the cybernetic model is extended as well to the actors that participate in the design process. Thus, an approach to performance design requires also the integration of the design team and well defined feedback loops among the members of the team (Shwitzer, 2005).

The point of Shwitzer is significant because his argument shows to what extent the systemic and cybernetic notions are rooted in the practices of performance design. The reference to concepts inherited of these scientific models is not just a useful analogy to justify a design methodology strongly based in the use of computation. The permanent allusion to concepts inherited of systems theory, as well as the proliferation of cybernetic references, reflects a vision of the profession of architecture, and of its role in society, funded in some of the most influential ideas of information thinking. The vision of the world embodied by performance design is therefore one where systems in general (social, physic, biological), are affiliated among them and in a state of constant flux, and where information is the regulating aspect. It is not only the architectural object which is conceived according to systemic-cybernetic epistemology. It is all the processes, forces and actors involved in the definition and existence of space, the reality itself, that are conceived as integrated elements that define the world as a whole.

## **CONCLUSION**

This article has tried to show that despite the various approaches to architectural designed proposed by the different practices categorized under the concept of performance design, this variety of explorations share a common aspect; they construct their discourses and their design methodologies within a conceptual and epistemological framework, defined for the most part by two fields of knowledge closely related with the rise of information discourse: cybernetics and systems theory.

Consequently, some of the current changes in the profession, that include new material practices and the definition of design problems as informational processes, must be understood in a broader sense than as the mere outcome of the introduction of the pragmatic of informatics in architectural design. At the same time that it is acknowledged that the recent development of new research fields in computational design has fostered the development of new approaches to the practice of architecture, it is important to explore the convergence of architecture and computation as a “work of mediation”<sup>4</sup> that includes multiple factors. The analysis of performance oriented design discourses demonstrates that the significance for the theoretical construction of computational architecture of some models of thought, closely linked to the emergence of digital culture, is one of these factors. Therefore, the definition of new conceptual and epistemological frameworks for the development of new design processes appears not as a consequence of the introduction of information technologies, but as a medium of exploration to think and interpret the world according to new concepts and ideas. That includes, but is not limited to, considerations about the role of technology in the social life, about the status of space in an information society, about the transgression of the traditional limits between human, nature and technology, and about the role agreed to information in contemporary culture. These kinds of consideration involve different models of thought as well as diverse ways of qualifying the world through the mediation of technology.

## REFERENCES

- Ahrens C., Neuman, E. & Sprecher, A. (2007), Dissipative procedures: Optimization through “phenomenonization”, in *Softspace*, Sean Lally & Jessica Young (Eds.), From a Representation of Form to a Simulation of Space, London, New York, Routledge, pp. 43-48, pp.68-85
- Bertalanffy L.V. (1993), *Théorie générale des systèmes*, Paris, Dunod
- Braham W. (2005), Biothechniques: Remarks on the Intensity of Conditioning, in *Performative Architecture*, in Branko Kolarevic & Ali M. Malkawi (Eds.), Beyond Instrumentality, New York, Spon Press, pp. 55-70
- Grobman Y. J. (2012), The various dimensions of the concept of performance in architecture, in Eran Neuman & Yasha J Grobman (Eds.), *Performatism. Form and Performance in Digital Architecture*, London, New York, Routledge, pp. 9-13
- Hensel M.U. (2012), Performance-oriented design from a material perspective: domains of agency and the spatial organization complex, in Eran Neuman & Yasha J Grobman (Eds.), *Performatism. Form and Performance in Digital Architecture*, London, New York, Routledge, pp. 43-48
- Kalay Y. E. (1999), Performance-based design, *Automation in Construction*, 8, pp. 395–409
- Latour B. (1997), *Nous n'avons jamais été modernes*, Paris, Editions La découverte & Syros
- Lynn G. (1999), *Animate Form*, New York, Princeton architectural press
- Moe K. & Smith, R. E. (2012), *Building Systems. Design Technology and Society*, London, New York, Routledge
- Oxman R. (2006), Theory and design in the first digital age, *Design Studies* 27(3), pp. 229-265
- Picon A. (2012), Architecture as performative art, in Eran Neuman & Yasha J Grobman (Eds.), *Performatism. Form and Performance in Digital Architecture*, London, New York, Routledge, pp. 15-19
- Rahim A. (2005), Performativity: Beyond Efficiency and Optimization in Architecture, in Branko Kolarevic & Ali M. Malkawi (Eds.), *Performative Architecture. Beyond Instrumentality*, New York, Spon Press, pp.177-192
- Rocha A. J. M. (2004), *Architecture Theory 1960 1980. Emergence of a Computational Perspective*, PhD. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology
- Schwitter C. (2005), Engineering Complexity: Performance Based Design in Use, in Branko Kolarevic & Ali M. Malkawi (Eds.), *Performative Architecture. Beyond Instrumentality*, New York, Spon Press, pp. 111-122
- Simon H. (1996), *The Sciences of the Artificial*, Cambridge MA, MIT Press
- Sprecher A. (2012), Informationism: information as architectural performance, in Eran Neuman & Yasha J. Grobman (Eds.), *Performatism. Form and Performance in Digital Architecture*, London, New York, Routledge, pp. 27-31
- Spuybroek L. (2005), The Structure of Vagueness, in Branko Kolarevic & Ali M. Malkawi (Eds.), *Performative Architecture. Beyond Instrumentality*, New York, Spon Press, pp.161-176
- Terzedis K. (2006), *Algorithmic Architecture*, Oxford, Architectural Press
- Wiener N. (1962), *Cybernétique et société*, Paris, Deux rives

**4** In the analysis of the relations of culture, science and technology proposed by Bruno Latour in *Nous n'avons jamais été modernes*, the author argues for a vision in which culture and science converge and are defined mutually. This process is conceived as a mediation work – travail de médiation – that proposes an entirely different dynamic between technology and culture compared to the visions fostered by the determinist theories of technology (Latour, 1997).



# BETWEEN STATIC SOLIDS AND UNSTABLE PIXELS

**RIMKUS CARLA**

Universidade Federal de Sergipe

## **ABSTRACT**

In this work some reflections on the conceptual aspect of contemporaneous architecture, which emerges from digital technologies, are presented.

The change of methodological and conceptual order of the essentially digital architecture, which explores the algorithmic dimensions of this space, is approached.

This work is illustrated with major contemporaneous architectonic works, which in the authors' point of view present references that express well the moment through which architecture is going.

The peculiarities, impact and contributions of the production method of buildings are shown in the chosen works: the City of Culture, from architect Peter Eisenman, and H2O Pavilion, work belonging to the Nox group.

The objective of this work is to promote reflections on the new paradigms of contemporaneous architecture related to conceptual aspects, the tectonic and materiality of the space, and this work is supported in the authors Lev Manovich and Marcos Novak, theorists of these new spatialities.

In the end, the conclusions on the development of the new spatialities in architecture and urbanism are presented, made possible by adequate tools within the logic of a digital environment.

## **INTRODUCTION**

The contemporaneous society nowadays is living through a deep metamorphose driven by the new technologies, which establish new paradigms in various spheres of the society, based on a precious asset: information. In this society, where nowadays more than 2 billion people are connected on the internet, the deepest changes in the history of mankind since the Industrial Revolution are watched. Digital information accessible to everyone, regardless of its geographical position, breaks paradigms of time and space.

The contemporaneous society nowadays is living through a deep metamorphose driven by the new technologies, which establish new paradigms in various spheres of the society, based on a precious asset: information. In this society, where nowadays more than 2 billion people are connected on the internet, the deepest changes in the history of mankind since the Industrial Revolution are watched. Digital information accessible to everyone, regardless of its geographical position, breaks paradigms of time and space.

Nowadays the impact of these technologies in the area of architecture can be observed in the entire development process of architecture from the conception of the space to architecture execution and management, enabling the creation of complex form architecture. The digital media worked as vectors of change of the architectonic space and in this context, the approximation with other areas of knowledge such as mathematics, computing, biology and philosophy is seen, driving new postures in the area of architecture. In essentially digital architecture, curved, geometrically complex forms are seen, which are generated by algorithms that surpass the traditional architectonic standards of the Euclidian space, produced from kinetic and dynamic systems.

For Marcos Novak, one of the main theorists of this new architecture «...we live in the middle of a Global Architectonic Renaissance, we are in a moment in which the most advanced and challenging buildings could not have been imagined without digital help».

In order to understand the digital era more clearly, Mc Dowell observes, in his Master degree thesis, how the world view on preceding human organizations was oriented and determined by the technological revolutions. According to Mc Dowell, *“The architecture, understood as cultural production and representation of the society, has always manifested itself in accordance with technological parameters, which were developed within these paradigms. Each paradigm has guided mankind in the way of seeing, thinking and relating itself with the mechanically and digitally organized architecture, mainly in what concerns to the vision of the world and the way of noticing space.”* (Mc Dowell, 2009. P. 11.).

Jencks elicits the change of paradigms when the replacement of the era known as mechanical by the digital one occurs. *“(...) In science and architecture, a new way of thinking about the world has begun. It favors automation systems, and not the mechanical ones (...) It points towards the idea of emergency, complexity and science of the chaos more than the one for linear and predictable systems of the mechanical science. In more technical terms, it is based on non-linear dynamics and in a vision of the world of contemporaneous cosmology”.* (Jencks, 2002. P. 135 )

For digital outbreak's Lev Manovitch<sup>1</sup>, a new form of culture rises, which responds to the priorities of the contemporaneous society and in this context, it is possible to observe total coherence between the essentially digital architecture with the new priorities of the information society, which is to manipulate information, giving it sense so as to generate knowledge. The author refers to the way the architects Zaha Hadid, Rem Koolhaas, NOX among others store, analyze and map information flows in the architecture production.

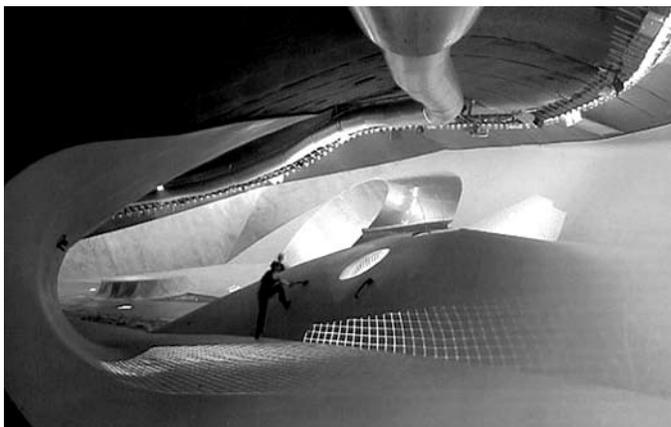
## **H2O PAVILION - NOX GROUP**

The H2O Pavillion, work of the Nox group office, was chosen to illustrate this work, because it presents important references regarding the modifications through which contemporaneous architecture goes, regarding the geometrical complexity and a methodological posture of aggregating knowledge from other areas such as philosophy, biology, mathematics and computing. This work incorporates in its architecture the academic discussion on the use of digital technologies as an alternative in the analytical process of architecture. The NOX group uses digital and analogical techniques in its architecture conception method, establishing interdisciplinarity with other areas of knowledge. Since its creation, the members of this group have shown a concern with the principles and the directives of a new architectonic trend named by the American architect Marcos Novak as transarchitecture or liquid architecture.

The H2O Pavilion is the implemented installation in the city of Neeltje Jans, the Netherlands. The architectonic project was developed between 1993 and 1997 at a request from the Ministry of Transportation, Public Services and Water Management, in association with the company Waterland Neeltje Jans and had the purpose of symbolizing the water cycles, divided in two parts: fresh water and salt water.

<sup>1</sup> <http://www.manovich.net/LNM/Manovich>, access in 08/28/2012

Figure 1  
Model of  
the Cultural  
Complex of the  
City of Culture.  
In the picture  
the interior  
of the pavilion  
is observed,  
where 14  
ellipses are  
distributed  
along 65  
meters of  
length



1

This installation is totally interactive and allows that the visitor drowns in playful and revealing experiences of the liquid's properties, of its importance and power. According to Lars Spuybroek, representative of the NOX group, the objective was to create an *"immersion architecture"* that worked as an interactive and dynamic system. *"An architecture made of steel, concrete tissue and electronic sensors, but also information, lights, sounds, music, projections, human bodies and water. All this «matter» moves, explodes, caresses, evaporates, drips and waves until returning to liquid or solid state"*. (2006, p.46). The installation is a great interface that updates itself in function of interactive electronic technologies that interact with the visitors and with internal and external factors like temperature, water flow, people and movements. As people, the environment and the technology configure this space.

The reality and the virtuality merge in this space that oscillates between static solids and unstable pixels: a transitory state of the architecture bearing from digital technologies that Marcos Novak named *"liquid architecture"* (Novak, 2000, p. 66). According to Novak: *"When bricks become pixels, the tectonics of the architecture becomes informational, urban planning becomes structural data project, construction costs become computational costs, accessibility becomes transmissibility, the proximity is measure in numbers of links necessary and available bandwidth. Everything changes, but architecture remains"*.

The environment of the pavilion responds interactively to the actions of the user that lives through the constant metamorphose of the environment.

This architecture that oscillates between physical and virtual spaces uses the actions of its visitors innovates the process of architectonic project regarding the human body to a topological importance. For Marcos Novak, 1999, this type of architecture is dissolved by the ephemerid, the *"liquid architecture"*.

The architecture this way configured as the great interface makes the human experience one of connection points with the new scientific theories and the digital era. In this moment, this oscillation between stable solids and unstable pixels is observed.



**Figure 2**  
*Model of the Cultural Complex of the City of Culture.* The process of thinking architecture through the philosophical concept of folding (developed by Gilles Deleuze) is used as a project strategy  
Source:  
<http://architetaandoverde.blogspot.com/2011/07/um-projeto-impactante.html>

2

## THE CITY OF CULTURE - EISENMAN ARCHITECTS

The contemporaneous architecture, essentially digital and connected to other areas of knowledge such as computing, biology and philosophy, has in the work of architect Peter Eisenman a strong representation. For Jencks, Eisenman is the leader of the new paradigm of the contemporaneous architecture, as it conjugates its main characteristics. Charles Jencks considers Eisenman a pioneer along Frank Gehry in the formulation of experiences that define the contemporaneous architecture with its innovative grammar of complex forms and with its approximation to other areas of knowledge.

Peter Eisenman, known as the precursor of the deconstructionism, was born in the US in 1932 and has several publications inspired in philosophical concepts.

The deconstructionist theses of Peter Eisenman received a strong influence from the French philosopher Jacques Derrida, who developed his deconstructionist theories based on Sigmund Freud's psychoanalysis methods, deconstructing texts and disassembling its structure to find out different meanings and senses. The publications inspired in Jacques Derrida propose the concept of folding, which Eisenman incorporates in its architecture. The fragmentation, the dynamic, non-Euclidian space and the digital media are visibly assimilated in its architecture, as it is observed in his work known as City of Culture, an architectonic, cultural and entertaining complex.

The City of Culture, located on the Gaiás Mount, dominates the view on Santiago de Compostela and was conceived to be a cultural pole of great representation, which could congregate past and future. The construction project of the City of Culture of Galiza was born in 1999 when the Junta de la Galiza released an International Architecture Contest for its construction Gaiás Mount in Santiago de Compostela, La Coruña.

The selected project was the one of architect Peter Eisenman due to its both conceptual and plastic singularity, and its exceptional integration to the site.

The local government invested in a striking cultural complex, which would call the world's attention for the contemporaneous side of a city famous for the traditional peregrinations. The proposal of the architectonic project of the City of Culture was to maintain its reference quality as an ancestral place for religious peregrination and, at the same time, imprint a new, fully contemporaneous iconic reference, thus producing a new dimension of present in the identity of this Galician city.

In this sense, Barros comments, in his Master degree thesis, that Eisenman "demonstrated in the ideal of his project, tracking history like a genetic marker, through a DNA code, seeking the (peregrination) paths of the old city and applying them on the top of the Gaiás mount, like the tattoo, the slit, the footprint on the sand" (Barros, 2011. p. 14).

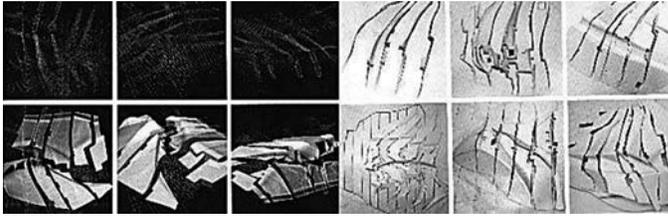


Figure 3  
Project Diagram.  
Source:  
<http://architetaandoverde.blogspot.com/2011/07/um-projeto-impactante.html>

3

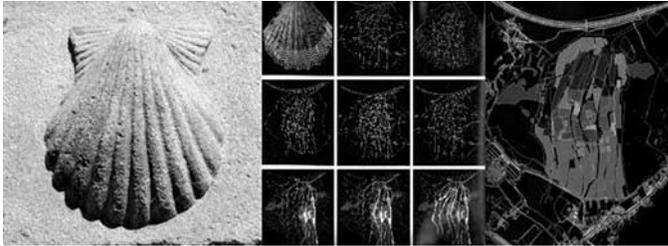


Figure 4  
*Vieira's Conch*, the formal solution proposed in Eisenman's architecture resembles the shape of Vieira's conch, a traditional symbol of the city of Santiago de Compostela. Peter Eisenman uses diagrams to study his projects as compositive methodology, in the volumetric composition and division of spaces.

4

According to Eisenman "...several physical marks, traces, impressions or footprints were made, like footprints left on the sand, regarding the real event that took place, instead of the truth or transcendental meaning. For example, the footprint on the sand suggests a previous action of some physical presence; it is the vestige of an action or, in another sense, the registration of a process". (EISENMAN 2005, 29)

Eisenman starts drawing this topography from two meshes: a map of the historical medieval center of Santiago and a conch (traditional symbol of the peregrines of the Jacobea route). And then he drew a series of regulating lines that created a «mix of space, time and meaning», in the architect's words, and generated lines of force that move through the third dimension, from the ground level to the roof, creating a series vertical displacements.

The lines evolved from simultaneous rotations, similar to multiple-point torsion, generating the dynamic transformation of the 2-dimensional plane of the place in a third dimension, so that a third dimension defined «would not be a simple extrusion of a planimetric condition». Eisenman respects the miraculously intact environment and proposes a strongly symbolic, formal solution in the conception of the architecture that identifies, in his drawing, the five peregrination routes, which destination is the cathedral of Santiago de Compostela .

In the project diagram, it is observed that the lines of the routes are mixed, forming an outline that resembles Vieira's conch lines, traditional symbol from Santiago. The five routes that lead to the cathedral are used as a start for the project. The result of this drawing is transported to the terrain, where the access ways are divided, forming the buildings that mimic the mountain's morphology.

The geometry resulting from philosophical concepts and the various relationships established by Eisenman are folds and pleats that compose the expressionist scenario, which completely integrates to the local landscape.

## CONCLUSIONS

The digital culture brought deep mentality changes, which principles and potentialities impacted architecture, driving it toward the experimentation and the search for new architectonic concepts, where the spaces and its forms present other characteristics, until then unexplored, which break with established patterns when presents new ways for spatial conception.

The approximation of other areas of knowledge, like mathematics, computing, biology and philosophy, drove new postures in the area of architecture.

The contemporaneous architecture, produced essentially with digital resources, incorporates a growing formal-spatial complexity resulting from some possibilities of manipulation and control by means of computational tools.

The continuous evolution of the digital media has made available unprecedented resources and possibilities for architects, which went far beyond the representation, because this trend is supported on methodology, capable of producing architectonic objects of various complexities, in the conception and the production, based on a theoretical innovative body that embraces other disciplines.

## REFERENCES

- Bitarello, Breno; Braz, Andre; Campos, Jorge Lucio de. "Lev Manovich e a Logica Digital: Apontamentos sobre a linguagem da nova mídia". Acessado em 15/05/2012 em [www.bocc.ubi.pt/pag/bitarello-braz-campos-lev](http://www.bocc.ubi.pt/pag/bitarello-braz-campos-lev)
- Castells, Manuel. A sociedade em rede. São Paulo: Paz e Terra, 1999.
- Eisenman, Peter. Visões que desdobram a Arquitetura na época da mídia eletrônica. Campinas - SP: PUC (n. 3).
- Lev Manovich The Language of New Media, disponível em <http://www.manovich.net/LNM/Manovich>, acesso em 28/08/2012
- Mc Dowell, Ivan. Os meios digitais na arquitetura do grupo Nox. Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura - PROPAR, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito para obtenção do título de Mestre em Arquitetura. 2009

# DIGITAL ORNAMENTATION

## THE INVERSE RELATION BETWEEN INFORMATION AND FORM

DAVID ABONDANO

ARC Enginyeria i Arquitectura La Salle  
Universitat Ramon Llull, Barcelona - Spain

### ABSTRACT

A redefinition of the relationship between form and material and the abandonment of Nature as a model were two of the main consequences of industrialization over architecture. In the first case, industrial production suppressed the craftsman's knowledge about the material and the associated techniques, once essential in the form-making process; in the second, nature was replaced for the machine as model for architecture. Consequently, the graphic and narrative qualities of the architectural ornament disappeared as the adorned envelope was replaced by flat continuous surfaces enabled by the industrial process. Nowadays, material properties and nature are being reintroduced in architecture with the help of digital technologies. But just as the machine changed architectural ornament through the shift from natural to industrialized materials, ICTs are giving rise to new forms of architectural expression which result from the turn. An industrial materiality is giving rise to a digital materiality. Mono-materials are being replaced by smart and hybrid materials, while nature has become an operational model as opposed to the visual or iconic one it used to be, its inner qualities and processes are being decoded. An innovative ornamentation is rising today as a result of the emerging relations between architecture, a new digital materiality, and nature's operational approach.

Keywords: New Materiality, Digital Ornament, Physical-based ornament, Phenomenal-based ornament

### INDUSTRIAL MATERIALITY AND ITS INFLUENCE ON DESIGN METHODS

Since the second half of the nineteenth century, the new material and productive conditions brought about by industrialization –mechanization, mass production and specialization– were reflected on architecture through the use of materials such as glass, iron and concrete. These materials embodied new constructive, structural and spatial possibilities which were then exploited by the Modern Movement. The rising "materiality" of the nineteenth century stimulated the development of new architectural language and thinking. While glass brought new spatial relations through the development of a physical and conceptual transparency, the steel and concrete made the frame structure possible.

Besides providing *new* materials, the industrialized production system led to a conceptual shift of materiality, as the uniformity and homogeneity of the mechanized production was transposed to the products. The quest for utmost efficiency, aimed at maximizing and speeding-up production, disparaged craftsmanship as the slowness and irregularity of its production methods were at odds with the machine. The bonds that held the craftsman's knowledge (*techné*) and the materials were broken by mechanized production. While the quality of craftsman's work depended on the knowledge of the material and techniques, the industrial worker was valued for his capacity to produce more in less time. Hence, before industrialization, craftsmen were aware of the complexity and heterogeneity of materials. In the medieval time, a blacksmith might have been working one week with a type of iron, and the next week he might do so with an iron obtained from another mine: he was continuously facing materials of different qualities, and had to adapt his knowledge to them. His task was to take advantage of the specific qualities of each material. In other words, material qualities were part of the form-making process as the craftsman didn't impose a form from the outside; on the contrary, form was conditioned by material properties. As materials became homogenized through the industrial production, their heterogeneous properties -once taken into account by the craft production in the form-making process- were forgotten and downgraded to a secondary role: the regularity of the machine processes required regular materials. Material knowledge became detached from the design process, a fact that reinforced Renaissance *disegna*, according to which the production of form is an intellectual activity: the design process became exclusively intellectual, so materials were just assigned to a given shape without any consideration of its multiple and heterogeneous properties.

## THE RETURN OF NATURE AFTER ITS DENIAL BY MODERNISM

Although the break between the form-making process and the material qualities is clearly reflected in the comparison between craft and industrial production, its origins need to be found in the Scientific Revolution rather than the Industrial Revolution. Since the Renaissance, the world had been differentiated between quantitative and qualitative, objective and subjective, the sensory and the rational or, body and mind. From these distinctions, the scientific study of nature relied exclusively on what appeared tangible in the world, in other words, in what was measurable, repeatable, predictable and ultimately controllable. The Galilean distinction between primary and secondary qualities was followed by the Cartesian separation between mind and body (*res cogitans, res extensa*). For the emergent scientific thinking, the understanding of materiality would be exclusively based on the quantitative, objective and measurable physical properties; everything that could not be expressed in mathematical terms was deemed to be irrelevant. Therefore, not only material properties, but all properties of living organisms that could not be observed under the scientific methods -smell, sound, color, emotions or sensations-, were neglected. Thus, science paved the way to a mechanic model of the world: one in which the role of Nature is taken over by the Machine.

The understanding of the Universe as a machine, and the representation of reality in mathematical terms, effectively prompted the decline of nature as a model for arts and architecture. Nature was expelled from modern architecture since it was no longer useful as an organizing category of architectural thinking. The new model fitted perfectly with the Rationality of scientific thinking along with the industrial standardized production: pillars of Modernism. But in the late 1960s nature started to be reintroduced in architecture, since Cartesian reductionist analysis was questioned by the fact that knowledge was fragmented and isolated, diminishing human capability to relate the separated parts, along with the facility to recognize the underlying structure behind the *whole*. Richard Buckminster Fuller, aware of this conceptual abruption, saw that specialization prevented a holistic perspective by which the process of understanding focuses on how things influence one another

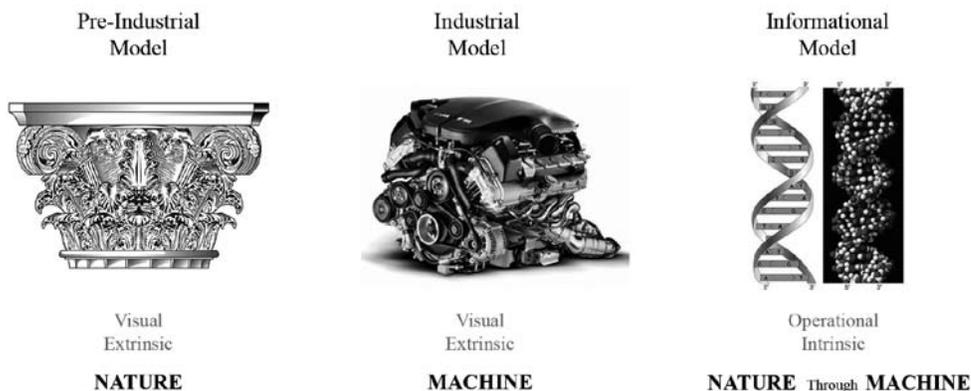
within a whole, instead of looking at them in isolation, that is, System Thinking. At the late 1960s, System Thinking was introduced in architecture through cybernetics. Gordon Pask, in his article *The architectural relevance of cybernetics*, highlights the idea that architecture and cybernetics share a common philosophy -*philosophy of operational research*-. Then, architects would be the first and foremost system designers. For Pask, buildings were part of an ecosystem in which they interact with its inhabitants while determining their behavior. Buildings started to be understood as interactive objects and the built environment as an interactive space.

Along with the *operational approach*, the geometrical representation of the DNA structure as a double helix was crucial for today's understanding of nature, and consequently, for its reintroduction in architecture: "*The two meters high model, photographed for Time magazine in the spring of 1953, became a new emblem of nature*". Once again, a scientific model of reality opened the possibility to act on nature in different ways by describing its enigmatic configuration in a language that scientist could manage. Nature, and with it materiality, was now accessible as never before; a fact, that not only enabled the reintroduction of material properties into the form-making process, but also natural properties of living organisms which did not conform to the previous mechanical model of nature. The growing capacity to manipulate organic and inorganic structures and processes was enhanced by cybernetics and by computers, as these fields enabled to address the complexity of natural processes and interactions which were diminished by specialization: with DNA's geometrical representation and computers development, nature's inner structures and processes could be decoded in order to reproduce them artificially through architectural design -either for aesthetic, structural, constructive, or performative purposes-. After its denial by Modernism, nature could be reintroduced in architecture but in an unprecedented way: after Industrialism, Nature, as a model, was replaced for the machine; after Informationalism, Nature was reintroduced through the machine, that is, through computers (Figure 1).

Thus, Nature was no longer an iconic model to be visually or formally reproduced. Its apparent qualities became irrelevant as its inner structures and processes gained importance. Nature's relevance shifted from its extrinsic to its intrinsic qualities; in other words, its understanding changed from a visual to an operational approach, making the process more important than the product, the system more important than form, and performance more important than the object. After being seduced by digital imagery during the 1990s, architects began to recognize that computers enabled them to rethink materiality thanks to their capacity to work with the thoroughness that was not possible before that advent of these tools. Computers open the possibility to design and produce hybrid and smart materials that combine properties that used to be mutually exclusive. The reintroduction of nature through cybernetics -as a theoretical approach which introduced the idea of interactivity- and computation -as a practical tool with the capacity to manipulate materials at a genetic level, and reproduce the complexity of natural processes-, paved the way to an innovative, multifunctional and responsive ornamentation, where its form is determined by the buildings capacity to decode environmental information as well as the intrinsic qualities of materials.

## **FROM DIGITAL MATERIALITY TO DIGITAL ORNAMENTATION**

The rejection of Nature as an architectural and ornamental model during Modernism not only responded to the influence of Cartesian Mechanicism but it was also linked to the development of new industrial materials for construction. For example, in the case of building envelopes, stone was replaced by stucco as it was more durable and resistant, a fact which enabled the development of the *continuous-flat surface* which characterized modern architecture. Thus, through plastering, architectonic ornament ceased to be



1

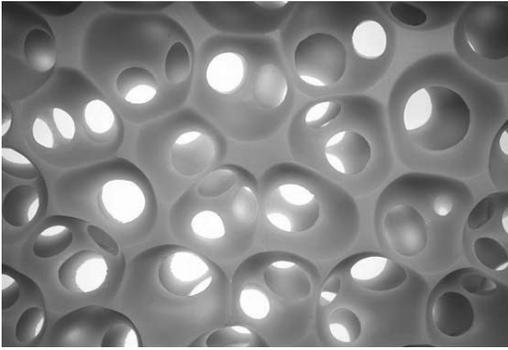
figurative and sculptural and became abstract and geometric thanks to the homogeneity of the material. Consequently, ornament started to be seen as superfluous by modern architects who overlooked that the function of ornament is to communicate a message, to transmit information through form. With the rise of industrialized materiality, drawings and sculptures were suppressed in the architectural language: the material became the medium to transmit the message of a *new morality*<sup>1</sup> which saw in constructive materials an aesthetic resource by applying them with sincerity, simplicity and honesty.

Figure 1  
Reintroduction  
of Nature  
in Architecture

While Modernism saw in the simplicity of construction and the pureness of form a way to found a new style that could bring into line architecture with industrial development, nowadays the structural and material engineering digital practice enables the design of synthetic multifunctional materials rather than simple materials assigned to preconceived shapes. Research on composite and smart materials, and the tendency to solve more and more problems at the level of material design rather than structural design, is bringing back the multifunctional and heterogeneous materiality of pre-industrial (craft) production, in which material properties and behavior were inputs in the generation of form. Today's digital instrumentation of matter offers the possibility to work with concepts such as *digital materiality*, a new materiality that results from the combination of analog and digital, atoms and bits; *supramateriality*, an expanded notion of materiality which includes the physical and the non-physical; or, *material-based design computation*, which aims to integrate material properties and environmental conditions within a computational form-generation processes of design.

OMA's research for the Prada stores in Los Angeles and New York is a pioneering exploration of Allen's *digital materiality*. In order to find a non-systematic way to hang and exhibit clothing, OMA started a research on materials which led them to a sponge: a material whose consistency, in particular the arrangement of its voids, suggested them a non-conventional way to exhibit clothes which could be hung out freely throughout the perforations of a sponge-like surface. The research was determined on the one hand, by the production of a translucent resin with fire proof qualities, and on the other, by the fabrication of a cast model with the hole sizes, percentages of openness, and shape set by architectural designers. The first goal was achieved with help of BGB Enterprises,

<sup>1</sup> The new morality encouraged by Modernism -grounded on the idea of *truth* of Viollet-le-Duc and the *new morality* of Van de Velde- was clearly reflected in Le Corbusier Purism, or in the "*Less is more*" belief of Mies. While Le Corbusier saw in the rectangular prism without ornamentation a healthful morality as it exposed order, uniqueness of ideas, and constructive unity; Mies saw that "*Simplicity of construction, clarity of tectonic means, and purity of material reflect the luminosity of original beauty*".



2



3



4

Figure 2  
OMA's Foam

Figure 3  
Serpentine  
Gallery 2002

Figure 4  
Beijing  
Olympic  
Stadium

a plastic company; the second required the production of digital and analog models. After hundreds of handmade prototypes, the design team realized that they did not fulfill the production expectations in terms of shape and finishing, so it was decided to create a 3D model -based on the handmade models- in order to produce the definite aluminum cast. As Chris van Duijn -OMA's material researcher- explains: by using the 3D model it was possible to produce a sponge with precise geometry, perfect texture, and perfect openings, which was also easily molded . The hybridization of the analog and virtual models was crucial in the creation of OMA's foam (Figure 2): on the one hand, it is a *digital material* because its configuration was determined by the interaction between (analog) handmade models and (digital) 3D modeling techniques; and on the other, its material form was the result of using digital methods such as stereolithography and CNC controlled milling.

OMA's material research for Prada is in line with the ornamental approach which characterized the first decade of the 21st century as exemplified by buildings such as the 2002 Serpentine Gallery by Toyo Ito and Cecil Balmond, (Figure 3) or the Beijing's Olympic Stadium by Herzog & DeMeuron (Figure 4). In these projects, ornamentation is seen as a mechanism that not only enables the link between architecture and culture, but that renders the invisible forces of society . If we adopt the standpoint of historical materialism -*"the mode of production of material life conditions the general process of social, political and intellectual life"*, - then we can argue that while Le Corbusier's Domino project (1919) exposed through its frame structure the linearity, homogeneity, and simplicity of standardized production, Prada's stores in Los Angeles and New York, the Serpentine Gallery, or Beijing's Olympic Stadium, render the plurality, the heterogeneity and the complexity of today's global culture and economy. In these last buildings, their structure -unlike the structure of the Domino project- is not reduced to a system to carry out loads; it also acquires ornamental functionality due to its capacity to interpret and visualize the invisible forces of society. These *network structures* not only exhibit the ideological overcoming of Rationalism through their non-linear organization, their multi-functionality, or their complexity; above all, they mirror the structure of the global production, economy and culture -systems grounded on the information flows supported by the information networks.

The structural-decorative envelope of these new buildings differs from modernist envelopes in so far as their surfaces fulfill a multifunctional purpose. Earlier in history there were gothic cathedrals where the structure had ornamental functions as the exposure of physical loads and forces, through structural elements, became the *ornamental message*. But in any case, the structure was clearly differentiated from the decorative-ornamental elements; on the contrary, the *network structure* of these *hybrid surfaces* precludes this



5



Figure 5.  
ICD/ITKE  
Research  
Pavilion 2010

Figure 6.  
Media-TIC  
Building

6

differentiation: before the advent of digital technologies, the ornamental elements of a building were clearly differentiated from the tectonic ones. But the hybridism of the *digital surface* blurs the limits between the tectonic-functional and ornamental-decorative qualities of the envelope. If before it was possible to talk about the *function of ornament* -to transmit a message through form-, today we are closer to an *ornamental function* -as tectonic and constructive elements acquire ornamental qualities-. In the pre-digital era, *the function of ornament* was to transmit a message through form; that is, the message-information of ornament was always determined by form. But with today's digital technologies, the form -and with it the material- can be determined by the information provided by the material itself, or by the information exchange between a building and its environment. In this sense, architecture is favoring a continuity between matter and information through the use of digital technology applied to matter; a new digital ornamentation is emerging today.

## THE INVERSE RELATION BETWEEN INFORMATION AND FORM

A building's envelope is the place in which the new relations between information and form manifest just because, as Jacques Herzog argues: "[...] *the surfaces of a building should always be linked to what happens inside of a building [and] how this link is going to occur is the architects business*".

As we have seen, the integration of inner material properties and environmental conditions within the form-making processes is leading to a new *digital ornamentation*. However, the full integration of the two design strategies has not been achieved yet. The split between the material and the environmental approach suggests two categories of *digital ornamentation*: a *physical-based ornament*, oriented to exploit the inner qualities of *natural products* (matter) within the design process -e.g. the ICD/ITKE Research Pavilion 2010 (Figure 5)-; and a *phenomenal-based ornament*, oriented to reproduce natural processes through the building's interaction and its environmental performance -e.g. the Media-TIC in Barcelona (Figure 6)-. The analysis of these two buildings can help us to understand the inverted relation between information and form.

### Physical-based ornament: form generative processes informed by material properties

The design process of the ICD/ITKE's Research Pavilion 2010 can be considered as a *form generative process* in which form emerges from the inner properties and behavioral constraints of the material, in this case, plywood strips. The result of this approach, closer

Figure 7.  
Physical  
form-finding  
experiments

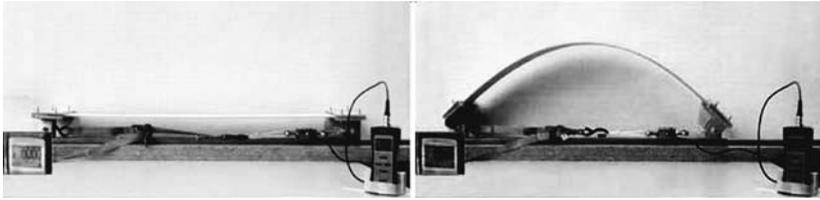


Figure 8.  
Geometric  
description and  
distribution  
of joints

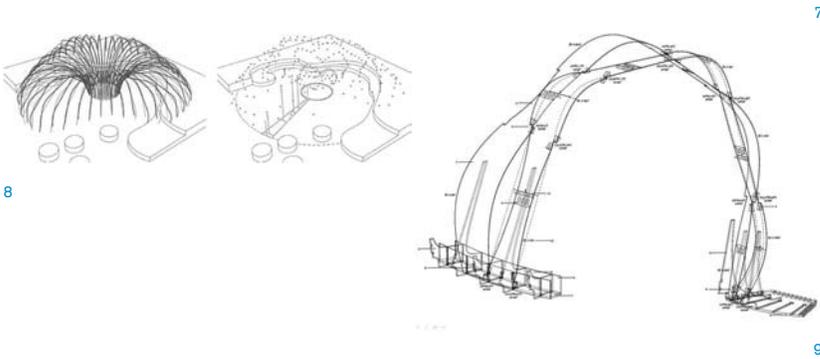
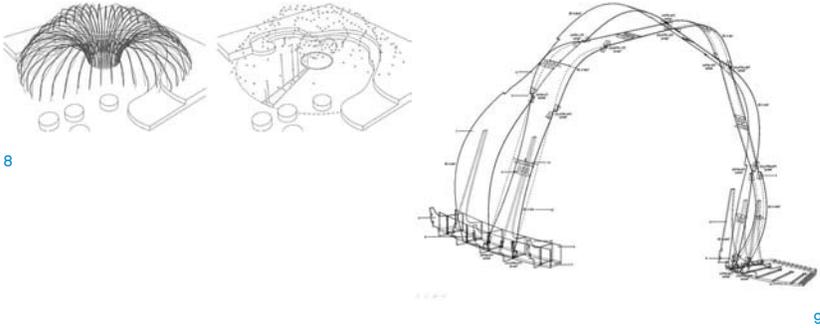
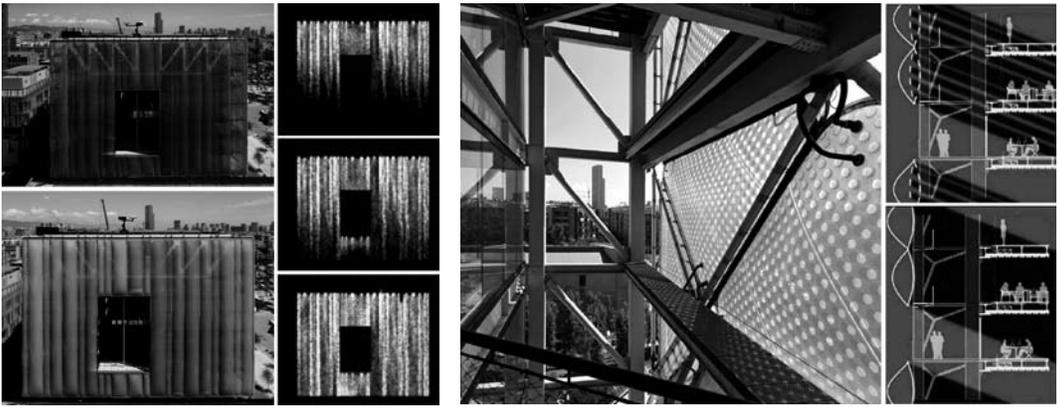


Figure 9.  
Detailing for  
digital  
manufacturing



to a *behavior design* rather than *object design*, was “a novel bending-active structure, an intricate network of joint points and related force vectors spatially mediated by the elasticity of thin plywood lamellas”. The main input in the form-making process was the information -obtained from physical form-finding experiments (Figure 7)- of the structural and material properties of wood, more precisely, it's elastic bending characteristics. This *material information* was traduced into a geometric description -polyline structure (Figure 8)- thanks to an information model -a parametric model and a multi-subroutine script-, from which a geometrical model was created (Nurbs Surface Geometry). The design model was the definitive geometric output of the informational model: the contour and curvature of 80 unique 6.5 millimeter thin plywood sheets -constructed from 500 geometrically unique parts as each strip had 6 to 7 different sections-, its geometric approximation to neighboring strips, and the morphological differentiation of the joint location, were defined through computational algorithms. The plywood sheets fabrication was assisted by a 6-axis robot arm, but what made the fabrication possible was that fabrication and construction processes were inherent to wood's material properties and behavior constrains; in other words, fabrication restrictions were integrated in the design process, ensuring the pavilions construction through a straightforward and rapid assembly eased by the linkage between geometric data and robotic fabrication (Figure 9).

The built form of this *bending-active* structural envelope was the result of the equilibrium state between the embedded forces ; an equilibrium grounded on the physical qualities of matter and the structural-geometrical constraints of form, so any formal transformation is disabled as it could alter the stability between these inner forces. Consequently, the possibility of a responsive-interactive surface is disabled by this *physical-based ornament*, as the responsiveness and interactivity of a building are *phenomenological* characteristics which imply the transformation of the object in time . Before the advent of digital tools, the integration of physical-material properties within the design process was hindered as the classic representational tools in architecture -plans, sections, etc.- were incapable of representing material behavior. Nowadays, decoding intrinsic material information in order to inform the design process is an affordable option to architects as the integration between material properties, structural behavior and form, is eased by CAD technologies which are able to traduce material “coded” information into architectural form-making inputs.



10

11

## Phenomenal-based ornament: interactive and responsive architecture

Information in digital media is not written in natural language but in a binary code which is translated by computers into signs which are presented through a displaying device: the screen. Similar to a computer's screen, the south-east and south-west façades of the Media-TIC building in Barcelona act as displaying devices, as interfaces, between its users and its environment. Rather than an "envelope", these façades operate as a "skin", that is, as an exchange system between the interior and the exterior that helps to maintain the proper functioning of the overall system. Environmental conditions such as temperature, humidity, or pressure, are "decoded" through a system of monitoring sensors which capture these phenomena, in order to translate them into useful information to improve the building's energy performance. With these sensors and other monitoring devices, feedback loops of information are generated between the building and its environment. This way, atmospheric conditions are translated into an architectural expression from which the *ornamental message* arises: the environmental commitment of architecture, supported by the ICTs.

Media-TIC's southern façades -contrary to the mono-material envelope of the ICD/ITKE Research Pavilion- are made of multi-layered materials in which non-physical elements are included -Moussavi's notion of *Supramateriality*-, materials which change physical configuration of the façade, in response to real-time demands (e.g. solar radiation). Both façades use pneumatic Ethylene Tetrafluoroethylene (EFTE)<sup>2</sup> cushions, inflated with low-pressure air to provide insulation and resist wind loads. The south-west façade is a screen of vertically cushioned EFTE panels in which -according to the environmental information captured by sensors- nitrogen is pumped to create a dense-opaque gas layer which works as a solar filter thus improving the thermal insulation and reducing the solar factor from 0.45 to 0.10 (Figure 10). The south-east façade uses individually climatic sensory-controlled cushions to control shade and thermal insulation. Each cushion is made of three layers of EFTE which make two inflatable chambers: the outer layer is transparent while middle and inner layers have a pattern that produces an opaque single layer by joining them through a pneumatic system which varies the air flow between the chambers (Figure 11). Along with the photovoltaic panels on the roof, the building's energy performance is improved with sensors in the lobby and common parts, which adjust the performance services according to its occupancy.

Figure 10  
South-west  
façade's. Injection  
of Nitrogen fog.

Figure 11  
South-east  
façade. EFTE  
layer's pattern and  
pneumatic system.  
Diagram of building's  
interaction  
with environment.

<sup>2</sup> EFTE is material that does not degrade under ultraviolet light or atmospheric pollution. When used as a building's envelope, its anti-adhesive properties make it a self-cleanable material under the action of rain.

As opposed to the static equilibrium of *physical-based ornament*, in *phenomenal-based ornament*, equilibrium is achieved through motion, making it relative, dynamic and provisionary: motion driven by the constant update and actualization<sup>3</sup> of the building to the environmental demands. The building's responsiveness to these demands is tantamount to the operation of a digital screen: the physical structure of the object remains while the information displayed in the surface changes continuously.

## CONCLUSIONS

This work exposes the linkage between technology, materiality and architectural form. Thus, the new instrumentation of matter and the return of Nature as an architectonic model are seen as a consequence of integrating digital technologies in architectural design and construction processes. The rise of a digital materiality, along with an operational approach which considers nature as a system, has given rise to a new understanding of the relationship between matter and information. *Digital ornament* is the result of this new understanding in which material and environmental information take part in the form-making process. In much the same way as non-physical elements are integrated in today's *digital materiality*, *digital ornament* also uses phenomena as a communicative resource which in turn gives rise to provisory configurations determined by information flows. The function of ornament -initially, to transmit information through architectural form- has been enhanced in the digital era. While the perception of form relies on both matter and phenomena, the messages transmitted by ornament have become both intellectual as well as sensorial.

## ACKNOWLEDGMENTS

I would like to thank my PhD thesis advisor, Professor Leandro Madrazo, the time dedicated to review this manuscript as well as his suggestions and comments.

---

<sup>3</sup> *Actualization* is creation, the invention of a form driven from a dynamic configuration of forces and purposes. Virtual things tend to actualize, although it is doesn't concretize in a formal way .



**VERS  
LA MATÉRIALITÉ**

**-**

**TOWARDS  
THE MATERIALITY**



# THE GRASPING HAND AS FORM GENERATOR

## GENERATIVE MODELLING IN PHYSICAL AND DIGITAL MEDIA

MARIA DIMITRIOU, SOPHIA VYZOVITI

Department of Architecture, University of Thessaly - Greece

### ABSTRACT.

Grasping, which comprises one of humankind's primitive reflexes is considered as an instinctive gesture that calibrates and grasps materiality. Its' material effects are illustrated with a case study in crumpling, a randomly folded surface condition whose complex geometry is generated dynamically by the force ingested by the human hand. The paper addresses combinatorial methodologies for form generation that employ both computational tools and material processes making evident a symbiosis between the two. Exploring generative processes for material driven free-form surface generation, the paper demonstrates computational models of crumpled surfaces and their fabrication potential.

Keywords: design methodology, form generation, folding, crumpling, grasping

### INTRODUCTION

Material driven form generation experiments have a long tradition in the architectural avant-garde. At the preparatory workshops led by Joseph Albers at the Bauhaus during the 20's form generation was directly done with material handling, (Bergdoll & all 2009) intending to familiarize students with abstract spaces deriving from surface transformations caused by the stress and strength of paper. Since the mid 90s surface transformation morphogenetic studies in paper and other sheet materials have been exacerbated and associated with strategies of folding, surface manipulation and the creation of artificial terrains (Allen 2011). Material computing is a recent discipline specific term that describes the analogue form-finding processes complementing the new digital design tools that might in fact be described as quasi-physical form-finding processes (Schumacher 2007). Following the evolution of the notion of surface in contemporary architecture, we observe that digital design methodologies have paradoxically revamped physical modelling, in an expanded notion of material computing which not only complements but also challenges the overall form, distinct component, and texture generation. In this framework the paper addresses combinatorial methodologies for free-form surface generation that employ both computational tools and material processes outlining interdependencies between the two.

Grasping, which comprises one of humankind's primitive reflexes (Schott & Rossor, 2002) is considered in the context of this paper as an instinctive gesture that calibrates and grasps materiality. The grasping hand operates as a dynamic free-form surface generator, ingesting patterns of stress upon a sheet that affect its performance and may in retrospect provide guides for interaction with the material such as creases, bends, and twists.

The material effect of grasping comprises the case study in focus. Crumpling, a randomly folded surface condition whose free-form geometry is generated dynamically by the force ingested by the human hand is investigated as a case of dynamic free-form surface generation in physical media. As an architectural metaphor crumpling attends to a detailed rearticulating of the surface's texture that captures causal interactions among its component parts, in the prospect of dual materiality where the intertwining of material and digital layers orchestrate emergence mechanisms to accentuate its response ability.

## **METHODOLOGY AND TOOLS**

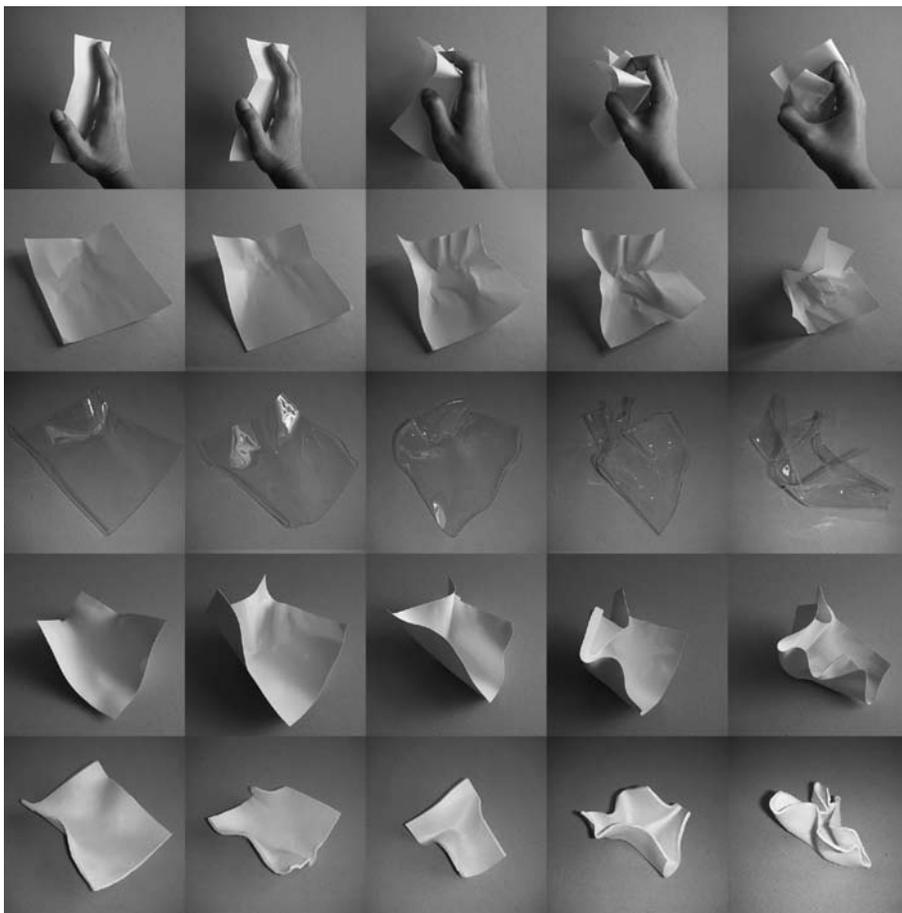
The paper demonstrates the form-generative potential of crumpling in a bottom-up experimental approach. The complex geometry of crumpling which has not yet been adequately represented computationally is approximated through standard digital modelling tools aiming to ground methods of digital reconstructions and simulations. Research methodology employs the notion of generative modelling, shifting the focus from objects to operations and defining form as a sequence of processing steps, rather than just the end result of applying operations. The predominant paradigm of generative modelling in architecture is computational. Celestino Soddu (1999) defines generative design as a morphogenetic process using algorithms structured as not-linear systems for endless unique and un-repeatable results performed by an idea-code. The generative principle for architectural modelling as a sequence of processing steps, rather than just the end result of applying operations where shape representation provides a set of generating functions has been demonstrated in material driven morphogenetic processes and particularly in the case of surface transformation through folding (Vyzoviti, 2003).

The methodology for this case study in crumpling explores the symbiotic relationship between physical and digital form generation processes, a condition which can be considered as intrinsic to the surface as an architectural medium. Within the current debate in digital architecture the notion of surface appears to be a case of hybridization between the abstract and the ultra-material (Picon 2004). Based on computational geometry and code the surface is primarily abstract, yet it constantly reinvents its materiality through advances in digital fabrication. In this framework the geometry of crumpling is investigated in terms of generative modelling exploring sequences of processing steps calibrating a spontaneous act of random surface generation in continuum from design to fabrication. The experiments presented in the next section are structured as bottom-up operational sequences that initiate with a detailed interpretation of crumpling and further proceed with modelling employing a combination of digital tools, including image processing (Photoshop), 2D pattern generation (Autocad), surface modelling (Rhino), kinematics simulation (Freeform Origami) and fabrication support (Rhino, Pepakura Designer).

## **GENERATIVE MODELLING EXPERIMENTS IN CRUMPLING**

This section explores the geometry of crumpling through generative modelling experimenting with physical and digital media and outlining interdependencies and feedback between the two. Four experiments are analysed: (3.1) sheet crumpling, (3.2) crumpled surface simulation on the basis of developed crease pattern employing Freeform Origami Simulator (Tachi 2010), (3.3) image based crumpled surface generation in Rhino and (3.4) crumpled surface reconstruction in Rhino approximating grasping gesture anatomy. The physical experiment with sheet crumpling (3.1) provides the material basis of the computational models. In conclusion to the experiments some proofs of concept for fabricating geometric approximations of crumpled surfaces are demonstrated employing methods of sectioning and tessellating suitable for future architectural applications.

Figure 1.  
Sheet crumpling,  
hand prehension  
and material  
effects:  
(from top) paper,  
plexiglass, acrylic,  
clay



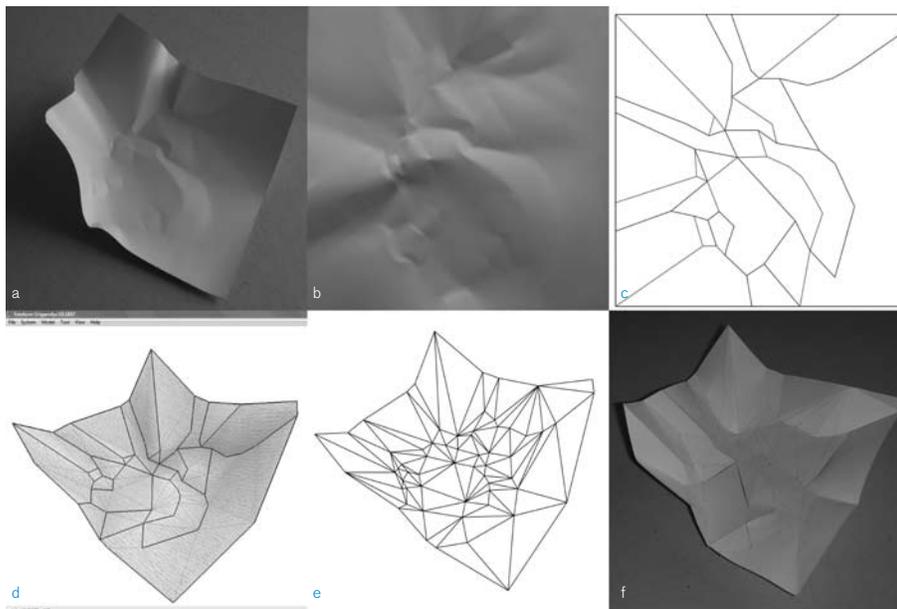
1

### 3.1 Sheet crumpling

The common definition of the verb to crumple means to crush together and press into wrinkles. As a noun it stands for an irregular fold, crease or wrinkle. When a sheet of paper is crumpled, the paper acquires permanent scars displaying the distribution of stress along the surface. These patterns of stress, the irregular creases that wrinkle the paper surface reveal that crumpling has focused the stress at some points, exceeding there the limit yield of the material and leading thus to irreversible plastic deformations (Amar & Pomeau, 1997). The morphology of a crumpled membrane is a network of straight ridges or folds that meet at sharp vertices (Lobkovsky & Witten, 1996). Crumpled sheets have been investigated by physicists with respect to their buckling properties and by mathematicians through the geometry of the developable surfaces. More recently crease morphology has been investigated in the domain of architectural geometry primarily associated with curved folding (Killian & all, 2008).

In the first of the physical experiments in sheet crumpling (Figure 1) a 15\*15cm piece of opaline carton is clasped firmly in hand.

Under pressure the paper buckles and gradually collapses into a condition of demonstrating maximum resistance to further compression. Documented in still frame photography, the process is segmented in five distinct phases demonstrating the versatility in the hand's prehension. The grasping experiment is executed iteratively using paper as well as acrylic, plexiglas and clay. The selected sheet materials differ in terms of intrinsic properties



**Figure 2**  
Crumpled surface simulation process: (from top left)  
a- Crumpled sheet.  
b- Developed sheet.  
c- Rationalized crease pattern.  
d- Reconstruction in Freeform Origami.  
e- Mesh geometry in Rhino.  
f- Fabrication via Pepakura Designer.

2

(thickness, texture, transparency and flexibility) as well as the processes that render them malleable (damping and heating). During the crumpling process the results show similarities in overall form configuration, rendering the hand prehension effects visible in free-form surface generation. Paper is the only material that manifests creasing. The crease patterns that derive by developing the crumpled paper sheets will be demonstrated as the minimum necessary geometric representation to further the operational modelling process of crumpling.

### 3.2 Crumpled surface simulation on the basis of developed crease patterns

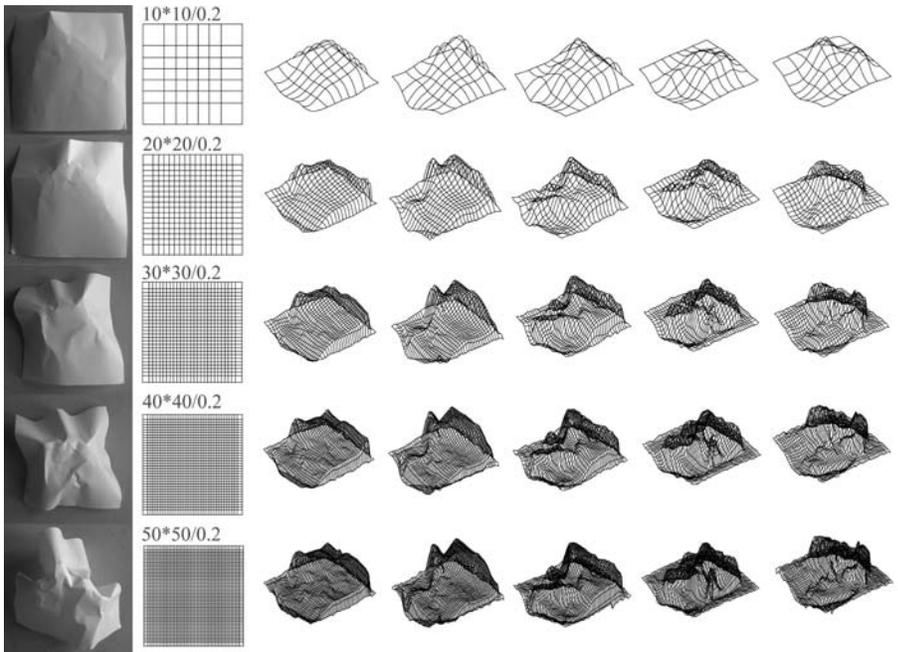
Crumpled surface reconstruction and crumpling simulation on the basis of developed crease patterns relies on the rationalization of the complex network of straight and curvilinear ridges and folds into a deployable tessellation. The deployment ability of a crumpled paper sheet corresponds to its buckling threshold and in this sense its kinematics are limited compared to a folded plate deployable surface. However the experiment (Figure 2) proves that a rationalized crease pattern is sufficient to simulate its minimum kinematics.

An extensive explanation of the rationalization process of the complex network of creases of a paper crumple into a foldable pattern, while geometrically valuable, escapes the scope of this paper. There is substantial research on folded plate origami related tessellations (Pellegrino & Vincent 2001), (Buri & Weinand, 2008), that provide this experiment with knowledge supporting a coherent rationalization of the complex crease network geometry into a folded plate tessellation. The rules employed in this case include:

- \_ the approximation of crescent shaped creases into closed polygons,
- \_ the 'two colourable rule' for the notation of convex and concave creases
- \_ the 'inextensionality constraint'

The 'inextensionality constraint' is necessary condition for flat fold ability, also known as compact packaging. Pellegrino and Vincent (2001) prove that inextensional folding of a membrane requires that whenever different creases meet at a common point there should be at least four folds, of which three have one sign, and one fold has the opposite sign.

Figure 3  
Height fields  
from crumpled  
sheet imagery.



3

The inextensionality constraint can be applied on origami based deployable surface patterns, enriching the basic origami rule that crease patterns are two colourable, that is, either concave creases (valleys) or convex creases (mountains).

The experiment employs the Freeform Origami open source program developed by Tomohiro Tachi (2010). Freeform Origami is a system for computer based interactive simulation of the kinematics of origami that operates calculating the configuration from the crease pattern as his previous Rigid Origami Simulator (Tachi 2009) with enhanced modelling capability. In this experiment Freeform Origami is employed to simulate the paper's buckling and also to extract three-dimensional mesh geometry, appropriate for design development and fabrication.

### 3.3 Image based crumpled surface generation in Rhino

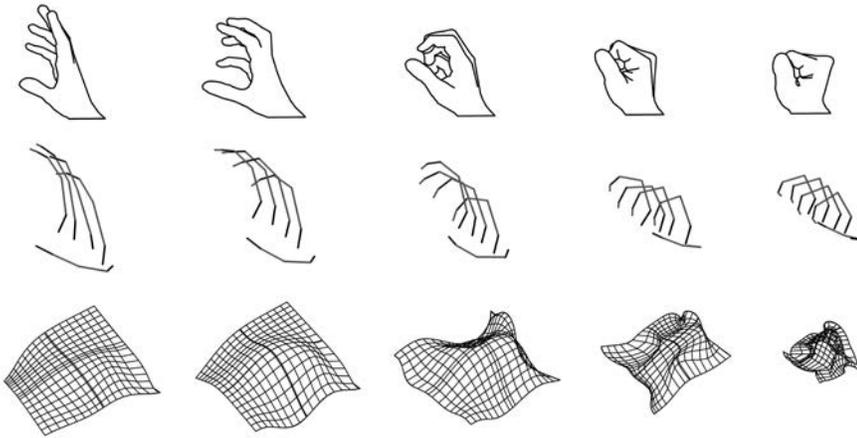
The experiment presents a method for bitmap-driven, geometry definer.

The technique (Figure 3) offers a representation of crumpled surface conditions rather than a reconstruction.

The Rhino command height field<sup>1</sup> is used in this experiment as a tool that converts bitmap image data to computable geometry. In this case the representation of crumpled surface conditions, requires no geometric analysis, and lacks accuracy. Nevertheless, height field digital terrain models make evident the intensity of the ridges and folds and the inflection points of the surface. The experiment is based upon the material produced in the physical sheet crumpling experiment described in section 3.1: images of five distinct crumpling instants generate a series of free-form surfaces through variation of height field grid density. Increase in grid density affects oscillations and detail within the terrain relief. While with grid 10/10 terrains are smooth and uniform, grid 50/50 terrains there are produced more height-difference curves. The overall height of the 3d model is stable to make surface curvature discernible. Despite the lack of geometrical analysis in the height

<sup>1</sup> A heightfield can be used in bump mapping to calculate where this 3D data would create shadow in a material, in displacement mapping to displace the actual geometric position of points over the textured surface, or for terrain where the heightmap is converted into a 3D mesh. (Wikipedia)

**Figure 4**  
Crumpled surface  
reconstruction  
approximating  
prehension  
analysis in 5 steps



4

field process, formal effects of crumpled surface conditions -multiple curvature, crescent shaped ridges, mountains and valleys- are achieved.

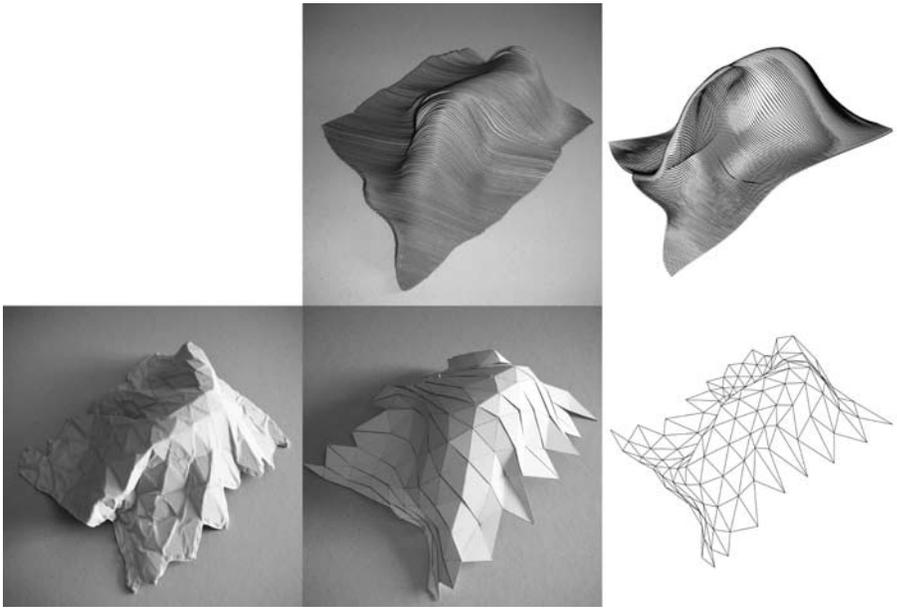
### 3.4 Crumpled surface reconstruction in Rhino approximating prehension anatomy

The human hand has small bones and is extremely versatile manifesting 28 degrees of freedom. The process of taking hold of an object for a purpose of manipulating it, transporting it or feeling it is called prehension. MacKenzie & Iberall (1994) define prehension as the application of functionally effective forces by the hand to an object or a task given numerous constraints. Human prehensile behavior comprises a cross-disciplinary field of study between psychology, cognitive science, kinesiology, neuroscience, medicine, computer science, and robotics. The taxonomy of human grasping<sup>2</sup>, displays a wide range of prehension positions between power and precision grips. During sheet crumpling, the human grasp is dynamic, it gradually transforms from precision to power grip. In this experiment (Figure 4) the anatomy of the hands' prehension during crumpling provides generative guidelines for the definition of surface geometry.

The grasping procedure is segmented in five stages that make evident prehension transition from a precision grip to a power grip. The crumpled surface model is generated in two sets of operations. Initially the bone structure of the hand, segment division of fingers and thumb are designed with simple curves. The bone structure- regulating segments- produce a single surface that is further smoothed and manipulated simulating the palms function during crumpling. Crumpled sheet free-form results from a combination of forces ingested of the finger bones as well as the palm. Surface manipulation by control points employed a 15 \* 15 UV grid. Control points manipulations simulated the crumpling process in the physical models as well as its material effects. The experiments resulted in the most accurate approximations of the physical models.

<sup>2</sup> Human Grasping Database available on <http://grasp.xief.net/>

Figure 5  
Fabricated  
prototypes by  
sectioning (top)  
and tessellating  
(bottom)



5

### 3.5 Architectural Calibration and Fabrication

Once crumpled surface geometry becomes computable, architectural calibration can initiate. The range of design applications of crumpled surface free-form geometry, which may be easily imagined in the context of the current developments in digitally driven architectural design, escapes the scope of the current article. The focus lies upon fabrication techniques that operate as proofs of concept for architectural applications. Selecting the surface corresponding to fourth stage of crumpling prehension (Figure 4) we demonstrate some of the most common digital fabrication techniques for free-form surfaces: sectioning, tessellating, and folding (Iwamoto, 2009). We also demonstrate (Figure 5) some alternative material applications to panelization, opting for stiff cardboard, foldable cardboard and a sandwich technology that combines soft and hard material into a flexible prototype.

Comparing the fabrication procedures of the three prototypes we conclude that while the technique of sectioning may easily correlate geometric calibration with material thickness, tessellating and folding techniques require a strategy for panelization. In the prototype fabricated by sectioning, the single surface was divided in 200 vertical contours corresponding to cardboard thickness of 1 mm which were assembled in their sequence. In the prototypes fabricated by tessellating several experiments were conducted employing Paneling Tools<sup>3</sup> in Rhino in order to arrive at an effect that would maintain surface overall curvature as well as reduced complexity in assembly. We opted for a triangular paneling grid, with density of 15 by 15 following the initial build up of the initial surface produced (U number of spans = 15 / V number of spans = 15). Fabrication procedure commenced with dividing the tessellated surface in strips, grouped according to the grid and unrolling each strip individually. Each laser cut unrolled strip was folded by hand, (Figure 6) following a map of the surface indicating main ridges according to the origami two-colorable rules (as described in section 3.2) and assembled sequentially. Physical surface manipulation by folding proved a necessity in order to complement the digital fabrication process.

<sup>3</sup> Paneling Tools is a plugin for Rhino available on <http://wiki.mcneel.com/labs/panelingtools>

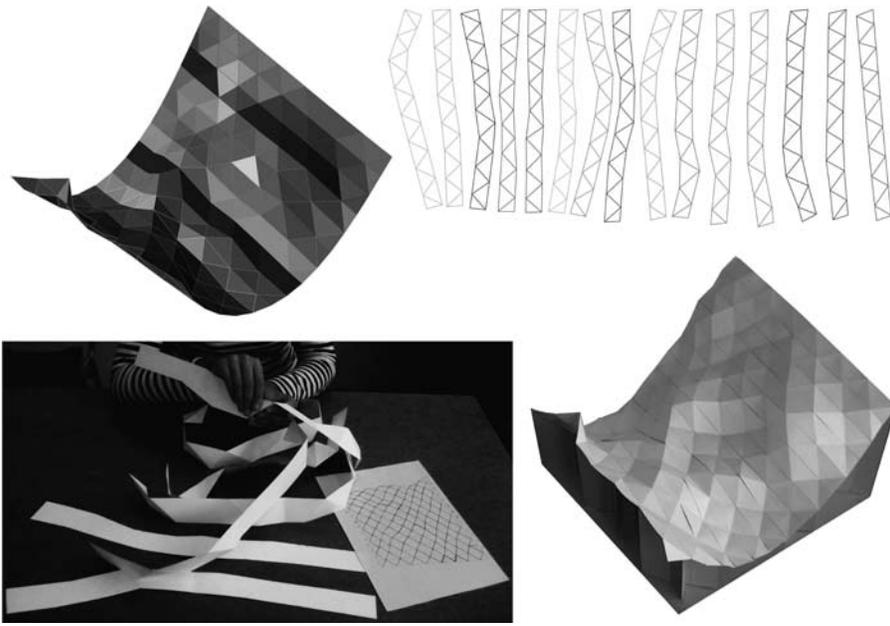


Figure 6  
Fabrication  
process of  
tessellated surface  
by strip folding

6

## CONCLUSION AND EXTENSION

The versatility of the human hand is inexhaustible. Research in human prehensile behavior may become extremely relevant in the context of advances in interactivity and robotics in architecture in the forthcoming years. The paper addressed the form-generative potential of grasping analysing its material effects primarily in terms of free-form surface geometry of crumpled sheets. Further development of this research would entail conceptual and computational models relating prehension kinematics and form generation.

Sheet crumpling morphology manifests multiple surface curvature and complex networks of creases, concepts that are intrinsic to the problematic of the current developments in digital architecture. The paper explored methods for modelling the complex geometry of crumpled sheets making evident a symbiosis between physical and digital form generation processes. It demonstrated how geometric approximations of randomly generated free-form surfaces that derive from low tech experiments, can provide computable models that enable their architectural calibrations in terms of digital design and fabrication.

## ACKNOWLEDGMENTS

Research presented in this paper is partly founded by the Research Committee of the University of Thessaly under code [4088.04.01]. The authors would like to thank Asterios Agathidis, Kyriakos Hatzikosmas and Alexandros Tsolakis for sharing their insights upon bitmap-driven geometry definition through height field. The prototype presented in Figure 6 was produced in collaboration with them during the Transframing workshop that took place at the Department of Architecture, University of Thessaly, 2010<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Workshop description available on <http://www.transframing.blogspot.gr/>

## REFERENCES

- Allen, S. and McQuade, M. (2011), *Landform Building: Architecture's New Terrain*, Lars Muller Publishers
- Amar, B and Pomeau, Y. (1997), *Crumpled paper*, London, A TEX Paper  
Available at [www.phys.ens.fr/~benamar/paper/crumpling.pdf](http://www.phys.ens.fr/~benamar/paper/crumpling.pdf) (accessed 28-1-2012)
- Bergdoll, B. Dickerman, L., Buchloh, B. and Doherty, B. (2009), *Bauhaus 1919-1933. The Museum of Modern Art*, New York
- Buri, H, and Weinand, Y. (2008), *Origami – Folded Plate Structures, Architecture*. In 10th World Conference on Timber Engineering, 2-5 June 2008, Japan: Miyazaki. Available at <http://infoscience.epfl.ch/record/118687> (accessed 11-10-2011)
- Iwamoto, L. (2009), *Digital Fabrications, Architecture and Material techniques*, Princeton Architectural Press.
- Kilian, M., Flory, S. Chen, Z., Mitra, N., Sheffer, A., Pottman, H. (2008), *Curved Folding*, in *Advances in Architectural Geometry*, Vienna, TU Wien
- Lobkovsky, A. E. and Witten, T. A. (1996), *Properties of Ridges in Elastic Membranes*.  
Available at <http://xxx.lanl.gov/abs/cond-mat/9609068> (accessed 2012-05-14)
- MacKenzie C.L. and Iberall T. (1994) *The Grasping Hand*, Amsterdam, Elsevier
- Picon, A. (2004), *Architecture and the Virtual. Towards a New Materiality*, in Sykes, K. ed. (2010), *Constructing a New Agenda: Architectural Theory 1993-2009*, Princeton Architectural Press
- Pellegrino, S, and Vincent, J. (2001), *How to fold a membrane*, in Pellegrino, ed. *Deployable Structures*, Wien –New York: Springer, pp: 59-75
- Schott, J.M. and Rossor, M.N. (2002), *The grasp and other primitive reflexes*. *Journal of neurology, neurosurgery and psychiatry*. Available at <http://jnnp.bmj.com/content/74/5/558.full> (accessed 2012-05-29)
- Schumacher, P. (2007), *Engineering Elegance*. In Kara, H. ed, 2008. *Design Engineering*, London: AKT. Available at <http://www.patrikschumacher.com/Texts/Engineering%20Elegance.html> (accessed 28-1-2011)
- Soddu, C. (1999), *Recognizability of the Idea: the evolutionary process of Argenia*, AISB Symposium, Edinburgh, April 1999, available at [http://www.soddu.it/edinburgh/soddu\\_edinb.htm](http://www.soddu.it/edinburgh/soddu_edinb.htm) (accessed 1-3-2012)
- Tachi, T. (2010), *Freeform Origami Software*. Available at <http://www.tsg.ne.jp/TT/cg/> (accessed 1-8-2011)
- Tachi, T. (2009), *Rigid Origami Simulator Software*. Available at <http://www.tsg.ne.jp/TT/cg/> (accessed 1-8-2011)
- Vyzoviti, S. (2003), *Folding Architecture: Spatial, structural and organizational diagrams*. Amsterdam, BIS



# LE NUAGE, FIGURE D'UNE MATÉRIALITÉ CONTEMPORAINE

L'EXPÉRIENCE DE L'ÉCOLE D'ARCHITECTURE DE NANTES  
PAR LACATON ET VASSAL

GHISLAIN HIS

Laboratoire Architecture Conception-Territoire-Histoire (LACTH)  
Ecole Nationale Supérieure d'Architecture et de Paysage de Lille (ENSAPL) - France

## ABSTRACT

Several indices suggest that the French architects Anne Lacaton and Jean-Philippe Vassal work the cloud in their architectural projects, if this is as a concept, at least as a «architectural matter». It is characterized by issues of physical ecology and of material economy dependent on a social otherwise human ecology, by issues of uses variables depending on climatic fluctuations, by the blurring of boundaries who incite to open up to exchange with the near as the distant, by the difference considered as a vector of freedom, by an air quality and a comfort of atmosphere which takes precedence over the visual forms of the architecture. Following a selective historical course allowing to locate various themes or figures associated with the cloud in architecture, the experience of the new school of architecture at Nantes (2002-2009) will make it possible to define a specific contemporary materiality of the cloud.

Keywords: nuage (cloud), énergie (energy), climat (climate), atmosphère (atmosphere) , Lacaton & Vassal

Les architectes de la nouvelle école d'architecture de Nantes, Anne Lacaton et Jean-Philippe Vassal, ont reçu en 2008 le Grand Prix National d'Architecture. A cette occasion, la revue d'architecture AMC leur a laissé carte blanche sur une double page<sup>1</sup>. Ce qu'ils nous proposent n'est pas une image de bâtiment, ni même un plan, mais la photographie noir et blanc d'un nuage artificiel engendré par l'incendie d'un puit de gaz à Gassi-Touil, dans le sahara algérien en novembre 1961.

Dans un premier temps, cette étrangeté mérite que l'on s'y arrête pour essayer d'en percevoir les éventuels échos. Les précédents historiques du nuage en architecture<sup>2</sup> pourront ensuite être réinterrogés afin pour finir de comprendre comment le nuage peut être considéré comme un indice de lecture de la nouvelle école d'architecture de Nantes, comme ce qui permet de nommer une matérialité contemporaine invisible.

<sup>1</sup> AMC n°181, septembre 2008, pp. 76-78

<sup>2</sup> HIS G. (2007), *Le nuage de Coop Himmelblau en 1968. Emergence du nuage comme problématique architecturale contemporaine*, thèse de doctorat Université de Paris 1-Panthéon Sorbonne ou HIS G. (2006), «Architectures du nuage», in Faces n°63 l'air, pp. 12-15

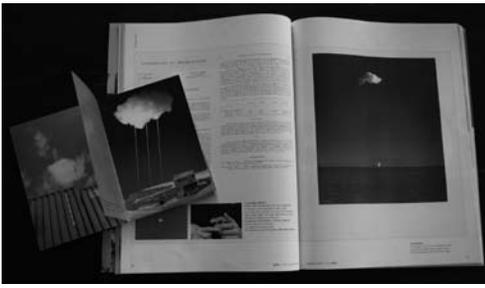


Figure 1 & 2  
Les publications de  
Lacaton et Vassal  
(AMC et mini-  
catalogue IFA) :  
une présence  
récurrente du  
nuage.

## IL FERA BEAU DEMAIN

La photo pleine page de droite est accompagnée à gauche de l'extrait d'un « journal de recherches atmosphériques » titré « Expériences et observations » puis « Cumulus artificiel sur le Sahara ». L'idée de pouvoir créer artificiellement un nuage, et donc potentiellement un micro-climat, une ombre ou une pluie dans le désert, a plusieurs fois fasciné les hommes. Cela explique pourquoi Henri Dessens et son fils Jean, météorologues de l'Institut de Physique de l'Atmosphère à Lannemezan et spécialistes de ces questions, sont allés observer, analyser et mesurer le phénomène de ce nuage accidentel<sup>3</sup>.

Sous ce texte, une autre petite photo d'un cumulus blanc sur fond de ciel bleu accompagne celle d'un caméléon et un court texte qui fait allusion à une ancienne publication, un mini catalogue de leur exposition dans la série Manifeste à l'IFA en mars 1995 : « Il fera beau demain ».

Les architectes annoncent une promesse de beau temps alors que la couverture de cette publication est recouverte d'une série de photographies (de Jean Dessens, déjà) montrant les métamorphoses d'un nuage. Ce dernier est pourtant plutôt majoritairement considéré comme une menace annonciatrice de mauvais temps. Pour Lacaton et Vassal au contraire, « les nuages font toujours rêver ». Ils sont pour eux synonymes « de l'optimisme, encore et toujours »<sup>4</sup>. Peut-être que comme pour les jardiniers ou les agriculteurs<sup>5</sup>, le nuage représente pour eux plutôt l'annonce de pluie, une source d'eau pure qui permet le renouvellement saisonnier des plantes et des fleurs.

Dans ce catalogue de l'IFA est publié leur projet de centre d'échanges culturels des 7 ports jumelés à Osaka (Japon, 1991)<sup>6</sup>. En association pour l'occasion avec Duncan O. Lewis, le projet est constitué de trois éléments : des containers, un champ de roses et un nuage d'eau pulvérisé à l'extrémité de trois tiges parallèlement obliques qui semblent figurer la pluie (qui arroserait les roses ?). En légende de l'image est simplement indiqué « containers, roses, usage ». C'est pourtant bien le nuage que l'on voit en premier, dressé dans le ciel comme un emblème, un étandard, un signal. Ce nuage symboliserait-il les usages, le vécu humain imprévisible, fluctuant, cette « partie joyeuse et vivante qui donne son sens au projet »<sup>7</sup> ?

<sup>3</sup> Jean et Henri Dessens, auteurs du texte explicatif publié dans AMC, se sont presque exclusivement intéressés aux nuages, à l'énergie qu'ils consomment ou produisent. Parmi les publications d'Henri Dessens: « Essai de formation artificielle de cumulus par utilisation exclusive de l'énergie solaire » (1956) ou « Une nouvelle source d'énergie: l'énergie d'instabilité de l'atmosphère » (ZAMP vol 14, n°5, 1963). Une photo d'un « cumulus formé sur l'incendie du puits de gaz saharien de Gassi-Touil (nov. 1961) » est reproduite dès la première page de titre de Diagrammes n°100, juin 1965, « Pourrons-nous modifier les climats ? » par Henri Dessens.

<sup>4</sup> Op. cit. AMC n° 181, p. 76

<sup>5</sup> Gilles Clément, *Nuages*, Bayard, 2005

<sup>6</sup> Lacaton et Vassal sont invités à participer à ce concours en 1991 après leur projet remarqué pour le concours du Centre Culturel du Japon à Paris dont la façade aquarium avait été appréciée (projet mentionné).

<sup>7</sup> Les citations sont extraites du texte des architectes dans le mini catalogue de l'IFA

Ce projet pourrait jouer le rôle de manifeste, de programme architectural des projets à venir. Les containers semblent signifier la préfabrication qui autorise le voyage, les déplacements. Sans doute est-ce d'eux qu'il s'agit quand il est question d'une architecture « directe, utile, précise, (...) économe » qu'ils disent aimer<sup>8</sup>. C'est l'ouvrage d'art, la technique réglée, l'horloge, le dur, *le hard*. Quand il ne sera plus question d'échanges portuaires, ils préféreront travailler par la suite avec des serres préfabriquées (toujours un *ready made* industriel). Le champ de roses est la touche de couleurs et de parfums variable selon les saisons, signe d'une certaine fragilité aussi, sans doute. Là, il s'agit vraisemblablement de l'architecture « gaie, poétique », la valeur ajoutée, le doux (soft) quand le nuage serait « léger, libre (...) généreux (...) cosmopolite »<sup>9</sup>. Ce terme de « cosmopolite » est le dernier de leur liste, manière d'insister sur ce que signifie le nuage : cette architecture s'adresse à des citoyens du monde, indépendamment des nations ou des langues, indifférente aux barrières culturelles ou limites politiques. Un projet de centre d'échanges culturels entre sept ports relie au-delà des frontières.

Un autre nuage, assez similaire, apparaîtra dans les premières maquettes de leur projet pour l'Université Pierre Mendès-France (UFR art et sciences humaines) de Grenoble (1995-2001). Il permet de comprendre la présence dans le mini catalogue d'une photo du détroit de Gibraltar : le massif de la Chartreuse visible depuis Grenoble évoque aux architectes cette autre montagne d'un autre voyage. Le nuage préfigure également, d'une certaine manière, les serres en façade où viendront prendre place des bougainvillées au sud et des bambous au nord, variétés exotiques qui invitent « à regarder au-delà des montagnes »<sup>10</sup>.

À partir de ces deux projets d'Osaka et de Grenoble, il est possible de se demander si le nuage n'est pas le concept architectural qui guide leurs productions quand sont présents une serre architecturalement modifiée dans laquelle poussent des fleurs dans un environnement contrôlé, comme si cet ensemble proposait un nuage artificiel à habiter.

## NUAGES D'OSAKA

Il est particulièrement remarquable que leur premier nuage ait été proposé pour un projet à Osaka, comme une réminiscence du pavillon Pepsi de l'Exposition de 1970. La forme géodésique d'apparence origami du pavillon était en effet entourée d'une « sculpture de brume » participant à l'objectif du projet de proposer une expérience multi-sensorielle en créant un « environnement invisible ». Celui-ci était réalisé par l'artiste japonaise Fujiko Nakaya et constitué d'eau pulvérisée produite par un système mis au point grâce à l'invention d'un physicien, Thomas Mee, grâce à la collaboration d'un météorologue, Yasushi Mitsuta. Ils trouvèrent là l'occasion de mettre au point pour la première fois le système de buses qui, à la manière d'un spray, vaporise de l'eau<sup>11</sup>. Le volume du pavillon disparaissait ainsi derrière une vapeur impalpable avec laquelle la lumière du soleil jouait, la journée, selon les heures. La perception de cette brume évanescence variait aussi la nuit quand des lumières mobiles ou des images projetées modifiaient l'apparence de la forme du dôme.

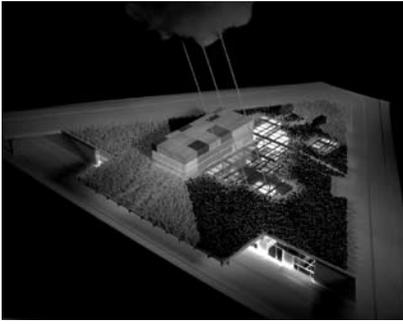
Fujiko Nakaya a été consultée comme spécialiste pour la réalisation du projet des architectes américains Elizabeth Diller et Ricardo Scofidio de construire un nuage au-dessus du lac d'Yverdon-les-bains (Suisse) à l'occasion de l'Exposition 2002.

<sup>8</sup> Op. cit. *AMC* n° 181, p. 76

<sup>9</sup> Ibid.

<sup>10</sup> Extrait du texte de présentation du projet sur le site [lacatonvassal.com](http://lacatonvassal.com)

<sup>11</sup> Le physicien américain Thomas Mee (1931-1998) invente ainsi en 1969 le premier système de fabrication de brume à l'occasion de cette collaboration avec Fujiko Nakaya. Il prend conscience à cette occasion des fins utilitaires que l'invention pouvait revêtir. Il fonde alors MeeFog™ qui ne cesse depuis de développer les diverses applications du système.



3



4

**Figure 3**  
Projet de centre d'échanges culturels des 7 ports jumelés à Osaka, Lacaton & Vassal + Duncan Lewis.

**Figure 4**  
Fujiko Nakaya Fog Sculpture, Osaka, 1970 ©1970 Fujiko Nakaya. Nakaya Fujiko and Experiments in Art and Technology (E.A.T.). Photographic documentation: 35 mm color slide. E.A.T. records, 940003. Research Library, The Getty Research Institute

L'idée initiale consistait à proposer un bar où l'on pourrait boire toutes sortes d'eaux. Commencé en 1998, le projet est constitué d'une structure en tenségrité posée au-dessus du lac et d'un nuage d'eau pulvérisée. La technique est celle des buses à haute pression fournies par Mee Industries. Les architectes finiront par appeler ce projet « blur » (brouillard) plutôt que « cloud » (nuage).

Cette tentative de reproduction d'un nuage atmosphérique réel à base de gouttelettes d'eau produit en effet plutôt une brume. Elle signale la dissolution de la forme architecturale, sa vaporisation, montrant ainsi que les enjeux se sont déplacés d'une composition organisée d'un « espace » en la mise en place d'un dispositif « environnemental » provoquant des sensations de trouble, d'absence de limite, d'évanescence légère.

L'architecte viennois Hans Hollein avait lui aussi déjà créé des « environnements non physiques » à l'aide d'un « spray environnemental » (Svobodair, 1968) qui, après la « pilule environnementale » (Architektur, 1967), relativisait l'architecture comme présence visuelle. L'artiste chinois Cai Guo-Qiang a, quant à lui, produit le 13 février 1996 des nuages explosifs (à partir de poudre placés dans de petits tubes en carton) dans le désert du Nevada dans sa série *The Century with Mushroom Clouds: Project for the 20th Century*. Il rappelait ainsi qu'ont eu lieu ici des essais nucléaires américains avec d'étranges nuages artificiels, et que l'environnement, malgré le calme des apparences, est effectivement pollué.

## EAU PULVÉRISÉE

La pulvérisation d'eau est également une manière de montrer un attachement à des préoccupations environnementales. Un des premiers à avoir pensé à pulvériser de l'eau autour d'une architecture est sans doute Le Corbusier, comme première application de sa Grille climatique pour le projet des maisons des péons de 110 m<sup>2</sup> à Chandigarh, vraisemblablement en janvier 1952. Lors de ses travaux pour Chandigarh, Le Corbusier s'est en effet heurté à la violence climatique locale, constatant les contrastes saisissants entre la journée plombée de chaleur, les nuits fraîches où les habitants dorment devant leurs maisons, dans les cours ou sur les toits, et les pluies diluviennes des moussons. Force est d'admettre alors qu'il lui est impossible d'adapter des systèmes de conditionnement artificiel d'air au Style International. Sa préoccupation principale n'est plus la forme puriste moderne mais devient la question du climat local. Le Corbusier met alors en place fin 1951 une « grille climatique » sans doute sur l'initiative de Iannis Xenakis qui travaille dans son atelier depuis 1947<sup>12</sup>. Celle-ci croise un certain nombre d'informations

<sup>12</sup> Au sujet de cette grille climatique, se référer en priorité aux travaux de Daniel Siret, dont « Architecture et contrôle de l'ensoleillement » co-écrit avec Amina Harzallah pour le congrès IBPSA, France 2006 ou Daniel Siret (2007), Notices « Grille climatique » et « Tour d'ombres » (français, anglais, japonais), Œuvres complètes de Le Corbusier, Edition numérique, Fondation Le Corbusier - Echelle 1 (DVD).

temporelles dans un sens (saisons, mois, jours et nuits, heures) et de paramètres climatiques dans l'autre : température de l'air, degré d'hygrométrie, pluviométrie, mouvements et vitesse de l'air (vents dominants), température des parois et même le rayonnement thermique des objets. Cette grille est censée révéler les points critiques, là où l'homme souffre. Car il revient à l'architecture, selon Le Corbusier, d'assurer le bien-être et le confort des habitants. La forme architecturale des maisons en Inde doit être la résultante de la problématique climatique et non plus d'une esthétique. Une des études en plan et coupe du projet des maisons des péons montre que Le Corbusier a pensé un moment utiliser la brumisation pour refroidir les parois, par la « création d'une poussière fine de gouttelettes d'eau dans le jardin et sur le toit et les murs »<sup>13</sup> afin de faire baisser la température intérieure des logements. Cette option n'a pas été retenue, à la fois pour des raisons de faisabilité économique mais aussi pour des questions techniques : l'eau pulvérisée aurait été réchauffée (sinon évaporée) avant de pouvoir effectuer tout rafraîchissement d'air. Quoiqu'il en soit, on pourrait presque désormais tenir Le Corbusier pour un des pionniers de l'architecture bio-climatique, surtout au regard de ses études ultérieures sur l'arborisation de Chandigarh.

Cinq ans après l'exposition d'Osaka, à l'occasion d'un projet pour un Centre de calcul à Mexico (1975), l'architecte d'origine argentine Emilio Ambasz pense lui aussi à de l'eau pulvérisée « pour rafraîchir les abords du bâtiment. Pour lui, il s'agit véritablement d'un nuage constitué par une masse d'air froid formée d'eau mise en haute pression par des lances spéciales. Ce procédé n'est à l'époque pas utopique puisqu'il est déjà utilisé pour fabriquer de l'air frais au sud des Etats-Unis »<sup>14</sup>. Avec cet architecte que certains considèrent comme l'un des premiers à développer ce que l'on appelle aujourd'hui une architecture écologique, on remarque combien le nuage signale une attention aux éléments climatiques, aux économies d'énergie (ce projet prévoit un « mur d'énergie » composé de cellules photovoltaïques) qui ne le dispense pas d'une attention à une écologie sociale<sup>15</sup>.

## ÉCOLOGIE ET ÉCONOMIE

En architecture, la préoccupation écologique a été portée très tôt par l'inventeur américain Richard Buckminster Fuller dans une vision étendue des problèmes de la planète. Un de ses derniers projets en témoigne la même année que la mise en place de la veille météo mondiale, en 1962. Avec son associé Shoji Sadao, il propose un projet utopique et radical de villes flottantes, des « *cloud structures* » (structures nuages) qui fonctionnent comme un bilan de son travail. Ce projet n'existe que sous la forme d'une seule image qu'accompagne un texte explicatif : des sphères flottent au dessus de montagnes sans aucune trace de vie humaine. La description nous informe qu'il s'agit de villes géodésiques sphériques d'un grand diamètre (1 mile soit environ 1609 m.) dont l'air intérieur chauffé par le soleil permettrait, en théorie, de les rendre plus légères que l'air, même avec plusieurs milliers de personnes à bord. Elles pourraient alors se déplacer autour de la terre, au gré des vents, ou s'amarrer parfois à la cime des montagnes. Ce projet est donc plutôt un ballon solaire qu'une Montgolfière, ce premier n'utilisant pas de brûleur contrairement au second. Les sphères-nuages de Fuller sont des aérostats qui restent en sustentation selon le principe d'Archimède avec le soleil comme seule source de chaleur.

Ce projet démontre les ambitions de Fuller d'une économie globale et d'un équilibre d'ensemble de la planète. L'économie de matière engage à trouver le meilleur rapport plein/vide. La sphère avec une structure en tension continue construit, à l'image des bulles de savon, le plus grand volume avec l'enveloppe la plus réduite. L'économie de territoire est

<sup>13</sup> Illustration manuscrite sur le document, source : archive 5600, fondation Le Corbusier.

<sup>14</sup> G. Négréanu, « projet pour un centre de calcul à Mexico », *AIC n°36*, août-sept. 1975, pp. 66-67.

<sup>15</sup> La description du projet sur le site internet officiel de l'agence d'Emilio Ambasz en rend compte. Il ouvre par un slogan qui en détermine le projet, coloré : « *green over the gray* » (le vert au-dessus du gris terne).

consécutives à une densification de la ville, une concentration qui reste légère et mobile. L'économie d'énergie consiste à n'utiliser que celle du soleil (ville et bâtiment passifs et autonomes). L'économie sociale est d'utiliser l'ensemble de l'espace disponible sur la terre pour en partager les ressources et richesses, sans se préoccuper de frontières.

En 1974 dans un désert du Koweït, l'architecte britannique Graham Stevens développe le projet d'une autre forme de nuage artificiel: le *Desert Cloud* (nuage du désert). Celui-ci cherche à utiliser les forces naturelles, physiques et chimiques de l'atmosphère pour économiser les ressources limitées et épuisables de la terre. Ce radeau de boudins pneumatique quasiment carré d'une dizaine de mètres de côté décolle grâce à l'air intérieur chauffé par le soleil (surface transparente), et fait ensuite ombre plus fraîche en sous-face opaque pour provoquer une condensation de l'humidité de l'air (que l'on suppose présente en quantité suffisante) ce qui permet de produire de l'eau en plein désert.

## LE NUAGE RELATIONNEL

Dans les projets d'architecture, le nuage est également le signe d'une volonté de faire communiquer les cultures et les langues, de faire se rencontrer les peuples et de favoriser les échanges et les croisements.

Le projet de l'architecte danois Johan Otto Von Spreckelsen du plus célèbre nuage architectural français à Paris en témoigne. Avant de devenir un nuage de toile sous l'Arche de la Défense, le projet initial consistait en un nuage de cristal pour couvrir des activités du Centre International de la Communication de part et d'autre et en dessous de l'arche de la Fraternité (1983-1989), avec «souks multimédias» et restaurants. Les intentions de l'architecte véhiculent une utopie humaniste d'ouverture et de carrefour, même ponctuel comme il l'avait expliqué dans le texte accompagnant les images du concours.

«Un cube ouvert. Une fenêtre sur le monde. Comme un point d'orgue provisoire sur l'avenue. Avec un regard sur l'avenir. C'est un «arc de triomphe» moderne, à la gloire du triomphe de l'humanité. C'est un symbole de l'espoir que dans le futur les gens pourront se rencontrer librement. Ici sous l'»arc de triomphe de l'homme» les gens viendront du monde entier pour connaître les autres gens, pour apprendre ce que les gens ont appris, pour connaître leurs langues, leurs coutumes, religions, arts et cultures. Mais surtout pour rencontrer d'autres gens ! Au seul contact des autres gens et nationalités, les barrières que les sentiments d'incompréhension des siècles passés ont créées seront détruites»<sup>16</sup>.

*Steel cloud* (nuage d'acier) est l'autre nom que le groupe d'architectes Asymptote (Liseanne Couture et Hani Rashid) a donné à un projet de «Monument à l'immigration» qui ne veut pas être un bâtiment, pas du construit. Le «Los Angeles Coast Gateway» (1988), est conçu à l'occasion d'un concours aux USA. Il se situe au croisement de deux rues dont il marque, littéralement, l'intersection. Principalement linéaire, les barres inclinées se superposent longitudinalement au dessus de ce site symbolique des superpositions des cultures à Los Angeles, au croisement des quartiers japonais, chinois, mexicains et du quartier financier.

<sup>16</sup> Joan Otto von Spreckelsen, in *Tête Défense, concours international d'architecture 1983*, Electa France, Milan-Paris 1984.

## GRATTE-NUAGES

Il rappelle le projet *Wolkenbügel* (1925) d'El Lissitzky, immeuble de bureaux en forme de Y géométrisé et à plat, diapason horizontal largement vitré sur sa périphérie qui se situe en hauteur au croisement de deux rues principales dont il signale tridimensionnellement l'intersection par trois pieds-piliers, comme une porte. *Wolke* signifie nuage en allemand et *bügel* fer à repasser. Si on peut supposer que ce projet de « fer à repasser céleste » est la réponse russe au gratte ciel américain *Flatiron Building* (1902) de Daniel H. Burnham (immeuble fer à repasser), l'autre nom du projet « gratte-ciel horizontal » renvoie aux *wolkenkratzer*. Les allemands comme les néerlandais (*Wolkenkrabber*) ont en effet conservé l'idée du nuage pour désigner les « gratte-nuages ». Ce terme *cloud scraper* a sans doute été inventé par un architecte à Minneapolis (Minnesota), Leroy Sunderland Buffington comme semble le confirmer l'architecte historien et critique britannique Charles Jencks<sup>17</sup>, même si les historiens s'accordent en général pour considérer le Home Insurance Building de Chicago de William LeBaron Jenney comme le premier *sky scraper* (gratte-ciel), alors que le bâtiment ne mesurait que 42 m. avec dix étages et que le terme « gratte-ciel » n'existait pas encore en 1885.

Ce qui est notable, c'est combien le gratte-ciel affirme sa dominante verticale, représentation de l'autorité centralisée voire phalocratique, « les tours sont l'instrument du pouvoir »<sup>18</sup>, contrairement au nuage qui semble indiquer un plafond horizontal du ciel et favorise les liens relationnels en latéralisant les mouvements. Les valeurs liées à la verticalité sont à la fois la domination, la supériorité hiérarchique, l'indépendance, l'individualisme, la compétition, la survie. Si le gratte-nuage est horizontal, qu'il supprime donc l'impasse verticale de la tour, on peut supposer qu'il tend ainsi à remettre en cause l'ensemble de ces valeurs. Le nuage aurait pour vocation d'exprimer de manière dynamique la démocratie, les échanges afin que les humains aillent à la rencontre des autres humains et non se superposent de manière indifférente par étages séparés, acceptent les différences, cherchent le contact, la communication.

## LE NUAGE D'ÉNERGIE

Le nuage le plus manifeste de l'histoire de l'architecture reste sans doute le projet *Wolke* du groupe viennois Coop Himmelblau en 1968. Conçu lors d'une étude sur les « formes de vie pour le futur », il fut développé jusqu'en 1972 pour la Documenta V de Kassel, mais ne fut finalement jamais réalisé. Ce Nuage<sup>19</sup> est une réaction à l'architecture de la boîte dure aux formes composées et fonctions pré-déterminées qui soumet le corps à ses propres contraintes. Il a pour vocation de libérer l'architecture de son rigide carcan disciplinaire, fonctionnaliste et matériel. Pour autant, il ne s'agit pas de proposer des espaces indéterminés ni de préfigurer l'imprévisible, mais simplement de laisser ouverts les possibles. Le Nuage permet de désigner une forme qui permet à la vie de s'exprimer dans l'architecture. Il est censé être lui-même une architecture vivante (organique) qui réagit aux désirs des habitants, dont la souplesse s'oppose à l'architecture inerte.

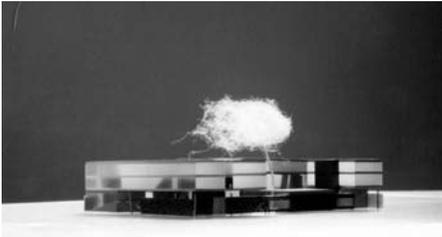
« Ça n'est pas à nous de changer pour vivre en société, mais à la société de changer pour que nous puissions y vivre. Rudi Dutschke a dit cela. Ça n'est pas à nous de changer pour vivre dans l'architecture, mais c'est à l'architecture de réagir à nos mouvements, sentiments, humeurs, émotions, pour que l'on puisse y vivre. Nous disons cela. »<sup>20</sup>

<sup>17</sup> D'après lui, Buffington aurait « conçu le premier bâtiment à ossature entièrement en acier et le premier gratte-ciel de grande hauteur », Charles Jencks, « Introduction » à *Gratte-ciel*, Academy ed., Londres, Paris 1980, p. 8.

<sup>18</sup> Philip Johnson, entretien avec Judith Dupré, *Gratte-ciel du Monde*, Könemann, Black Dog & Leventhal Publishers, Inc., New York 1996, pp. 8-9.

<sup>19</sup> Nuage avec une majuscule désigne le projet *Wolke* de Coop Himmelblau

<sup>20</sup> Coop Himmelblau, *Architecture is now*, Gerd Hatje, Stuttgart 1983 (s. p.).



5



6

**Figure 5**  
Première maquette du projet pour l'Université Pierre Mendès-France (UFR art et sciences humaines) de Grenoble (1995-2001), Lacaton & Vassal.

**Figure 6**  
La structure primaire en béton attend la structure secondaire en acier des volumes fermés du programme. photo G. His novembre 2007

Dès 1968 Coop Himmelblau pense à une architecture conçue « à partir de la fantaisie, légère et variable comme un nuage ». Le Nuage est une architecture qui évolue selon les pulsations du rythme cardiaque (*heart beat*) ou la fragilité d'un souffle (*pneuma*, c'est à dire aussi l'esprit -*soul*- qui anime), un espace pouvant être dur, explosif (*hard*) ou doux (*soft*). C'est une architecture du dedans, du contenu, pas du contenant. Il n'y a plus aucun mur. Tout l'espace intime habituellement intériorisé est projeté à l'extérieur, littéralement retourné comme un gant (en caoutchouc transparent). Il prend une autonomie totale, se libère d'un cadre ou d'une structure, explose et s'expose. Le Nuage de Coop Himmelblau est comme de l'air contenu dans une cocotte minute (une machine à vapeur). La chaleur augmente la pression de l'air intérieur sur les parois de la « coquille » qui finit par exploser. Quand Haus Rucker, un autre groupe viennois contemporain de Coop Himmelblau, développe jusqu'en 1972 son projet *Leisuretime Explosion* (Explosion du temps de loisirs), les cellules individuelles de vie nommées *pneumacosm* sont encore clipsées, branchées (plug in) sur une (méga)-structure mère dont elles dépendent. Le Nuage de Coop Himmelblau est moins une ampoule que son filament intérieur qui rougit, chauffe, éclaire grâce à une tension électrique qui traverse le volume, grâce à un passage d'énergie. Le nuage ne sert pas à désigner un vide ni à matérialiser de l'air mais tente de répondre aux pulsions, à l'intensité des sensations ou des sentiments dont ne sont pas exclus les rêves, les souvenirs, l'inconscient.

## MACHINE ATMOSPHÉRIQUE<sup>21</sup>

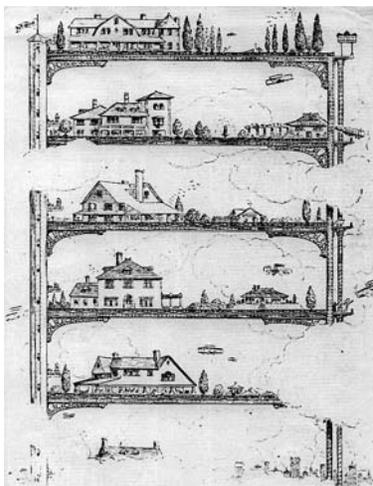
La publication de la photo du nuage artificiel est contemporaine de la livraison de la nouvelle école d'architecture de Nantes. Le principe constructif de ce bâtiment consiste en une ossature primaire en béton superposant des plateaux à plusieurs niveaux sur lesquels sont posés une structure secondaire en acier. Les pièces fermées aux façades vitrées contrôlées par des stores extérieurs métalliques respectent le programme à la lettre. Autour, ou entre ces « boîtes » fermées, les plateaux aux façades coulissantes en polycarbonate restent libres : ils sont un supplément indéterminé au programme. Il est dès lors possible de rapprocher ce principe de ce que Rem Koolhaas a appelé « le théorème de 1909 »<sup>22</sup> dont l'image montre un gratte-ciel comme une structure primaire de plateformes empilées sur lesquelles sont posées des villas, leurs jardins et dépendances. Pour Koolhaas, cela signifie « qu'il n'est plus possible d'attribuer à un site donné une destination unique et fixée à l'avance. Désormais, chaque îlot métropolitain abrite, en théorie du moins, une combinaison imprévisible et instable d'activités parallèles,

<sup>21</sup> Cette appellation reprend celle que Thomas Newcomen avait donné en 1712 à sa « machine à vapeur »

<sup>22</sup> Rem Koolhaas (1978) *Delirious New York*, Trad. franç. C. Collet, *New York Delire*, éd. Parenthèses, 2002. Il s'agit en fait du projet de gratte-ciel d'un caricaturiste publié en octobre 1909 dans *Life magazine*.

Figure 7

Rem Koolhaas (1978) *Delirious New York*, Trad. franç. C. Collet, *New York Delire*, éd. Parenthèses, 2002. Il s'agit en fait du projet de gratte-ciel d'un caricaturiste publié en octobre 1909 dans *Life magazine*.



7

Figure 8

Boutiques en bordure de rue au XVII<sup>e</sup> siècle (Rakuchū rakugai-zu, paravent de la maison Yoshikawa).



8

qui réduit la capacité programmatique de la démarche architecturale et limite la prévision dans l'urbanisme. Il est devenu impossible de « planifier » la culture<sup>23</sup>.

Il ne parle cependant pas des nuages qui flottent autour des villas qui pourraient pourtant être bien plus le signe de cette indétermination programmatique que la superposition étanche des plateaux porteurs. Ils évoquent les nuages d'or qui séparent des lieux sur certains paravents japonais<sup>24</sup>. Comme des morceaux de temps aussi fluctuants que les variations météorologiques, ils séparent une narration linéaire en plusieurs moments distincts mais dans un même lieu qu'ils unifient.

Il est dès lors loisible de comprendre les pièces intermédiaires de l'école d'architecture de Nantes comme des nuages artificiels, ce que la double page de la carte blanche nous incite à imaginer.

## MATÉRIALITÉ CONTEMPORAINE DU NUAGE ARCHITECTURAL

Mais en quoi des volumes clos de polycarbonate ondulé pourraient-ils être perçus comme un nuage architectural ?

Ils ne sont d'ailleurs pas clos : aucun joint ne garantit le « hors d'air ». On peut sentir « le passage de l'air »<sup>25</sup>, cette douce caresse du vent qui passe, d'une brise qui fait vibrer des feuillages ou des tissus tout en renouvelant naturellement les volumes à respirer. Ces pièces intermédiaires sont comme de grandes terrasses qu'il est possible de clore ou d'ouvrir à l'envi. Le volume est maximal comparé à son enveloppe minimale. On pense être à l'intérieur mais on entend et ressent physiquement les éléments extérieurs.

Depuis l'origine de sa conception et de son programme de s'implanter en centre ville, la nouvelle école a vocation à s'ouvrir sur la ville et donc aussi son fleuve, son estuaire. Son architecture n'a pas pour vocation de s'arrêter à la limite de ses murs mais d'avoir des enveloppes sensibles à son environnement. Le polycarbonate fabrique une intériorité dans son rapport flou à l'extérieur. Comme le dit Jean-Philippe Vassal, « derrière le polycarbonate on voit les couleurs. C'est un matériau qui contient l'espace, à la différence du verre qui a

<sup>23</sup> Ibid., p.8

<sup>24</sup> Nuages en feuilles d'or de Eitoku Kano au XVI<sup>e</sup> siècle, mais aussi paravents appartenant à la catégorie Rakuchū Rakugai-zu (La ville et sa banlieue) dépeignant la ville de Kyôto et ses environs au XVII<sup>e</sup> siècle.

<sup>25</sup> Jean-Philippe Vassal emploie cette expression plutôt que celle de « courant d'air », négativement connotée.



**Figure 9**  
« Le polycarbonate contient l'espace » (Vassal, 2012). Les volumes d'air à travers les transparences du polycarbonate donnent l'impression de percevoir la chaleur dans la lumière, que l'eau dans l'air est palpable comme dans un nuage. Photo G. His 9 mars 2009.

**Figure 10**  
Reflets et transparences dans une pièce intermédiaire de l'école d'architecture de Nantes. photo G. His 21 mars 2009

9

10

un rapport beaucoup plus violent avec l'extérieur. On voit directement alors que la simple couche de polycarbonate fait office de filtre<sup>26</sup>. Ce sentiment du dedans est une des conditions indispensables pour penser le prolongement vers le dehors : en suggérant que le paysage s'étend au-delà du fleuve, la limite trouble invite au voyage physique hors de l'école et du territoire mais aussi à l'errance mentale de la mémoire, au retour imprévu des souvenirs (qui sont aussi des matériaux de conception du projet d'architecture).

Les pièces intermédiaires sont disposées stratégiquement à l'articulation de plusieurs studios de projet. Elles incitent ainsi à faire se rencontrer enseignants et étudiants et à faire se croiser les enseignements. Si l'usage des studios de projet est fonctionnellement clairement défini, ces suppléments de surface permettent à différentes pédagogies de trouver là à s'exprimer, hors de l'écran d'ordinateur sans doute, dans un autre rapport à l'étudiant que celui de la « correction ». Les travaux sont alors présentés aux regards extérieurs, et exposés à la critique et à l'altérité hors du confinement doctrinaire d'un studio. Ces pièces sont donc bien des lieux de liberté, lieux de possibles dont peuvent se saisir les étudiants, presque une incitation à l'anarchie dans son sens étymologique : an-arkhê<sup>27</sup>, sans commandement, mais sans connotation à une quelconque violence non plus. Il est à espérer que les étudiants aient un jour l'opportunité d'y « laisser libre cours à leur créativité »<sup>28</sup>, manière d'exprimer les spécificités des différences plutôt qu'un dénominateur commun plus uniforme.

Peut-être qu'intimement le nuage possède un potentiel révolutionnaire ou libertaire de nouvelles relations sociales. Le nuage n'est-il pas composé d'un jeu de forces en équilibre ?

**26** Entretien de l'étudiante Marion Dekeister (2012) avec Jean-Philippe Vassal, « Habiter la poésie dans les logements sociaux de Lacaton et Vassal à Mulhouse (ou quels liens peut-il exister entre matérialité et poésie ?) », mémoire de recherche de Master à l'école nationale supérieure d'architecture et de paysage de Lille.

**27** Cette étymologie est paradoxalement partagée avec architecture et architecte.

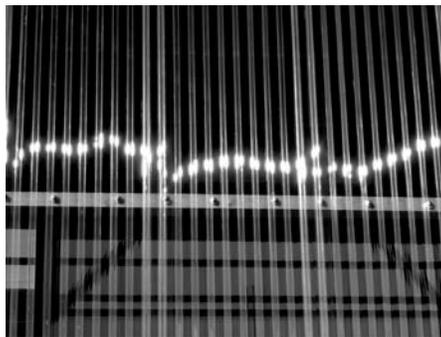
**28** Allusion à l'article de Valéry Didelon (2011), « Valeur d'usage, valeur d'image : la nouvelle école d'architecture de Nantes », Criticat n°8 sept., pp. 4-17

Figure 11  
Effet de filtre :  
la vue sur la ville  
est floue. Photo  
G. His 9 mars  
2009.



11

Figure 12  
Effet de  
lumière sur les  
ondulations du  
polycarbonate  
(le polycarbonate  
est ondulé et  
non crénelé :  
un seul point  
de lumière sur  
une onde se  
répercute sur les  
autres jusqu'à  
produire une  
ligne de lumière.  
Ce phénomène  
fonctionne  
de l'extérieur  
comme de  
l'intérieur).  
Photo G. His,  
21 décembre  
2007



12

Ces pièces sont en outre qualifiées par leur positionnement géographique. Pour avoir travaillé dans ces espaces<sup>29</sup>, l'ambiance de ceux orientés à l'est y est sensiblement différente de ceux orientés au nord, mais pas forcément comme on pourrait le supposer : la façade nord éclaire et chauffe de manière inattendue, en raison entre autre des bâtiments vitrés de l'autre côté du fleuve. Ainsi, travailler au nord permet d'abord de prendre conscience que cette orientation a des qualités, mais aussi que la présence du fleuve et des bâtiments de la ville participent à l'ambiance intérieure, et enfin cela permet de perpétuellement se situer par rapport aux points cardinaux, ce qui est aussi une manière de relativiser sa manière d'être au monde. Le bâtiment est en lui-même un apprentissage. Ces pièces intermédiaires sont finalement moins indéterminées qu'il n'y paraît. Si leurs usages sont imprévus, elles sont qualifiées au niveau de leur ambiance (lumineuse, thermique, etc), elles favorisent une diversité de climats. Cette qualification est, comme tout phénomène météorologique, variable, évolutif, à l'échelle du bâtiment comme du monde (le climat est une totalité). Elle ne répond pas à une norme fixe définie une fois pour toutes. Ces changements d'utilisation des lieux économisent nombre de dispositifs techniques complexes et énergétiquement dépendant de ventilation mécanique contrôlée ou de climatisation artificielle. C'est une manière de prendre conscience de phénomènes atmosphériques qui sinon resteraient invisibles<sup>30</sup>, de vivre selon des temps différenciés plutôt que dans un espace homogène. La variété des atmosphères permet de créer des émotions, poétiques et douces rappelant des méditations devant les métamorphoses d'un nuage.

Des orchidées viendront un jour dans cette école montrer combien elles aussi savent s'adapter au climat, même loin de leurs lieux d'origine.

Le nuage est ainsi une figure manifeste d'une matérialité contemporaine, le signe du passage historique d'une préoccupation sur la matière et la forme de l'espace à une préoccupation sur l'ambiance et l'invisible climat de l'air. Cette matérialité véhicule des notions concomitantes : le nuage architectural ne planifie pas d'usage mais provoque des croisements, il propose une écologie aussi bien physique (variations d'atmosphères) que sociale (apologie des différences), ses limites imprécises ouvrent autant l'espace que l'imaginaire et convie à penser au-delà du local.

Finalement, la matérialité contemporaine d'un nuage architectural (artificiel) n'est-elle pas tout simplement un environnement comme lieu de production et d'échanges énergétiques?

**29** J'ai enseigné dans cette école de son ouverture en février 2009 jusqu'à la fin du premier semestre de l'année 2010-2011. Les étudiants construisaient des prototypes architecturaux à l'échelle 1 précisément dans ces espaces, ce qui s'est avéré bien difficile dans l'atelier échelle 1 de l'école d'architecture et de paysage de Lille, extension de Nasrine Sérapi

**30** Pour avoir essayé de reproduire un nuage en laboratoire avec des étudiants de Polytech Nantes (Clément Broquet, Sylvain Cellier, Fabien Conte sous l'encadrement de Bruno Auvity et Christophe Josset), la difficulté n'est pas tant de reproduire les conditions atmosphériques de la création d'un nuage (aller au delà du seuil de saturation de la température de l'air au-delà duquel la vapeur passe à l'état liquide) mais de rendre visible le nuage.

## REFERENCES

- Clément G. (2005), Nuages, Bayard
- Coop Himmelblau (1983), Architecture is now, Gerd Hatje, Stuttgart (s. p.)
- Dekeister M. (2012), entretien avec Jean-Philippe Vassal, Habiter la poésie dans les logements sociaux de Lacaton et Vassal à Mulhouse (ou quels liens peut-il exister entre matérialité et poésie ?), mémoire de recherche de Master à l'école nationale supérieure d'architecture et de paysage de Lille
- Dessens H. (1956), Essai de formation artificielle de cumulus par utilisation exclusive de l'énergie solaire
- Dessens H. (1963), Une nouvelle source d'énergie: l'énergie d'instabilité de l'atmosphère, ZAMP 14(5)
- Dessens H. (1965), Pourrons-nous modifier les climats ?, in Diagrammes, 100
- Didelon V. (2011), Valeur d'usage, valeur d'image : la nouvelle école d'architecture de Nantes, in Criticat n°8 sept., pp. 4-17
- His G. (2006), Architectures du nuage, in Faces n°63 l'air, pp. 12-15
- His G. (2007), Le nuage de Coop Himmelblau en 1968. Emergence du nuage comme problématique architecturale contemporaine, thèse de doctorat Université de Paris 1-Panthéon Sorbonne
- Jencks C. (1980), «Introduction» à Gratte-ciel, Academy ed., Londres, Paris, p. 8.
- Johnson P. (1996), entretien avec Judith Dupré, Gratte-ciel du Monde, Könemann, Black Dog & Leventhal Publishers, Inc., New York, pp. 8-9.
- Koolhaas R. (1978) Delirious New York, Trad. franç. C. Collet, New York Delire, éd. Parenthèses, 2002.
- Lacaton A, vassal J-P, Druot F. (2004), Les grands ensembles de logements – Territoires d'exception, éd. GG
- Lacaton A. & Vassal J-P. (2008), Carte blanche, in AMC n°181, septembre, pp. 76-78
- Négreau G. (1975), Projet pour un centre de calcul à Mexico, AIC n°36, août-sept, pp. 66-67.
- Siret D. (2006), Architecture et contrôle de l'ensoleillement, co-écrit avec Amina Harzallah pour le congrès IBPSA, France
- Siret D. (2007), Notices «Grille climatique» et «Tour d'ombres» (français, anglais, japonais), Œuvres complètes de Le Corbusier, Edition numérique, Fondation Le Corbusier - Echelle 1 (DVD)

# LE CHOIX DES MATÉRIAUX ET LA PENSÉE SYSTÉMIQUE

## RÉFLEXIONS À PARTIR D'UNE ANALYSE TEXTUELLE.

ADOLPHE LUC, BONNEAUD FRÉDÉRIC, TORNAY NATHALIE

PRES - Université de Toulouse,  
LRA - Laboratoire de Recherche en Architecture,  
ENSA - Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Toulouse - France

### ABSTRACT.

More and more, we benefit from knowledge on environmental quality of construction materials and their processes of implementation. Better and better, the environmental expertise on engineering on materials is identified. Little by little, it influences the architectural production. Current research tends to propose pragmatic tools for the designers and increasingly accessible by not-experts. Within this particularly complex questioning, we are interested more precisely in the impressions of the designer, on the mental processes and the human behavior with an aim of improving the processes of design. We are registered kind within work of the cognitive sciences applied to the architectural design. This paper focuses on the correlation between the technical, ecological and sensible dimensions of materials. To approach these problems, our work method consisted in exploiting the contents of articles of the press in architecture which communicate on materials qualities (steel, aluminum, concrete, wood and terracotta) from textual analysis. The goal is to establish links between language and knowledge to provide a formal representation of the choice of building materials.

Keywords: matériaux, analyse textuelle, ingénierie des connaissances, outil d'aide à la conception

### INTRODUCTION

Aujourd'hui, les équipes de concepteurs se trouvent dans une situation de large choix de matériaux de construction, où les informations sont surabondantes, où règne la confusion au sein des différents critères de sélection, où il devient difficile d'appréhender l'offre des matériaux d'un seul regard (Kula & Ternaux, 2008; Hegger & al., 2010; Deplazes, 2008 ; Vittone, 2010). Face au nombre croissant de matériaux, au développement de nouvelles technologies, à la réinterprétation de matériaux préindustriels, à l'innovation liée à leur mise en œuvre, le classement actuel généralement par famille (construction en bois, construction en béton, construction en acier, construction en paille, construction en terre, construction en verre, etc.) est devenu caduc (Tornay, 2011).

Le choix des matériaux est issu d'une réflexion technique (choix constructif, structurel, mise en œuvre des matériaux, etc.), d'une analyse écologique (matériaux locaux, étude du cycle de vie, etc.), d'une approche sensible (choix d'un concept, signification du matériau, esthétique, etc.), d'une enveloppe budgétaire (coût de la matière première, transport, coût de la mise en œuvre, etc.), de contraintes réglementaires (du Plan Local d'Urbanisme aux normes de construction), etc.

La problématique de cet article s'interroge sur la corrélation entre les dimensions techniques, écologiques et sensibles des matériaux de construction. Elle induit les questionnements sous-jacents suivants :

- Dans quelle mesure est-il envisageable de comprendre comment ces éléments s'organisent pour « faire sens » et comment il est possible d'expliquer ces interactions et, éventuellement, les reproduire ?
- Dans quelle mesure est-il envisageable de (re)structurer, (re)penser, (ré)interpréter le classement des matériaux, selon quels critères, quels concepts, quels savoirs et savoir-faire, quelles connaissances ?

## MÉTHODE DE TRAVAIL

Pour aborder cette problématique, notre méthode de travail a consisté à exploiter le contenu d'articles de presse en architecture qui communiquent sur différents matériaux (acier, aluminium, béton, bois, terre cuite) à partir d'une analyse textuelle. Il s'agit d'établir des liens entre la langue et les connaissances afin de proposer une représentation formelle des enjeux (constructifs, conceptuels, environnementaux, etc.) liés au choix des matériaux.

La méthode de travail retenue dans cet article consiste à l'élaboration d'un corpus de texte décrivant des projets d'architecture dont la qualité de matérialité est reconnue à partir d'une grille de critères objectifs, les modalités sensorielles produites, le sens du choix des matériaux. Le corpus de texte est constitué d'article de presse présentant des projets reconnus pour leur choix de matériaux. Il s'agit de revues récentes, traitant des projets actuels. Ce corpus de texte est classé selon le type de matériau (acier, aluminium, béton, bois, terre cuite) et par revues. Initialement, seule la revue AMC<sup>1</sup> a été retenue. Puis, afin d'équilibrer les provenances des articles, nous avons complété le corpus par des projets présentés par la revue *Détail*<sup>2</sup> et *Le Moniteur des travaux publics et du bâtiment*<sup>3</sup>. Ce corpus compte plus de cent cinquante descriptions de projets architecturaux à l'échelle européenne et rédigés par différents journalistes de différentes revues reconnues par les professionnels du bâtiment.

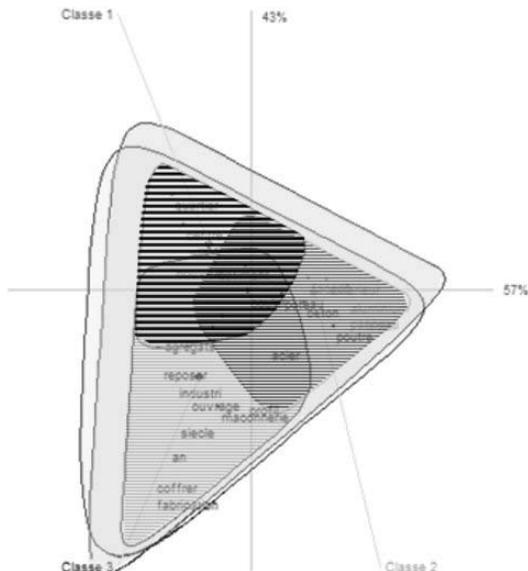
Le corpus de texte a été soumis au logiciel Alceste (V. Delavigne, 2000). Il s'agit d'un logiciel d'analyse textuelle. L'Analyse de Données Textuelles ou statistique textuelle vise à découvrir l'information essentielle contenue dans un texte. L'objectif est de quantifier un texte pour en extraire les structures significatives les plus fortes. Il permet le traitement des cooccurrences généralisé par un corpus multi paramétré. La méthode d'analyse s'appuie sur, d'une part, une classification descendante hiérarchique, qui suppose un fractionnement successif du texte, un repérage d'oppositions et des calculs complémentaires (recherche de segments répétés). D'autre part, une classification ascendante hiérarchique permet de

**1** AMC, le moniteur architecture, hors série acier 2005, AMC, le moniteur architecture, hors série aluminium 2007, AMC, le moniteur architecture, hors série bois 2005, AMC, le moniteur architecture, hors série terre cuite 2007, AMC, le moniteur architecture, hors série béton 2009.

**2** *Détail* 2005-10 « maçonnerie », *Détail* 2005-11 « façades + matériaux », *Détail* 2008-11 « construire en bois », *Détail* 2009-5 « matériaux et surface », *Détail* 2009-10 « murs en maçonnerie », *Détail* 2009 ½ « construction en béton », *Détail* Green 2009-1.

**3** *Le Moniteur des travaux publics et du bâtiment* 2010 du n°5532 au n°5544.

Figure 1  
 Résultats du logiciel  
 Alceste, analyse  
 factorielle des  
 correspondances



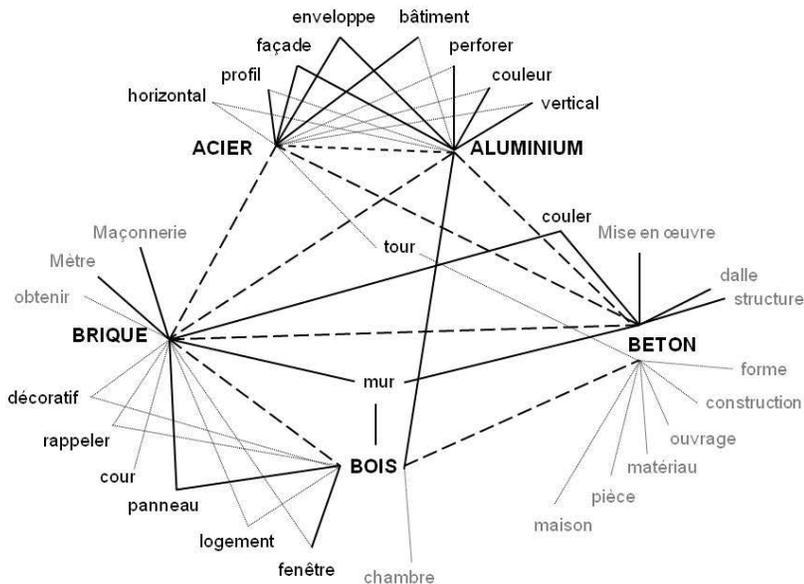
calculer la « distance de proximité » entre différents groupes de mots. L'intérêt d'utiliser un logiciel tel que Alceste, est qu'il peut écrire, classer, assimiler, synthétiser automatiquement un texte. C'est à partir de ces données qu'une démarche interprétative est réalisable.

## RÉSULTATS : ANALYSE TEXTUELLE DU LOGICIEL ALCESTE

Le premier résultat donné par le logiciel Alceste est la définition de plusieurs profils de classes. Il s'agit d'une classification caractérisée par le vocabulaire dominant. L'analyse du corpus de textes étudié compte cinq classes. La figure 1 montre que les trois premières classes (hachurées sur le schéma) présentent trois caractéristiques des matériaux bien distinctes alors que les classes 4 et 5 englobent ces trois caractéristiques.

Une analyse et une interprétation des résultats de chacune des cinq classes ont ensuite été conduites. Elles reposent sur la définition des termes qui sont issus de chaque classe, puis une démarche interprétative qui permet de caractériser chaque classe. Les résultats se présentent sous forme d'une classification ascendante hiérarchique, où apparaissent les mots appartenant à cette classe. Nous pouvons noter l'existence de trois principales classes qui sont :

- La classe 1, que nous avons nommée la présentation des projets architecturaux. Elle nous intéresse peu ; elle témoigne davantage de la structuration des articles de presse avec l'introduction qui présente les projets (localisation, dimension, programmation, maîtrise d'œuvre, maîtrise d'ouvrage, etc.) que de l'interaction concrète entre le choix des matériaux et l'échelle architecturale.
- La classe 2, que nous avons intitulée rôles et descriptions des matériaux. Cette classe représente le cœur de notre recherche. Elle regroupe le vocabulaire propre aux matériaux dans les projets architecturaux. Il paraît intéressant de poursuivre des recherches en tentant de caractériser chacun des matériaux au sein de cette classe.
- La classe 3, que nous avons nommée évolutions de l'architecture, présente les différents matériaux de construction sous l'influence de différents courants de pensée architecturaux. Il est vrai que chaque doctrine, style, théorie développe des principes ou des règles, qui ont un impact dans le choix des matériaux.



2

L'analyse factorielle des correspondances révèle la particularité des classes 4 et 5. En effet, elles englobent l'ensemble des notions traitées par les trois premières classes. Ces deux classes ont la spécificité de représenter essentiellement le vocabulaire de la caractéristique technique de deux matériaux : le béton et l'acier. Nous émettons l'hypothèse que ces deux classes sont la conséquence de l'engouement pour les techniques de construction de ces deux matériaux qui représentent une grande partie des projets réalisés lors des publications de ces revues. Il est certain que si le corpus de texte était orienté vers des projets publiés dans des revues plus anciennes, ou issus de revues présentant un autre regard sur l'architecture comme les revues *Ecologik* ou *La maison écologique* (qui ne possèdent pas encore de hors série dédié à un matériau), il est évident que l'analyse textuelle aurait donné des résultats différents.

## INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Des caractéristiques communes aux différents matériaux existent. Pour mieux les cerner, un schéma met en évidence les interactions entre les matériaux. Les cinq termes les plus proches des matériaux sont reliés par un trait plein fort et les suivants par des traits clairs. Quant aux pointillés, ils représentent les liens entre les différents matériaux, cela correspond aux projets d'architecture qui allient deux types de matériaux. Par exemple, les constructions dont la structure porteuse est en béton avec un habillage en bardage en bois.

Ces schémas révèlent une part de la complexité du choix des matériaux par son approche systémique. Ils montrent la globalité des enjeux ainsi que l'interdépendance des éléments du système. Cette analyse met l'accent sur des interactions plus intenses entre certains matériaux comme l'acier et l'aluminium ou le bois et la brique.

Il apparaît ainsi trois pôles :

- l'acier et l'aluminium partagent pratiquement le même vocabulaire dans leur réseau de forme, seul l'ordre varie. Cela n'est pas étonnant dans le sens où ils appartiennent à la construction métallique, ils partagent la même culture constructive.
- plus surprenant, les réseaux de forme de la brique et du bois possèdent de nombreux termes en commun. Il est vrai que ces deux matériaux peuvent suivre une logique constructive aussi bien massique (mur de brique ou madrier de bois) que de revêtement de façade, de toiture ou de sol. Le traitement des façades (calepinage) y tient une place particulièrement importante.
- enfin, le pôle du matériau béton partage peu de termes avec les autres matériaux. Il se caractérise par sa mise en œuvre (filière lourde), la variété des éléments en béton (dalle, structure, mur, toiture, escaliers, etc.) et les conséquences sur l'écriture architecturale (rapport à la forme)

Cette étape correspond ainsi à une première tentative de représentation de l'approche systémique dans le choix des matériaux. Elle permet de modéliser la complexité, en analysant les différentes structures de réseaux de relations entre les différents matériaux. L'objectif est d'ordonner les données, pour obtenir une vision globale des notions afférentes au choix des matériaux et leurs interactions.

## DISCUSSION

La couverture des données issue du choix du corpus étudié est une des limites de cette méthode d'analyse, qui a déjà été soulevée dans les interprétations de résultats. En effet, nous avons pu constater, dans les cinq classes relevées dans l'analyse, que deux d'entre elles (les classes 4 et 5) sont certainement issues de l'importance de la construction en béton et en acier lors de la publication de ces articles (de 2005 à 2010). Il est clair que si cette étude était de nouveau réalisée à partir d'articles publiés depuis 2011 (sur des projets plus récents) les résultats différencieraient. Par exemple, nous pouvons supposer que la caractéristique écologique des matériaux serait plus prégnante. Le choix d'analyser des articles de presse qui témoignent de la construction actuelle en Europe a pour conséquence d'interpréter aussi le choix des matériaux dans notre époque, dans nos régions.

Par ailleurs, cette méthode de travail peut évoluer selon le choix des sources et leur périmètre couvert par le corpus de texte. Par exemple, l'analyse textuelle d'articles de presse décrivant des projets architecturaux pourrait prendre une tout autre dimension en analysant différentes périodes, ou différents continents. Il s'agirait ainsi de constituer plusieurs corpus de textes. Ce qui permettrait de juger de l'évolution des choix de matériaux dans le temps ou selon leur localisation. Un premier corpus serait composé d'articles issus des premières revues d'architecture dans les années 1930 à 1960 (Architecture d'Aujourd'hui) qui représenteraient des projets d'architecture moderne, le deuxième dans les années 1970 à 2000 (avec l'apparition de nombreuses revues) pour exposer les projets de l'époque postmoderne, et enfin des corpus plus réguliers (tous les cinq ans par exemple) pour comprendre, analyser et interpréter les évolutions des projets actuels en Europe. Cela permettrait de mettre à jour les orientations des équipes de concepteurs dans le choix des matériaux.

Parallèlement, il serait intéressant d'analyser des corpus de texte qui expliquent le choix des matériaux à l'échelle urbaine et du paysage. A notre connaissance, il n'existe pas encore de revue qui traite ce sujet. Cela permettrait de révéler les significations du choix des matériaux à une autre échelle spatiale. Ainsi, une vision globale des enjeux des matériaux dans les projets architecturaux, urbains et du paysage pourrait être produite.

L'objectivité de la méthode d'analyse repose principalement sur l'interprétation des résultats divulgués par des outils d'aide automatique des données textuelles tel que Alceste. Les propositions de représentation, de reconstruction sémantique (un réseau de terme) se retrouve au cœur même de la problématique qui sous-entend la rencontre entre corpus et sémantique, entre connaissances préexistantes et connaissances immanentes, entre stabilité et variation (Codamines, 2005), où ces résultats ne sont donc pas fondés d'un point de vue scientifique. Cependant, une grande partie des travaux de l'ingénierie des connaissances se focalise maintenant sur la constitution d'*ontologie*, c'est-à-dire de représentation formelle de la connaissance. L'objectif est d'établir des liens entre la langue et les connaissances.

Pour nos travaux, l'interprétation de l'analyse textuelle a permis d'appréhender les caractéristiques des matériaux sous un nouvel angle. L'étude de notre corpus de texte nous a permis d'interpréter concrètement le rôle des matériaux en architecture, et de mettre en valeur les interactions entre l'acier, l'aluminium, le bois, la brique et le béton, ou d'interpréter l'influence des différentes caractéristiques des matériaux. Par exemple, nous pouvons supposer que le choix des matériaux bois et /ou brique possèdent des similitudes d'ordre décoratif (tissage, etc.), ils correspondent aux traitements de peau, d'épiderme propres aux revêtements de façade, de toiture et de sol. Ces caractéristiques communes peuvent faire l'objet de thématiques qui concernent différents matériaux.

## CONCLUSION ET DÉVELOPPEMENT

Notre corpus de texte nous a permis d'interpréter concrètement le rôle des matériaux en architecture, et de mettre en valeur les interactions entre l'acier, l'aluminium, le bois, la brique et le béton, ou d'interpréter l'influence des différentes caractéristiques des matériaux. Cette analyse est un support pour illustrer l'étude des significations des matériaux.

Les résultats de cette étude, ou d'études textuelles complémentaires, permettent de proposer de nouvelles (re)structurations, (ré)articulations, (re)constructions des connaissances propres aux choix des matériaux. Il devient alors envisageable d'exploiter ces résultats pour paramétrer des outils d'aide à la conception.

L'exploration de deux pistes de réflexion nous paraît pertinente, la première s'intéresse aux données de saisies des outils d'aide à la conception, la seconde s'oriente vers une proposition de navigation pour traiter les données de sorties des outils d'aide à la conception :

- nous pouvons imaginer un outil basé sur la recherche par image. L'analyse textuelle peut devenir une méthode pour « coder » les images (photographie, plan, coupe, façade, etc.) des projets étudiés qui constituent le corpus de texte. Comme l'analyse textuelle fait ressortir des interactions fortes entre certains matériaux comme le bois et la brique, l'acier et l'aluminium, il serait intéressant de pondérer ces liens au sein du moteur de recherche par image.
- par ailleurs, ces travaux peuvent faire l'objet de fiches thématiques reliées par un réseau de liens de type hypertexte selon les résultats de l'analyse textuelle. En effet, les termes communs à plusieurs matériaux, comme « perforer », « panneau », « rappeler » peuvent faire l'objet de fiches thématiques. Par exemple, le terme « perforer » fait appel au concept de transparence, de légèreté. Cette fiche thématique aurait pour objet le traitement de façade, elle pourrait décliner les enjeux esthétiques, le rapport au site, mais aussi une approche plus technique avec la mise en œuvre des matériaux, leurs processus de fabrication, etc. à partir de projets architecturaux issus du corpus de l'analyse textuelle. Ces fiches thématiques jouent alors un rôle de connexion entre les différents matériaux (acier, aluminium, bois, béton, terre cuite).

Ces travaux ouvrent alors, une voie innovante dans la recherche des matériaux. Cette approche sensible gagnerait à se développer au sein des outils d'aide à la conception actuellement plus orientés vers les dimensions physiques des matériaux (performance thermique, performance acoustique, performance visuelle, empreinte des matériaux, consommations d'énergie, etc.).

## **BIBLIOGRAPHIE**

- Codamines A. (2005), Sémantique et corpus, Paris, Hermès Science
- Delavigne V. (2000), Les mots du nucléaire : Contribution socioterminologique à une analyse de discours, Thèse de doctorat, Université de Rouen, pp. 324-329
- Deplazes, A. (2008), Construire l'architecture: du matériau brut à l'édifice. Berlin, Birkhäuser
- Hegger M. et Collectif. (2010), Construire Atlas des matériaux. Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes
- Kula, D. et Collectif (2008) Materiology. Berlin, Birkhauser
- Tornay, N. (2011), Vers des outils d'aide à la conception pour intégrer les dimensions techniques, écologiques et sensibles des matériaux de construction. Thèse de doctorat INSA de Toulouse
- Vittone, R. (2010), Bâtir : Manuel de la construction. 2e édition revue et augmentée, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes



**MATÉRIEL  
IMMATÉRIEL**

**-**

**MATERIAL  
IMMATERIAL**



# MATIÈRES À AMBIANCES :

## LES FORMANTS SENSIBLES DE L'EXPÉRIENCE

**CHELKOFF GRÉGOIRE**

École Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble,  
Laboratoire Cresson (directeur),  
UMR CNRS Ambiances architecturales et urbaines (directeur adjoint) - France

### **ABSTRACT.**

Nous proposons dans cet article d'explorer de quelle manière la matérialité est porteuse d'ambiance, en quoi elle participe à la définition du monde sensible. En envisageant certaines évolutions au cours de l'histoire des techniques, cette approche invite à montrer comment les facteurs d'ambiances peuvent jouer un rôle dans le design du monde matériel. Nous nous appuyons sur une investigation d'ordre documentaire et expérimental en cours sur ces questions dans notre programme de recherche personnel.

This paper deals with the combination of two terms that seem antagonist: *ambiance* and *materiality*. The relationship between the material dimension of architecture or objects of everyday life and *ambiance* are changing. In the last decade, this trend seems to increase more and more with the reduction of architectural masses. So, light, sound and climate dimensions, play a greater role in the perception, the definition and the design of the contemporary space, architectural compounds and furniture. Some of architects and designers had already thought in the past, and actually, about this trend to change architecture through a « dematerialisation » of some of its basic elements, particularly modifying its limits (as the parietal elements). Beyond these ideas, through our researches and other experiments, we learn that ambient phenomenon as light or sound makes the material object more ambiguous and multiscale. It opens other horizons in design and to think materiality in a sensitive way. In this paper we briefly discuss some roots of these questions and the possible consequences on design, ordinary uses and perception. We argue that the material dimensions and the *ambiance* are linked by particular plurisensorial « formers ».

Point d'ondes ni de flux qui ne rebondissent sur un solide ou le traversent. La lumière et les sons s'approprient les surfaces, comme les corps entrent en contact avec elles. On ne peut donc considérer la matérialité sous le seul angle de sa construction et de la stabilité, de sa morphologie et de sa structure. De multiples exemples contemporains indiquent que la matière transformée en matériau est désormais explorée en terme d'agent d'ambiance : les interactions lumineuses, thermiques, sonores, tactiles, adviennent dans la fabrication et la pensée contemporaines avec force conjointement aux évolutions technologiques.

En nous interrogeant sur ce qu'il y a de matériel dans l'ambiance architecturale, c'est notre rapport du corps -sentant et agissant- au monde matériel qui est examiné. On abordera cette dimension corporelle particulièrement en montrant comment sont mis en tension des jeux de *formants* (Chelkoff, 2003) sensibles spécifiques. Ces derniers sont définis comme des modes caractéristiques d'exploration et d'action dépendant à la fois des modalités sensorielles impliqués (voir, entendre, toucher, se mouvoir), des dispositifs matériels et des contextes sociaux d'échange et d'action.

Nous nous appuyons sur les travaux qui ont porté globalement sur la formation et la perception des ambiances en entreprenant une approche phénoménale et pragmatique des expériences corporelles et sociales des espaces construits.

Il est nécessaire de rappeler trois considérations de principe essentielles pour définir notre position théorique concernant les ambiances architecturales et urbaines :

- la plurisensorialité convoque tous les sens simultanément au cours de notre expérience somatique, en conséquence, la perception ne peut être scindée en une succession d'effets séparés les uns des autres,
- la sensibilité est éprouvée dans le cours des actions et usages de la vie quotidienne, il faut la relativiser au contexte temporel et social dans lequel elle se déroule et prend sens. En conséquence, l'ambiance n'est pas réductible à une composante purement physico-sensible au sens où toute perception en contexte se joue selon les usages et les échanges sociaux qui instruisent et infléchissent sa constitution,
- l'ambiance est placée sous le signe du temps, le monde réputé stable de la matière est en effet toujours l'objet de perturbations qui la modifient - à des échelles de durées et de rythmes étendues ou proches -, transformant l'apparence phénoménale, comme aussi parfois son état. On ne peut manquer à ce propos le caractère temporel et variable qui précisément s'oppose au caractère permanent du monde matériel construit.

Nous présenterons à présent nos réflexions portant sur les modalités d'expérience sensible du monde matériel permettant de souligner les relations entre matière et ambiance.

## **SURFACES, ENVELOPPE ET DISPOSITIF**

Les nouveaux traitements de surface comme le renouvellement de leurs agencements ne cessent de questionner les « effets » de matière. Ces effets de surface qui ont jalonné toute l'histoire de l'humanité fabricante s'enrichissent aujourd'hui de procédés toujours plus subtils reflétant une époque qui semble viser une « dématérialisation » de l'architecture en échappant au registre de la pesanteur, de l'épaisseur et de la présence pariétale. La vaste question des relations entre matière et ambiance ressentie n'a donc pas fini de faire couler de l'encre, de fertiliser l'imagination et de questionner la perception. Pour en venir à notre condition présente, remontons un peu le temps.

A l'âge de la main et de l'outil, de l'artisan, les opérations de facettagage, le polissage et l'assemblage, conduisent à une esthétique de la trace, de l'objet unique, en ce sens que même si l'objet se répète il n'est pas exactement le même, des détails distinguent les versions de chaque objet fabriqué.

L'industrialisation contient les opérations de répétition parfaite, de reproduction, qui font que l'objet se distingue à l'usage plutôt qu'à l'état initial, c'est l'usure qui marque l'histoire de l'objet. C'est aussi l'ère des composites et mixages matériels, mettant en cause la croyance sensible en la matière avec le simili, le simulacre ou avec l'association de différents matériaux ouvrant des sensorialités variées ou les mettant totalement en question. La singularité de la matière se décline alors de plus en plus sous un ensemble de multiples matériaux naturels, artificiels ou composites et mixtes (Bensaude-Vincent, 1998) ce qui en complexifie la perception et l'identification.

L'ère contemporaine semble marquée par la perspective d'une matérialité formante d'ambiance selon deux tendances au niveau de l'architecture et de l'environnement. L'une qui s'appuie sur une sorte de dématérialisation désensibilisante et l'autre sur une reconfiguration morphologique et architectonique, on pourrait dire une rematérialisation sensibilisante.

La première tendance démarre assez tôt, l'architecte André Wogenscky (1972) s'interrogeait déjà dans les années 70 quant au futur matériel de l'architecture, nous le citons longuement car cette réflexion montre comment le problème est alors posé dans cette vision d'une crainte en même temps que d'un espoir : « Il n'est pas impossible que l'architecture se dématérialise progressivement. Pour organiser la fonction primordiale d'abri et d'enveloppe, l'architecte a employé jusqu'à nos jours des matériaux solides. Mais le développement des sciences et des techniques conduira peut être plus rapidement qu'on ne le suppose, à employer des solutions moins matérielles, notamment certaines formes d'énergie. Il a déjà été expérimenté, paraît-il, des toitures invisibles qui mettent à l'abri des la pluie sans lui opposer de paroi matérielle mais un champ de forces. Il n'est pas impossible de penser qu'on pourra un jour se protéger des intempéries par une sorte d'enveloppe faite, non pas de matière, mais de radiations et qui remplirait aussi bien, mieux peut être, ses fonctions de protection. Nous ne sommes pas très éloignés d'une architecture immatérielle qui organisera le milieu physique en créant ou en modifiant des champs énergétiques. Cette architecture continuera d'agir sur les hommes. Il est certain que cette action sera modifiée fondamentalement parce que nous ne prendrons plus perception, donc conscience de l'architecture par la vue et le toucher. Pourtant nous la percevrons toujours. Elle sera peut être abstraite, invisible, intouchable parce qu'immatérielle. Elle sera toujours réelle, perçue, reçue dans notre conscience puisqu'agissant sur notre corps. Reçue dans notre conscience, donc agissant sur notre pensée. »

Voici donc une architecture intouchable mais qui agirait sur notre corps.

Cette anticipation n'est pas sans résonances aujourd'hui. L'apparition de matériaux dits intelligents se caractériseraient par trois critères : sensibles, adaptatifs et évolutifs (Joël de Rosnay<sup>1</sup>. Le mur devient lumineux ou éclairant, la paroi captante de lumière-énergie, elle peut même émettre des sons ou des signaux... « Ces matériaux possèdent des fonctions qui leur permettent de se comporter comme des capteurs - détecteurs de signaux ; des actionneurs - qui peuvent effectuer une action sur leur « environnement », et parfois comme des processeurs - qui peuvent traiter et stocker de l'information. Ils sont donc capables de modifier spontanément leurs propriétés physiques comme leur forme, leur visco-élasticité ou leur couleur en réponse à des sollicitations de l'extérieur ou de l'intérieur du matériau. Dans le domaine de la création de produits industriels ou d'architectures, l'un des enjeux est de dépasser le stade de la gadgétisation de la matière intelligente pour poser les questions de fond qui s'imposent et renouveler le vieux dogme qui nous indiquait que la fonction devait précéder la forme. Cette matière intelligente disparaît dans l'objet sans forme, a priori. Cette dilution pourrait conduire à penser que tout pourrait être dans tout ; la lumière, le son, peuvent surgir de n'importe quelle forme ou matière. »<sup>2</sup>

**1** Les matériaux intelligents, Conférence UTLS du 04 Octobre 2000 Université de tous les savoirs (CNAM) [http://www.cite-sciences.fr/derosnay/articles/utls\\_conf.html](http://www.cite-sciences.fr/derosnay/articles/utls_conf.html). On retrouve ici nos trois critères d'approche des ambiances : plurisensorialité, contexte d'usage et temporalité énoncés en début de cet article.

**2** Daniel Kula, responsable des ateliers Plastique et Maquette de l'Ensci, site web de l'ensci. Des technologies, parfois bien onéreuses indiquent une tendance à incorporer certaines données d'ambiances pour moduler le matériau. Ainsi, l'implémentation d'éléments dans la matière formant des sensibilités, n'est pas nouvelle, mais elle se complexifie avec le couplage à des medias électroniques. Outre les interactions entre les flux lumineux et sonores en tant qu'agent formant l'apparence sensible et les potentiels d'action offerts, le design tend à vouloir proposer aujourd'hui une certaine interactivité entre l'utilisateur et les créations. Les créations thermochromatiques sont sensibles à la chaleur. Elles changent de couleurs et s'habillent de nuances différentes en fonction de la température ambiante ou de la personne qui les touche. « A une époque où la techno science manipule l'extrêmement petit et gère l'énormément complexe, la matière n'apparaît plus à l'échelle de nos perceptions comme série de matériaux donnés, mais plutôt comme un continuum de possibilités. » selon Ezio Manzini.

La seconde tendance, qui n'est pas forcément antinomique, repose sur l'idée que l'architecture est ambiance dans la mesure où elle propose des modalités de perception et d'action à l'habitant<sup>3</sup>. Elle n'est pas seulement un filtre ou un émetteur aussi sophistiqué soit-il. Les dispositifs matériels qui l'agencent nous « mettent en ambiance » en créant des relations à l'altérité - l'environnement et autrui - en ouvrant des styles d'être dans le monde par la perception et l'action.

Dans cette reconfiguration de la morphologie matérielle, qui ne serait pas qu'un nouveau formalisme, l'émergence de la facture numérique dans l'architecture renforce l'ère de la fragmentation fractale, l'art de la découpe, de l'implémentation, de l'information et de l'interaction assistée et pourrait ouvrir des horizons d'exploration nouveaux pour la fabrication de surfaces et de dispositifs ambiants. Faire une ambiance repose alors sur les configurations spatiales mais de plus en plus aussi sur les surfaces de mise en contact avec l'altérité qui constituent ces espaces. L'ère de la géométrie numérique semble faciliter la voie à des morphologies surfaciques renouvelées et à des agencements qui permettraient de créer non seulement des réactivités aux flux ambiants mais qui ouvriraient des modalités d'usage et des potentialités d'action et d'adaptation.

Le champ de la matière architecturée et celui des ambiances en se rencontrant forment ainsi un monde interactif complexe. Les reconfigurations contemporaines bousculent fondamentalement les manières sensibles d'éprouver et de concevoir l'expérience de la matière. Ceci pose alors la question : quels seront alors les formants sensibles du monde matériel de demain ?

Dans les deux cas, nous pensons que ce qui est au centre des problématiques concerne le type d'expérience éprouvée et les marges d'action de l'habitant, autrement dit l'emprise qu'il peut porter sur le monde matériel et ambiant. Les interactions entre matérialité et ambiance sont donc à examiner de plus près en nous retournant sur l'expérience corporelle et somatique.

## **PLURISENSORIALITÉ EN ACTION**

Interroger nos relations au monde matériel sous l'angle des ambiances c'est interroger les modalités de formation sensible de l'expérience. De quelle manière notre expérience sensible opère-t-elle sur la matière ? Prenons un exemple. L'expérience quotidienne de la matérialité se fait en marchant sur un sol. Bien des propriétés peuvent être énoncées : souplesse, résistance, résonance, température, rugosité...

Lorsqu'on observe les qualificatifs qui aident à définir notre relation sensible au monde de la matérialité, ils semblent ressortir de registres assez délimités qui renvoient essentiellement au rapport à la gravité (poids, masse, etc.), à la texture (tactile, optique), ou encore à ses propriétés de réflexion ou d'absorption (son, lumière, chaleur, couleur). Les critères mis en jeu pour sentir la matérialité et décrypter l'impact sur l'ambiance ressentie relève, si on reprend les distinctions de Descartes, de qualités dites « secondes » puisqu'elles couvrent précisément de phénomènes sensibles qui sont liés à l'expérience corporelle. Elles sont opposées à des « qualités premières », l'étendue, la solidité, la forme, le mouvement, le nombre, désignées comme celles ne relevant pas directement d'une expérience perceptive, et qui seraient inhérentes à la matière, mesurables et « objectives ». En privilégiant cette autonomie de l'objet par rapport au sujet, les propriétés physiques deviennent les dépositaires d'une substance première. Cependant cette distinction de l'objet, commode pour la science physique, ne l'est pas pour la phénoménologie qui explore les concepts à partir de l'expérience. Qu'est ce que faire l'expérience de la matière si ce n'est en éprouver les qualités dites secondes, si ce n'est l'incorporer par le biais de

**3** L'expérimentation menée en 2003 avec P. Liveneau montre ce type de démarche. (Chelkoff et al., 2003)

relations sensibles multiples ? Il convient donc de réinterroger ces qualificatifs de manière différenciée pour envisager les relations entre matérialité et ambiance. On soulignera trois points qui peuvent intéresser l'expérience perceptive du monde matériel et de surfaces en particulier : l'haptique et le croisement des sens, le rôle du mouvement, les ambiguïtés et paradoxes sensibles.

## CROISEMENT DES SENS ET EXPÉRIENCE HAPTIQUE

L'haptique<sup>4</sup>, l'optique et l'acoustique se mêlent dans un concert complémentaire pour qualifier les objets et dispositifs matériels.

Il nous semble particulièrement évident aujourd'hui au regard de la saisie sensible du matériau que les sens corrélient des caractéristiques en établissant des ponts, des relations, entre les différents registres sensoriels. La résistance d'une surface ou et sa densité peuvent être entendues, perçues par le biais auditif selon la résonance acoustique. Merleau-Ponty affirmait déjà que *« les sens communiquent entre eux en s'ouvrant à la structure de la chose. On voit la rigidité et la fragilité du verre et, quand il se brise avec un son cristallin, ce son est porté par le visible. »*<sup>5</sup> Le son devient tactile avec l'impact, la matière prend corps<sup>6</sup>. Mais il exprime aussi le poids ou la légèreté non seulement de l'objet mais peut être de soi même. Les distinctions sont subtiles entre matériaux du point de vue perceptif ordinaire. *« J'ai l'impression que cette matière qui a été utilisée pour paver la rue, ça fait un pas assez sec, il pèse le pas, il pèse, alors que si tu marches dans du goudron ça n'a pas du tout le même son, ici, ça a quelque chose de plus pesant comme son, le son du pas. »*<sup>7</sup> Cette indication révèle en quoi le sol, sa matérialité ressentie par le biais du son, est en quelque sorte formant du marcheur dans la mesure où il exprime l'être marchant et lui indique en même temps qu'il agit lui-même d'une certaine manière, tel un miroir qui reflète notre image. Le son d'impact forme une perception sonore des solides, alors que le son aérien se joue autrement : la réflexion acoustique des différentes surfaces composant l'espace est intégrée par le temps de réverbération global perçu.

Il est aussi par exemple possible d'évoquer l'idée de « masse optique » en fonction des caractères de présentation d'une surface matérielle. La notion de masse passe ici du registre de la pesanteur à celui de l'occupation du flux optique. La lumière « forme » indéniablement la perception des surfaces dans leur qualité.

Dans la vie quotidienne, ces informations intersensorielles sur le monde se combinent et forgent le milieu ambiant. Cependant ces relations ne sont pas facilement établies du côté de la conception.

Au titre de l'ambiance, nous nous intéressons donc particulièrement aux passages entre sens, aux combinatoires sensorielles qui caractérisent l'expérience globale et qui orientent les modalités d'exploration corporelle. Car, si la simultanéité des perceptions dans différents canaux sensoriels est la règle, il semble bien que la conscience fasse basculer l'attention d'un sens à l'autre selon les incidences et les besoins. D'autre part, les procédures d'exploration sont propres à chaque sens, mais le son, le tact et la vision entrent en tension à travers un objet d'expérience telle que la surface. Les descripteurs révèlent des croisements possibles entre sens quand il s'agit de caractériser une surface matérielle. Ainsi le *poli* d'une surface met en jeu différentes modalités sensibles et les

**4** Ce terme couvre les sensations tactiles et kinesthésiques.

**5** Merleau-Ponty M., *Phénoménologie de la perception*, Gallimard, 1945.

**6** L'idée que le son est matière était une croyance ancienne, « Si on entend les sons, si on entend la voix, c'est que leurs éléments se sont glissés dans l'oreille et ont éveillé ce sens de l'ouïe. Je dis leurs éléments car force est de reconnaître que le son et la voix sont formés de particules matérielles. (...) La voix, d'ailleurs, déchire souvent la gorge (...) Si donc trop parler dévore une partie de notre substance, c'est que la voix est faite, elle aussi, d'une substance matérielle » (Lucrèce, Ed. de 1995)

**7** Chelkoff G. *Entendre les espaces publics*, 1988, citation d'entretien

articule : le tactile part l'intermédiaire de la main (ou du pied) qui touche et ressent précisément les informations de texture et de rugosité, l'oeil qui interprète l'orientation des rayons lumineux et l'oreille qui peut capter le caractère réflexif d'une surface. Dans l'expérience de tous les jours, il apparaît que si la perception haptique (contact et kinesthésie) est fortement informatrice de la nature d'une surface (résistance, rugosité, température, etc.), elle croise fortement aussi les autres sens. Elle est donc centrale dans notre approche. La matière pour être mise en forme et perçue demande un certain contact, ce contact s'établit à partir de plusieurs canaux sensoriels, un contact ambiant.

Il faut rappeler que le mot « haptique » est employé au dix-neuvième siècle par l'historien de l'art autrichien (Riegler, 1984), dont la thèse est que l'art progresserait en déployant un univers sensible passant de l'haptique à l'optique. Du côté de l'œil, il y aurait ainsi un œil optique et un œil tactile.

Gilles Deleuze (1980) a repris cette distinction dans l'opposition célèbre Espace lisse (haptique) / Espace strié (optique). « Voyez, la vue optique, ce serait la vue éloignée, relativement éloignée, au contraire l'exercice haptique ou la vue haptique, c'est la vue proche qui saisit la forme et le fond sur le même plan également proche. »<sup>8</sup> Son argumentation est que l'haptique correspond à un espace fait de proximité et d'affects intenses sans hiérarchies, ce qui en fait un espace lisse sans profondeur visuelle. Ce serait un espace d'immédiateté et de contact, qui permet au regard de palper l'objet, de se laisser investir par lui et de s'y perdre. Cet espace aformel, sans contour de forme bien précis et sans représentation formelle du sujet proposerait donc un mode d'exploration spécifique, un mode d'être. Tel serait le principe qui le caractérise et que nous appellerions son « formant », au sens où c'est une procédure particulière d'exploration qui est mise en jeu, en se formant à la fois en nous et dans l'objet.

La deuxième voie principalement développée par l'art occidental exprimerait selon Deleuze une *vision éloignée* et déployée dans un espace optique ou strié. L'espace strié est rapporté au modèle du tissu, avec sa structure, sa finitude et son ordre dynamique spécifique. C'est un monde à comprendre comme figé et essentialiste, articulé sur des quadrillages rigides découlant de l'invention de la perspective qui mettent à distance les objets, valorisent l'espace et éloignent de leur matérialité.

Ces deux modèles nous semblent renvoyer à deux modes d'exploration et d'action *formant* notre relation au monde matériel et ambiant. Ils impliquent en effet des types de relations sensibles spécifiques qui font interagir étroitement l'objet et le sujet.

## PERCEPTION DE SURFACE ET RÉSEAU OPTIQUE EN MOUVEMENT

Gravée, frottée, marquée, découpée, la surface semble constituer l'un des instants décisifs de l'interaction avec un flux ambiant, sonore, lumineux ou thermique dans le plan du corps que ce soit en contact ou à distance. Le second sens qui excelle en matière de surface c'est l'œil sensible au réseau optique.

Du point de vue de la vision et de la lumière, J.J. Gibson (1986) remet en cause comme on le sait l'idée que l'image rétinienne constitue le point d'origine de l'expérience visuelle en attribuant un rôle primordial à l'agencement des surfaces en réseau.

Explorant l'expérience visuelle d'un point de vue « écologique » c'est à dire selon ses propres conditions d'exploration in situ, il propose que le réseau total des rayons lumineux atteignant l'observateur fournit une information directe sur l'agencement de l'espace ainsi que sur le mouvement de l'environnement de l'observateur par sa « structure » et les diverses informations dans le réseau optique. La théorie de Gibson est centrée sur la

<sup>8</sup> Extrait du cours de Gilles Deleuze à l'Université Paris 8 du 19.05.81, <http://www2.univ-paris8.fr/deleuze/article.php3>

perception visuelle en mouvement, on voit que les variations d'informations sont produites par le mouvement de l'observateur (et celui des objets) dans l'espace. Cette théorie peut être envisagée à propos des autres sens, tout en examinant leur régime spécifique de fonctionnement vis à vis de la matérialité de l'environnement. Il en va ainsi du domaine haptique, la main immobilisée « sent moins » la nature de la surface qu'elle touche. Lorsque nous nous mouvons, notre réseau sensible entier est transformé : le mouvement crée de l'information, des informations sur l'espace, mais aussi sur la matérialité des surfaces, qui s'écoulent dans le temps.

A ce propos, Descartes observait que les qualités sensibles sont variables, changeantes et inconstantes et sont à ce titre peu fiables. En terme de ressenti, la matérialité construite est en effet soumise aux flux et donc aux variations qui la font changer d'apparence ou de sensibilité à travers l'expérience corporelle qui nous la révèle par le mouvement et dans le temps. La matière sonne, luit ou rayonne selon les conditions de mise en oeuvre, d'utilisation ou de temporalités (éclairage, météorologie, usages, etc.). Ces aspects ne sont pas pour rien dans la définition et les variations de perception et d'action. Cependant, ces variations ne doivent pas nous enlever l'idée qu'il existe des structures de variations, ou des styles de variations qui s'inscrivent dans des registres spécifiques et permettent de maintenir l'unité de l'objet. Par exemple, une surface polie va certes varier en fonction de l'incidence lumineuse mais elle va le faire dans un registre particulier qui sera distinct des variations d'une surface striée. Il va donc se produire des constantes dans les variations. Lorsque ces variations sont difficiles à saisir, des ambiguïtés et des paradoxes émergent au regard de la différenciation entre matière et ambiance.

## AMBIGUÏTÉS ET PARADOXES SENSIBLES

A regarder de plus près, la confrontation entre dimensions matérielles et ambiantales est faite de paradoxes et d'ambiguïtés dont profite sans se priver l'activité artistique. Dans le domaine de l'art, les œuvres de James Turrell sur la lumière nous apprennent ainsi à interroger fortement l'expérience visuelle et la constitution même d'un espace, d'un lieu circonscrit et matérialisé par la lumière : « il n'y a plus rien à voir qu'une lumière n'éclairant rien, donc se présentant elle-même comme substance visuelle » (Didi-Huberman, 2001)<sup>9</sup>. Il s'agit d'un objet purement ambiant. La tactique de Turrell semblerait donc de « soumettre le regard inquiet à un champ de perception vide d'objets et de plans, un champ où la lumière est tellement lourde, homogène, intense et sans source, qu'elle deviendra comme la substance même - compacte et tactile - du lieu tout entier ». Dans ce cas, on suggère que le principe formant de l'expérience proposée réside dans cette lumière qui devient paradoxalement solide et impalpable, il se traduit par une exploration corporelle active consistant à interroger les limites de cet « objet » qui n'en est plus un au sens traditionnel de l'objet palpable.

Le même genre de phénomène de perception d'une volumétrie sonore était décrite par Paul Valéry, comme si le son était capable de matérialiser une enveloppe, exprimant cette idée que le son emplit et crée à la fois une enceinte. Le monde sonore forme comme un solide, « comme un temple bâti autour de ton âme ; tu peux en sortir et t'en éloigner ; tu peux y rentrer par une autre porte ».<sup>10</sup> Représenter le sentiment de vide au moyen d'une grande densité sonore, c'est-à-dire par le plein, est une exigence qui a émergé dès les premières œuvres de Sciarrino<sup>11</sup> selon les propres dires du compositeur. Les ambiguïtés et paradoxes sensibles entre monde matériel et ambiance se multiplient dans la ville contemporaine, ou se déplacent, et les significations ou interprétations semblent ainsi de plus en plus mouvantes et instables.

<sup>9</sup> L'homme qui marchait dans la lumière, Paris, Minuit, 2001

<sup>10</sup> Paul Valéry, *Eupalinos*, Gallimard, 1945, p. 42 et suivantes

<sup>11</sup> <http://revues.mshparisnord.org/filigrane/pdf/107.pdf>, Raiola, M.

## DISPOSITIF MATÉRIEL ET FORMANT D'AMBIANCE

Les dispositifs et leur matérialité sont formants de regard, d'écoute et d'action dans la mesure où ils définissent des potentialités dans ces domaines. Ils n'offrent pas seulement des affordances, qui sont selon Gibson (1986) relatives aux capacités perceptives et motrices de chaque espèce vivante, ils les qualifient, et en retour, ces regards et écoutes les remodelent. Car si la notion d'affordance permet d'énoncer une potentialité d'action telle que passer, marcher, enjamber, voir à travers, etc., elle n'en précise pas la forme ou le mode, le style d'exécution ou la manière de faire en contexte. Selon sa configuration, un escalier peut permettre de monter ou de descendre les marches de manière différenciée, ou encore, la configuration d'une assise permet de s'asseoir selon des postures spécifiques, autrement dit le mode d'action est mis en jeu autant que l'action elle-même. Nous suggérons ainsi l'idée que la relation aux objets et dispositifs construits dépend de la manière dont on peut corporellement s'en servir. C'est en cela que réside la notion de formant sensible qui est pour nous une clé de l'approche des ambiances architecturales et urbaines. Cette notion concerne donc comme on le voit directement les manières par lesquelles un dispositif matériel est corporellement explorable et fonde une manière d'être, d'agir et de sentir correspondante. Certaines modalités sensorielles peuvent être mise en jeu à différents niveaux selon les performances qu'elles assurent de manière plus ou moins pertinente sur un type d'objet. C'est donc un système de codépendance qui caractérise la relation entre le sujet et l'objet matériel. Les formants sensibles se déploient dans et par l'expérience active, c'est ainsi qu'un objet est d'abord senti et se constitue. Marcher sur un sol révèle à travers différents sens la nature de ce sol et, simultanément, le marcheur saisit les possibilités de frottement ou de glissement du pied sur ce sol. Il crée / forme une potentialité de démarche particulière. Cela interroge un style d'action qui incorpore et instrumente le dispositif matériel en même temps. La saisie de la matière par le corps et l'appareillage sensoriel et les modalités sous lesquelles on va agir, le style de perception et d'action dans un contexte, sont codépendantes.

## CONCLUSION

Les évolutions contemporaines semblent bien *mixer* les deux mondes, celui de la matière et celui de l'ambiance. Des flux atmosphériques habitent les solides, mais ce sont aussi des flux perceptifs et actifs. La matérialité n'est pas seulement productrice d'effets de lumière ou de son. Cette première proposition correspond à une approche purement causaliste dans lequel la matière serait productrice d'ambiance. Mais l'ambiance n'est pas seulement faite de flux immatériels, cette seconde proposition laisse de côté les potentialités d'usage et les dimensions contextuelles.

En conclusion, on peut dire que si c'était la matière qui donnait forme à l'ambiance, voilà qu'aujourd'hui c'est l'ambiance qui tendrait à donner forme à une matière qui devient d'une part plus ambiguë, introduisant des paradoxes de perception mais aussi en tant qu'elle interagit avec l'utilisateur, voire que l'utilisateur la transforme. En fait les deux processus coexistent et ouvrent des potentialités intéressantes pour faire des facteurs ambiants le centre de la réflexion architecturale en la ramenant à l'homme qui en est à la fois le producteur et l'habitant. Ainsi à une approche strictement structurale de la dimension matérielle vient s'accoler une approche modale faite d'attention à la manière dont l'homme forme l'environnement qu'il construit.

## REFERENCES

- Bensaude-Vincent B. (1988), *Éloge du mixte : Matériaux nouveaux et philosophie ancienne*, Paris, Hachette Littératures
- Chelkoff G. (2004), *L'hypothèse des formants*, in *Ambiances en débat*, Bernin, A la croisée
- Deleuze (1980), *Mille Plateaux*, Paris, Éditions de Minuit.
- Didi-Huberman G. (2001), *L'homme qui marchait dans la lumière*, Paris, Minuit
- Gibson J. J. (1986), *The ecological approach to visual perception*, London, LEA
- Hatwell Y., Streri A., Gentaz E. (2000), *Toucher pour connaître. Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle*, Paris, PUF
- Lucrèce, *La nature des choses*, traduit et présenté par Chantal Labre, Paris, arléa, 1995.
- Riegl A. (1984), *Le culte moderne des monuments. Son essence et sa genèse*
- Valéry P. (1945), *Eupalinos*, Paris, Gallimard
- Wiczorek. (1984), *Avant-propos de Françoise Choay*, Paris, Éditions du Seuil (Espaces)
- Wogenscky A. (1972), *L'architecture active*, Paris, Casterman



# LA MATIÈRE VÉGÉTALE AUX ABORDS DE L'HABITAT COLLECTIF

APPRENDRE DU PETIT JARDIN  
POUR CONCEVOIR UNE POLITESSE DES MAISONS

PARIS MAGALI

École Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble  
Laboratoire Cresson  
UMR CNRS Ambiances Architecturales et Urbaines - France

## ABSTRACT.

Plants matter is often used to develop urban dense areas and especially housing façades and housing surroundings. Architects often consider plants matter as inert and functional : as a physical frontier involved in the residentialisation process, a climatic and luminous controller and more recently a catalyst of biodiversity. The gardened nature of this matter does not provoke so much interest, except through ornament and the new enthusiasm for urban agriculture. With the ethnographic study of 83 housing surroundings little gardens located in Grenoble (Rhônes-Alpes) and Paris (Ile-de-France), we reveal that by handling the garden materials the unhabitants create their own confort and homescape as well as they deal their neighborhood relationships. Designing housing envelopes that could shelter those kind of little gardens could help to enhance the dwelling together in urban dense contexts or the «housing politeness» designed by the architect Renée Gailhoustet. Exploring some of the places studied, we develop this idea by giving rise to the formal and sensory qualities of the unhabitants' gardens as well as their supports designed by architects.

Keywords: matière végétale, petits jardins urbains, abords de l'habitat, mieux-vivre ensemble, politesse des maisons

## RENOUVELER LA CONCEPTION DE L'HABITAT COLLECTIF DANS L'ÉPAISSEUR DU PETIT JARDIN ?

### « Le vilain petit jardin »

Aux abords du logement - sur balcon, loggia, terrasse ou en pieds d'immeuble - le petit jardin est un espace ingrat d'un point de vue agronomique comme paysager. Son sol est de mauvaise qualité voir absent. Ce petit jardin est trop ensoleillé, trop venté ou *a contrario* coupé des éléments naturels : à l'ombre des bâtiments, il ne rencontre que rarement le soleil et sans contact avec le ciel, il ne connaît pas la pluie. Son jardinage met ainsi souvent en jeu des techniques de végétalisation hors-sol peu accessibles aux novices et une connaissance aiguë des exigences des végétaux et de leur cycle biologique.

Exposé au voisinage, à la vue des voisins et des passants et parfois même préhensible par ces derniers, soumis également à leurs productions sonores et s'exposant lui-même en retour bon gré mal gré, le petit jardin est un espace « intranquille » bien loin de l'image convenue du jardin de paradis. Sa surface réduite, n'excédant pas 100m<sup>2</sup> et s'élevant en moyenne à 20m<sup>2</sup>, interdit aux plus motivés de mettre en place un « vrai » jardin.

Sa composition se résume alors la plupart du temps à son contour, qui se joue néanmoins dans l'épaisseur, et qui abrite la cinquième pièce du logement, « la maison du dehors » (Mathieu, 2010).

Si ce petit jardin est si vilain pourquoi fait-il l'objet de tant d'attention de la part des habitants qui, comme l'avait déjà constaté Bernard Lassus (1975) « les multiplient à partir de la moindre surface disponible, que ce soit un mur, une bordure de fenêtre, une loggia ou un jardinet »<sup>1</sup> ? Que peut-on apprendre de ce soin porté aux apparences extérieures de l'habitat ? L'architecte Edouard François (2007) avoue s'inspirer des réalisations habitantes pour imaginer le « derme » de ses projets d'habitation, il souligne « l'héroïsme ordinaire »<sup>2</sup> de ces jardiniers inexpérimentés qui oeuvrent dans des conditions et avec du matériel inappropriés et dont l'entreprise aurait pour objet de filtrer la ville en vue de lui échapper et de minimiser sa densité. François fait cependant parti des rares concepteurs à considérer le labeur des jardiniers et les qualités plastiques de leur réalisation.

### **L'architecture végétale ou la négation du jardin**

Fréquemment utilisé dans l'enveloppe de l'habitat, le végétal y est cependant trop souvent considéré comme une matière inerte et utilitaire, la place qui lui est accordée est sans épaisseur et ainsi distancée des usages.

Le végétal serait premièrement capable de structurer les territoires en séparant les espaces privés entre eux et le privé du public. Le Corbusier proposait déjà avec son projet manifeste d'*Immeuble-Villas* (1922) d'envisager le jardin comme un dispositif séparateur le dépossédant ainsi de sa matérialité et le réduisant à une idée de jardin selon Christian Moley (2003). Les plus récents processus de résidentialisation, mettant en œuvre un ensemble d'interventions spatiales afin que l'habitant « s'approprie mieux » son logement et ses abords et afin de lui reporter leur gestion, amènent également à considérer le jardin comme un séparateur. La résidentialisation s'illustre principalement dans la mise en place de séparations verticales (généralement des grilles métalliques doublées par la suite d'une haie végétale) visant à délimiter le logement de l'espace public sans que grande attention soit portée à ce qui se passe entre la grille et le logement. Entre grille et logement et en façade, en extension des logements, des espaces intermédiaires sont néanmoins créés à travers le traitement du sol et l'installation de jardins en pied d'immeuble ou en façade (balcons « agrafés »). Mais même après plusieurs années de vécu, ces espaces intermédiaires restent la plupart du temps des pièces rapportées, des espaces tampons hors d'usage au sens propre comme figuré ou au mieux des espaces barricadés derrière de multiples couches protectrices.

Outre son caractère séparateur, dans un second temps, c'est surtout le caractère performant et performatif du végétal qui se trouve sur le devant de la scène architecturale. Ce végétal serait en effet capable d'améliorer les performances énergétiques et écologiques<sup>3</sup> de l'édifice. De jardin, le végétal est alors la plupart du temps réduit à une mince paroi verticale ou horizontale, en façade ou en toiture, système hors-sol technique et fragile qui se satisfait ainsi peu des interventions habitantes. Ses performances comme climatiseur passif en façade comme en toiture et en termes de rétention des eaux pluviales essentiellement pour les toitures sont avérées<sup>4</sup>.

<sup>1</sup> Lassus B. (1975), Paysages quotidiens ; de l'ambiance au démesurable, Catalogue de l'exposition Musée des arts décoratifs 8 janvier - 9 mars 1975, Centre Beaubourg - Centre de Création Industrielle, p.35

<sup>2</sup> François cité par Leenhard et Labertini (2007) dans leur ouvrage *Jardins verticaux du monde entier*

<sup>3</sup> Au sens de l'écologie faune-flore à l'échelle des habitats comme à celle des continuités écologiques

<sup>4</sup> Ce rôle de climatiseur passif incombe au phénomène d'évapotranspiration, aux effets d'ombrage, à l'absorption du rayonnement solaire et à la régulation des écoulements d'air. Voir Paris, M. (2011), 1.1. Le végétal comme argument « écologique », un végétal hors de portée de l'usager ? Le végétal donneur d'ambiances ; jardiner les abords de l'habitat en ville, Grenoble, Cresson, Université de Grenoble, Thèse de doctorat d'architecture et d'urbanisme, pp.21-27

Il n'est pas ici question de les remettre en cause, mais de questionner le rapport à la matière que cette technicisation du végétal implique, l'éloignant toujours un peu plus de ses usagers. Pour se marier à l'architecture de l'habitat, le végétal doit-il toujours être utile ? Le processus décrit par Stéphane Collet (2010) selon lequel la plante est assimilée à un objet pour que l'édifice qui l'accueille soit considéré comme un organisme vivant est-il inévitable ? Est-il sensé d'envisager le végétal comme une matière capable d'auto-gestion, exempte de soin, à l'image de la nature « naturelle » alors que les systèmes techniques dont il fait partie sont artificialisés à l'extrême ?

Troisièmement, plus récemment, à travers les nouvelles toitures et façades végétales écologiques<sup>5</sup> et un retour en force des terrasses jardins, le végétal est considéré comme un catalyseur de biodiversité. Il constitue alors un milieu propice à l'accueil d'une faune « naturelle », permettant aux bâtiments de devenir « à biodiversité positive »<sup>6</sup>. Ce milieu est bien souvent toujours éloigné des usages habitants, il s'apparente aux réserves ou « tiers-paysages » (Clément, 2003) inaccessibles à l'homme. Notons néanmoins que des recherches intéressantes sont actuellement menées sur la contribution des jardins privés et de leur jardinage à la biodiversité. L'écologue Canadien Christopher Lortie (2008) nous montre que la biodiversité des jardins privés est beaucoup plus élevée que celle des jardins publics. L'ethnologue Pauline Frileux (2008) souligne quant à elle les enjeux écologiques et sociaux des haies des jardins pavillonnaires, haies sur lesquelles les efforts jardiniers portent du fait de la réduction des parcelles (de 300 à 1000 m<sup>2</sup>) et du rôle symbolique et protecteur qu'elles jouent.

La dernière et quatrième facette « utilitaire » du végétal est son caractère nourricier qui *a priori* le rapprocherait du jardin et de son habitant comme c'était autrefois le cas des Cités-jardins et de leurs jardins familiaux. Il n'en est cependant rien, aux abords du logement, le végétal nourricier est aujourd'hui hors-sol, hydroponique, disséminé dans les minces parois végétales verticales ou dans des systèmes de serres agrafés en façade ou posés sur la toiture et dont gestion et exploitation sont externalisées<sup>7</sup>.

Dans les années 90 et 2000, un groupement d'architectes appelés les « nouveaux contextualistes »<sup>8</sup>, dont ont fait partie Edouard François et Duncan Lewis, propose des architectures créatrices de paysages, non pas mimétiques ou effacées pour éviter de « casser » le paysage<sup>9</sup>, mais dont l'objet est de troubler la perception afin de créer articulations et ruptures. Loin du végétal inerte et utilitaire que nous venons de parcourir, au sein de ces architectures paysages, le végétal y est une matière vivante et imaginante, force de la nature transformant l'édifice en organisme vivant mais aussi force des

**5** Les toitures végétales écologiques sont appelées « toits bruns » en Suisse. Flore locale et matériaux locaux (pour composer le substrat du toit) sont convoqués. Le substrat n'est pas homogène sur toute la surface du toit afin de favoriser une diversité des écosystèmes. Du côté des façades écologiques, l'emploi d'une flore locale pouvant par ailleurs servir de gîte et de couvert à la faune est de plus en plus favorisé, on prend en compte la croissance « naturelle » des plantes (plantes grimpantes et retombantes en partie haute, arbustives et herbacées en sous-bassement) et on intègre au sein de la structure de la façade végétale et parfois même du bâtiment des gîtes pour les oiseaux et les chauves-souris.

**6** <http://www.biodiversite-positive.fr/> (consulté le 10 octobre 2012). Le terme de « bâtiment à biodiversité positive » a été proposé en 2011 par la filiale nord de Bouygues Construction en partenariat avec l'Université Catholique de Lille et relayé par Natureparif (Agence régionale pour la nature et la biodiversité en Ile-de-France) à l'occasion de sa récente publication : « Bâtir en favorisant la biodiversité ».

**7** Si de nombreux systèmes de ce type sont aujourd'hui développés de part le monde et notamment en France, citons les travaux pionniers de l'association New York Sun Works qui développe depuis maintenant plus de 10 ans des systèmes de serre hydroponiques en toiture et façade dans le milieu scolaire et plus récemment celui du commerce. Voir Caplow T. (2008), Vertically integrated greenhouse : realizing the ecological benefits of urban food production, Ecocity world summit 2008; 7th international ecocity conference San Francisco, California USA, Academic and talent scouting sessions, En ligne sur : [http://www.alchemicalnursery.org/index2.php?option=com\\_docman&task=doc\\_view&gid=233&Itemid=27](http://www.alchemicalnursery.org/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=233&Itemid=27) (consulté le 11 octobre 2012)

**8** Migayrou F. (1998), Contextualisme, D'architectures, n°86, p.40

Voir également : (1999), Archilab : Orléans 99, première rencontre internationale d'architecture d'Orléans, Paris, Mairie d'Orléans, Catalogue d'exposition.

L'affiliation des différents architectes qui répondent à ce courant est également proposée dans l'ouvrage d'Hervé Potin et Anne-Flore Guinée « Matière(s) d'architecture » (1999)

**9** Mimétisme et effacement que proposait le courant sitologue des années 70-80.

Figure 1  
Collage réalisé  
par l'auteur avec  
Walter Simone  
pour le colloque  
international EDRA  
(Environnemental  
Design research  
Association)  
38 Building  
Sustainable  
Communities  
(2007)



1

créations jardinées des habitants questionnant le statut du concepteur : « Duncan Lewis aime imaginer ses bâtiments méconnaissables, bricolés par leurs occupants, engloutis sous les plantes, retournant à un état paradoxal d'architecture sans architecte »<sup>10</sup>.

Si elles s'inspirent parfois des créations habitantes et interrogent le « rôle d'architecte » joué par l'habitant lorsqu'il jardine, les réalisations des nouveaux contextualistes ne laissent cependant que peu d'espaces au jardin le réduisant encore une fois à son idée plus qu'à sa matérialité et ses usages. L'enjeu végétal est en effet tout autre pour eux : celui d'une nouvelle esthétique de façade, un derme architectural apte à semer la confusion entre art, architecture et paysage.

Regagnons maintenant le jardin dans son épaisseur à travers les usages ordinaires, les échanges de voisinage, les affects, les perceptions et les sensations dont il peut être le support au quotidien.

## **JARDINER POUR MIEUX-VIVRE ENSEMBLE : TOUR D'HORIZON DES CRÉATIONS HABITANTES**

### **Vous êtes bien aimable mon petit jardin... pour moi comme pour l'autre**

Le jardin épais, celui qui malgré sa petitesse est façonné par la main et au sein duquel le corps se meut est un prolongement du logement et du corps. Le sociologue Marc Breviglieri (2006) nous apprend que l'on habite essentiellement à travers sa main, le jardin serait ainsi l'emblème de l'habiter, beaucoup d'auteurs défendent cette idée (Heidegger 1954, Ingold, 2000, Harrison 2007). Comme nous le dit Anne Cauquelin (1989), c'est un lieu « aimable,

---

<sup>10</sup> À propos des logements de la Cité Manifeste de Mulhouse : Namias O. (2007), Duncan Lewis - Scape architecture ; Le radical apprivoisé, D'Architectures n°163, p.14

Figure 2  
Photographie  
de l'auteur, été  
2012, ensemble  
résidentiel les  
Étoiles, Givors (69),  
Jean Renaudie  
architecte (1982)



2

moins soumis aux intempéries que le dehors, un lieu qui sent bon, qui est doux, qui fait de jolis bruits (...) Un dehors qui est un petit dedans». Le petit jardin est ainsi un lieu intime, à la mesure du corps et dont le corps prend la mesure à travers les soins jardiniers. Son contour ainsi que l'espace qu'il délimite sont immédiatement appréhendables par les sens, le petit jardin est un espace proxémique au sens que lui donne Roland Barthes (1976), il est : «la sphère du geste immédiat (...) là : où le regard porte (ou l'odeur, ou le bruit), où l'on emporte et l'on recèle, où l'on atteint et où l'on touche»<sup>11</sup>. Dans le numéro Natures urbanisées de la revue d'Ethnologie Française (Bonnin, Clavel, 2010), le rôle configurateur et sécurisant de ces petits jardins est mis en avant : ils permettent de reconstruire «un ordre du monde» à l'abri du dehors et d'apaiser les angoisses liées à ce dernier<sup>12</sup>. Selon le chercheur nord-américain Robert Harrison (2007), le jardin est le propre de la condition humaine qui consiste à porter soin aux choses et aux êtres en les configurant, jour après jour, ce même dans les conditions d'habiter les plus extrêmes<sup>13</sup>.

Le petit jardin est un lieu intime, mais il n'en est pas pour autant hermétique au dehors et ne peut l'être «s'il ne veut pas devenir synonyme d'une terrible assignation à résidence, à l'écart des vivants...» (De Certeau et al. 1980)<sup>14</sup>. Le petit jardin est aimable car il contribue à l'hospitalité du dehors en «se prêtant» à celui-ci, Caroline Stefulesco (1993) parle de «d'effet d'emprunt»<sup>15</sup> pour désigner les débordements végétaux des jardins privés sur l'espace public. Il joue au sens large un rôle de médiation entre dedans et dehors, entre soi et l'autre. Pour ce, il contribue d'une part à la constitution des bulles proxémiques concentriques qui nous entourent (intime, personnelle, sociale et publique), au sens de Edward T. Hall (1966) : bulles qui nous séparent et nous lient les uns aux autres. D'autre part, le jardin offre un potentiel d'expression à l'habitant, l'acte configurateur n'est pas uniquement replié sur le soi. Le jardin s'adresse également au voisin, au dehors, eux-mêmes parfois intégrés à sa composition, il accepte à la fois de s'ouvrir autant qu'il accueille. Le courant architectural le plus représentatif de cette propriété du jardin est sans doute l'habitat intermédiaire des années 70 et 80 caractérisé par de grandes surfaces de

<sup>11</sup> p.156

<sup>12</sup> En nous appuyant sur la thèse de Jean-Paul Thibaud (2002) selon laquelle l'acte de configurer est une conséquence du caractère paradoxal de l'ambiance à la fois insaisissable et si familière, nous pourrions dire que jardiner permet de résister à la dissolution de l'ambiance et à l'immensité et à l'étrangeté du dehors.

<sup>13</sup> Harrison prend notamment appui pour sa démonstration sur les jardins des SDF new-yorkais

<sup>14</sup> p.209

<sup>15</sup> pp. 84-86

terrasses-jardins de pleine terre ou proposant de généreux contenants en limites, courant dont les réalisations de Jean Renaudie sont caractéristiques. Pour Renaudie, la terrasse-jardin est bien plus qu'une extension du logement ou qu'une pièce supplémentaire, elle est un support de communication (directe ou indirecte) entre voisins. Ces terrasses de forme triangulaire (tout comme les plans des appartements) s'érigent vers le dehors, à sa rencontre.

À la même époque, Renée Gailhoustet donne aux terrasses de ses réalisations le même sens que celui de Renaudie auquel elle adjoint le caractère intime dont nous parlions plus haut. En développant des édifices de forme octogonale, elle conçoit la terrasse comme «une assise personnelle au logement, très sécurisante », celle-ci « rend le logement plus intime », elle isole des voisins à travers sa végétation et permet ainsi à l'habitant de créer un ensemble de relations spontanées entre l'intérieur et l'extérieur (Cité par Chajlub, 2009). Gailhoustet conçoit le jardin aux abords du logement comme le support d'un double mouvement d'intériorisation et d'extériorisation, de repliement et d'ouverture, voire même un équilibre entre ces deux mouvements à même de donner corps à ce qu'elle nomme la politesse des maisons : «Portes chaleureuses, porches accueillants, escaliers pour grimper et s'asseoir, perrons discrets ou somptueux, balcons fleuris, la maison, dans la ville, s'occupe de l'autre, connu ou inconnu » (Cité par Chajlub, 2009).

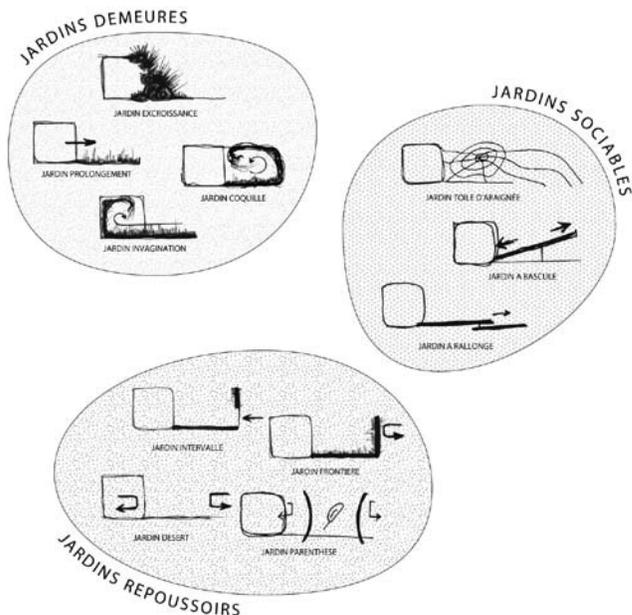
### **Configurations de jardins polies... mais aussi impolies**

Bien loin du caractère inerte et utilitaire du végétal, nous défendons l'idée selon laquelle la connaissance des pratiques jardinières est d'un intérêt premier pour la conception architecturale. Le jardin aux abords du logement et son modelage seraient porteurs d'un mieux-vivre ensemble, d'une politesse des maisons, offrant aux habitants la possibilité d'inventer leur confort et leur paysage domestique tout en négociant leurs relations de voisinage. Aux limites surtout -en façade, en limites latérales et en limite frontale- mais aussi au sein du jardin, les habitants configurent en mobilisant les ambiances du lieu et en agissant sur elles, ce en prenant appui sur des dispositifs ou en les créant de toutes pièces. Quelles sont ces configurations et quelles sont les dispositifs qui leur donnent corps ? Mettre en lumière ces dispositifs ne permettrait-il pas de questionner la conception des abords de l'habitat ?

Afin de répondre à ces questions, 83 petits jardins grenoblois et parisiens ont été étudiés sur une période de 5 ans à travers une étude ethnographique basée sur l'observation et le recueil de la parole et visant à comprendre la configuration du jardin depuis l'intérieur -du point de vue de l'habitant- comme depuis l'extérieur -du point de vue du voisin et du passant-. Tâche ardue dans le milieu de l'habiter où l'anonymat n'a pas lieu d'être et impose de mettre en place un processus de familiarisation de l'enquêteur à son lieu d'étude et à ses habitants. Les ensembles résidentiels étudiés répondent à différents types d'habitats collectifs (immeubles, habitats intermédiaires et habitats individuels denses), ils sont orientés sur rue ou en cœur d'îlot et appartiennent à des tissus de type haussmannien, faubourg ou grand ensemble. Les jardins y ont été choisis afin de composer un panel diversifié, par leur forme, leur statut et leur exposition au dehors<sup>16</sup>. Les données recueillies permettent de mettre en évidence une typologie de onze configurations de jardins organisée en trois groupes - les jardins demeures, les jardins sociables et les jardins repoussoirs -, et parfois même l'impossibilité de configurer son jardin. Ces configurations reflètent à la fois les dimensions formelles, sensorielles et sociales du petit jardin, les conjuguant toutes trois afin de rendre compte des modes d'habiter dont le jardin est le support.

**16** Ils sont privés, collectifs, empiétés sur un espace public ou collectif, de devant (jardins donnant accès au logement et/ou fortement mis en vue), de derrière, plus ou moins en contact avec un espace limitrophe (public, collectif ou privé), disposés en mitoyenneté, en vis-à-vis, de manières superposés ou en gradins par rapport aux jardins voisins. Un logement peut avoir de 1 à 4 jardins de quelques mètres carrés à 100 m<sup>2</sup> (pour les jardins collectifs ou en cumulant plusieurs jardins) et en moyenne de 20 m<sup>2</sup>.

Figure 3  
Les 11  
configurations  
de jardins  
développées par  
les habitants



3

Certaines configurations *jardins demeures* -constitutives du chez-soi- et *jardins sociables* - qui s'ouvrent de manière plus ou moins mesurée vers l'extérieur, le voisinage ou la ville- reflètent la politesse des maisons dont nous parlions plus haut. Il en est différemment d'autres configurations et de l'impossibilité de configurer qui sont les reflets des maux de l'habiter et donc d'une impolitesse des maisons. Les jardins demeures et repoussoirs peuvent respirer l'individualisme. Certains jardins sociables se replient sur un *entre-soi* repoussoir pour d'autres communautés. Du jardin repoussoir à l'impossibilité de le configurer il n'y a parfois qu'un pas, les incompatibilités de voisinage étant exacerbées en contexte de densité. Il est très souvent difficile de configurer le petit jardin à cause de ses conditions agronomiques défavorables liées à l'artificialisation des milieux urbains et des temps courts de séjour dont il fait l'objet du fait des mobilités résidentielles contemporaines.

Sans distinguer ce qu'il faudrait faire de ce qu'il faudrait éviter, nous n'en aurions pas la prétention, du fait notamment des tactiques de détournement dont les habitants usent (De Certeau et al, 1980), découvrons maintenant quels dispositifs sont les supports de ces politesses et impolitesse de l'habiter...

### Dispositifs jardinés : murs, bascules et contours

Les murs qu'ils soient bas ou hauts, pleins ou poreux, de brique, de bois, de végétal, latéraux, frontaux ou de façade sont des « béquilles » pour les jardiniers qui s'appuient sur eux pour composer le jardin comme pour l'habiter. Pierre Sansot (1980) met en lumière l'importance du mur lorsqu'il nous dit que : « Le mur met un garrot à l'hémorragie spatiale (...) Si j'étais jardinier, je toucherais ce mur comme le nageur met la main sur la corde du bassin (...) Le mur est le véritable territoire du jardinier (...) On a mis en avant je ne sais quelle qualité de la chlorophylle (...) Cette grande paix ne vient-elle pas de la vertu du mur ? »<sup>17</sup>.

Parmi les jardins que nous avons étudiés, trois types de murs jardinés émergent : le mur appui, le mur seuil et le mur impoli.

Le *mur appui* donne au jardin une véritable dimension proxémique au sens de Barthes (1976), espace des objets que l'on peut atteindre avec le bras, sans bouger.

Amparo, jardinière d'origine espagnole, développe un jardin invagination et excroissance afin de s'approprier le coin d'un jardin collectif d'arrière-cours situé à proximité de la fenêtre de son logement. Située au même niveau que le jardin mais ne disposant pas d'accès direct sur celui-ci, poussée par un besoin tactile irrésistible mais ne se sentant pas complètement légitime pour occuper l'espace, elle jardine en équilibre sur le jambage de sa fenêtre, le bas du corps à l'intérieur et le tronc vacillant à l'extérieur.

Clément possède quant à lui 4 jardins bien légitimes d'une vingtaine de mètres carrés délimités du dehors par une large jardinière de béton, il n'hésite pas lors de l'entretien à s'appuyer à plusieurs reprises sur ses jardinières et prend également cette pause lorsque nous lui proposons de réaliser une photographie dans son jardin.

Lotte habite dans le même ensemble résidentiel que Clément mais utilise ses jardinières d'une tout autre manière, elle y appuie son regard afin d'articuler son jardin au parc qui se situe en prolongement. Lisons la : « J'ai besoin de voir loin, de respirer. Mes jardinières sont deux lignes de couleurs qui articulent visuellement mon logement avec le parc.

Grâce à elles, mon regard circule, je m'évade... ». Enfin Françoise possède une terrasse sur deux niveaux à ciel ouvert et orientée plein sud dont elle jardine les deux murs latéraux avec des pots accrochés sur une treille et des plantes grimpantes, ce afin de contrecarrer l'éblouissement et le rayonnement solaire au sein de la terrasse et d'apporter un confort d'été à l'intérieur du logement mais aussi pour mettre en place un jardin coquille, dans ce cas enveloppe corporelle latérale non hermétique au dehors.

Le *mur seuil* joue quant à lui un rôle d'intervalle tactile comme visuel. Il permet de marquer le chez-soi pour le signaler à soi-même et aux voisins avant même que l'on y soit et pour retarder en façade du logement la sortie vers le dehors. Pour annoncer son chez-soi à l'avance, Antoine a disposé plantes en pot et objets divers sur le muret bas percé d'une ouverture qui sépare son jardin de devant d'une venelle collective à 12 logements de type habitat individuel dense, il a également renforcé la face intérieure de ce muret avec une jardinière béton de la même hauteur que le muret. De la même manière, Alain et Sandra ont séparé en 4 à l'aide de murets bas percés d'une ouverture les espaces extérieurs de leur copropriété afin d'associer à chacun des 4 logements un jardin de devant.

Afin de retarder, visuellement comme acoustiquement, la rencontre avec les voisins et pour mieux la « choisir », les 4 copropriétaires ont décidé de disposer au seuil du logement, de manière latérale, sur un mètre vingt de largeur depuis la façade et sur deux mètres de hauteur, des murets opaques de brique. Ceux-ci contiennent partiellement l'intimité de chaque jardin permettant aux habitants de ne pas être vu et entendu et de ne pas avoir à voir et à entendre au sein de ce seuil. Il n'est pas nécessaire que le mur seuil soit opaque afin d'assurer cette distance sécurisante. Nadine possède un jardin de devant de 20 m<sup>2</sup> séparé des jardins voisins et d'une venelle collective par des haies de bambous poreuses de 4 mètres de hauteur. Lorsqu'elle se trouve dans son jardin, si elle perçoit la présence visuelle ou sonore d'un voisin à travers les haies de bambous, elle ne se sentira pas obligée de rentrer en contact avec l'autre, se sentant à distance derrière la haie. Il en est tout autrement pour Véronique qui habite la même copropriété et possède un jardin similaire mais s'y sent mise à vue et écoutée et plongée dans les univers des voisins lorsqu'elle se trouve dans son jardin. Ce mur seuil articule parfois plus qu'il ne met à distance : c'est le cas de Claudine et Joëlle qui partagent, latéralement, un double mur claustra ajouré en bois et prennent appui sur lui pour composer ensemble une partie de leur jardin. Lorsque l'une ou l'autre des deux voisines repère la présence sonore de l'autre, il n'est pas rare qu'elles conversent à travers cette claustra sans même se voir.

Les deux jardinières disent partager cette limite en laissant s'entremêler leurs plantes grimpantes de part et d'autre de la limite et ce jusqu'à un mètre de distance.

Le partage du mur est une préoccupation constante chez les habitants de petits jardins afin d'éviter qu'il ne devienne un mur impoli pour les autres comme pour soi.

Dorothee refuse de se séparer de son voisin en mettant en place une séparation haute, elle dit que même si son jardin en serait plus joli ce serait dire à son voisin qu'elle n'a pas envie de le voir. À la place, elle a conçu avec lui une séparation basse qu'ils ont mis en place et qu'ils entretiennent ensemble. Alain et Sandra, dont nous avons parlé plus haut, parce qu'ils ne se sentaient pas complètement chez eux dans leur jardin, ont renforcé en 2008 les murets bas qui séparaient leur jardin des jardins voisins et de la venelle collective avec un grillage, une occultation de type brande et des plantes arbustives et grimpantes. Ils s'excusent à plusieurs reprises d'avoir imposé cette séparation à leurs voisins lors de notre dernière entrevue de 2009. Le mur impoli est celui qui dit à l'autre « je n'ai pas envie de te voir... ni de t'entendre ou tu n'as pas le droit de me voir, ni de m'entendre », il coupe le rapport de réciprocité visuelle et sonore entre voisins qui permet d'instaurer un respect mutuel. Paradoxalement c'est ainsi lui, ce mur épais et opaque, qui emprisonne l'habitant et le soumet aux nuisances du dehors. Lisons Murielle pour illustrer cette idée : « Il (son mari) n'aime pas tailler la haie, ça l'ennuie alors il la laisse monter et s'épaissir et ça a des effets gênants : on est à côté du passage, et les gens ne nous voient plus du tout, alors ils ne font pas attention, on devient les témoins de conversations intimes (qu'on se passerait bien d'entendre) et les gens parlent super fort, combien de fois j'ai sursauté... Cette haie est une protection essentielle, mais il faut régulièrement la tailler pour qu'elle reste une protection ». Ce mur lorsqu'il ne joue plus son rôle protecteur est doublé par les habitants d'un autre dispositif. Yvette a renforcé son mur qui servait d'appui aux cambrioleurs avec une ligne de plantes piquantes disposées à l'extérieur. Ailleurs, parce que les claustras bois qui délimitent le jardin de Marie-Jo le rendent « invisible » et qu'il est orienté sur un espace collectif, elle a mis en place à côté de sa porte d'entrée un coin de fleurs, elle nous dit à ce propos : « Au départ j'ai mis 2/3 plantes, mais ça n'a pas marché. Après j'ai mis ces bordures en bois et puis un mélange de plantes piquantes et de fleurs. Maintenant ça marche. Moi je pense que dès qu'on fait quelque chose de respectable, on est respecté ! »

Pour lutter contre l'impolitesse des murs, les habitants les renforcent à l'extérieur et/ou travaillent leur porosité, ils abaissent leur hauteur, et les jardinent en mitoyenneté. Parfois même ils jouent avec les dispositifs d'ouverture-fermeture qui percent le mur pour lui donner un caractère aimable.

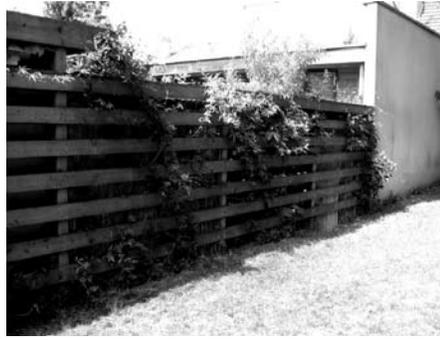
Les dispositifs de type bascule permettent de passer d'un univers à l'autre ou de les tenir à distance. On y distingue les dispositifs d'ouverture-fermeture (aux limites du jardin et entre jardin et logement), les escaliers et les horizons jardinés. *Les dispositifs d'ouverture-fermeture* proposent un langage infra-verbal de voisinage. Joëlle utilise le portillon de son jardin pour exprimer sa disponibilité, si celui-ci est grand ouvert, le voisin est bienvenu dans le jardin, si il est mi-clos il s'agit de s'y aventurer avec prudence et s'il est fermé c'est qu'il faudra repasser plus tard. Lorsque le jardin n'est pas clos, entre jardin et logement, les rideaux et stores jouent ce même rôle. Les escaliers jouent également ce rôle de bascule. Lorsqu'ils sont visibles depuis l'extérieur, les habitants « marquent » leurs marches avec des plantes en pots ou s'y assoient, et jardinent main courante et balustrade. Lorsque l'escalier compose l'intériorité du jardin, il permet de distinguer différents espaces.

Françoise, dont nous avons parlé plus haut, qui possède une terrasse à deux niveaux, utilise la partie basse, qu'elle considère « intime », pour baigner sa fille dans une petite piscine en plastique et se faire bronzer, tandis qu'en partie haute, elle prend l'apéritif et s'ouvre vers l'extérieur, parc arboré et copropriété voisine sur lesquels son promontoire lui offre un large panorama.

Les horizons jardinés - qui prennent place en limite mais aussi au sein du jardin dans des jardinières plus larges que hautes - séquentent le rapport dedans-dehors. Sans bloquer le regard, ces horizons lui permettent de s'accrocher, de « se pauser » pour mieux circuler d'un plan à l'autre d'un dedans vers un dehors. L'organisation interne du petit jardin est la plupart du temps assez simple, comme nous l'avons déjà dit, le peu d'espace limitant le séquençage et la compartimentation.



4



5

Figure 4 et 5  
A gauche Yvette au milieu de son jardin et à droite, celui-ci vu de l'extérieur

Enfin l'attention des habitants porte sur les contours du jardin. Pour s'approprier son habitation, il faudrait pouvoir en faire le tour, c'est notamment en cela que la maison individuelle serait l'idéal rêvé du français car elle permet d'en faire l'expérience (Periane, 2010). Certaines tactiques jardinières vont en effet dans ce sens.

En discutant avec Yvette de ses rêves de jardin, nous apprenons qu'elle souhaiterait relier ces 4 jardins de 20m<sup>2</sup> en supprimant un morceau du mur en grès d'Artois qui les sépare, ce afin de faciliter l'entretien du jardin et notamment la ponte de la pelouse. Observons également qu'elle marque le contour de ses jardins à l'extérieur, sur une portion avec la ligne de plantes piquantes dont nous avons parlé plus haut, mais aussi avec des plantes ornementales qui ont pour unique dessein de ceinturer sa propriété. Ce contour auquel Yvette porte tant de soin est bien plus que gestionnaire ou utilitaire. Alors que Yvette tente de donner une unité au contour de ces jardins, Nadine a quant à elle choisi de personnaliser son contour sur une petite portion avec des rosiers afin de se démarquer de ses voisins dont les jardins sont tous délimités par des haies de bambous. Le contour du jardin est indéniablement travaillé, très souvent dans l'épaisseur sous forme de multicouche verticale et de manière hétérogène. Bien loin de la haie monospécifique, le contour est jardin.

Françoise dès qu'elle s'est installée dans son jardin a renforcé la haie de laurier vert dégarnie en partie basse avec des canisses, puis avec une deuxième haie composée d'essences horticoles variées en texture, hauteur, couleur et saisonnalité. Yvette a démarré son jardin en ramenant les plantes de son précédent logement et en les disposant contre la claustra qui délimite son jardin. De lignes en lignes, d'épaisseur en épaisseur, elle ne peut désormais presque plus se mouvoir dans ce jardin, ici rien n'est prévu, tout est laissé à l'intuition du geste jardinier qui seul compose les dessins du cheminement. Elle a même plus récemment colonisé avec des plantes grimpantes la paroi extérieure de la claustra. Elle nous avoue en chuchotant : « tous les soirs, j'imagine que je repousse les limites du jardin et les plantes m'aident... elles poussent, poussent, poussent... les barrières ».

Même si le contour du jardin est primordial, l'habitant du petit jardin ne se fait que peu d'illusion sur le fait qu'il puisse faire le tour de sa maison. Lorsque le logement est associé à plusieurs jardins, c'est le rôle d'échappement ou celui d'ouverture qui sont mis en jeu. La distribution des rôles du jardin de devant social, offert au voisinage et du jardin de derrière intime, à l'arrière de la maison est beaucoup plus complexe que dans le contexte pavillonnaire. Chaque petit jardin, même si des dominantes peuvent être observées, possède les deux statuts et ceux-ci peuvent changer au fil des saisons, des rythmes de la semaine, ou même de la journée.

## **ALORS, COMMENT CONCEVOIR LA POLITESSE DE L'HABITAT COLLECTIF PAR LE JARDIN ?**

Il semble ainsi évident que la conception de la politesse des maisons par le jardin passe par l'étude fine des dispositifs sur lesquels les habitants s'appuient pour configurer leur jardin comme nous venons d'en proposer un avant-goût. L'architecte jouerait alors un rôle de médiateur, celui de mettre en place les conditions favorables à la mise en scène par l'habitant de la matière végétale.

Mis à part cette attention aux dispositifs jardinables, quelle(s) méthode(s) inventer afin de concevoir l'habitat non plus à partir de la cellule du logement mais de son extériorité ? Sans proposer de réponse définitive à cette question, nous esquissons en guise d'ouvertures trois pistes.

### **Décomposer pour mieux composer, du singulier au pluriel**

Le mur végétal et de manière générale tous les jardins sans épaisseur en culture hydroponique « sème la confusion des éléments » (Collet, 2010), transformant l'édifice en organisme vivant et réduisant le végétal à un objet technique. Au contraire, étudier l'habitat par le prisme du jardin permet de décomposer le premier en une somme de dispositifs permettant de donner forme au second. Les dispositifs et leurs agencements deviennent alors le support de scénarii d'usages et d'ambiances. L'approche n'est pas nouvelle. C'est celle que proposait déjà Le Corbusier en 1922 avec ses premières études sur l'habitat, approche incarnée dans le projet manifeste de *l'Immeuble-villas* qui offre un assemblage de logements avec terrasse-jardin (transposition en étage de la villa). L'architecte y développe, à l'échelle de chaque terrasse-jardin, un ensemble de dispositifs - murs, bascules et contours -, qui participent de la composition du logement et de son articulation au logement voisin. Le Corbusier abandonne par la suite cette première approche de la somme de singularités et de leur articulation pour celle de la grille, structure rassemblant une somme d'individualités identiques où les abords privatifs sont réduits à des loggias et abritant en pied d'immeuble et en toiture des abords collectifs.

### **Entre les dispositifs, concevoir le vide**

Afin d'envisager la conception d'une façade à même d'accueillir les usages, le paysagiste Bernard Lassus propose en 1976 la théorie du « substrat-support-apport » selon laquelle la conception doit se nourrir des potentialités du lieu (le substrat) et produire un support qui va offrir des aménités telles que les usagers vont pouvoir y inscrire sous forme d'apports leurs vécus. La façade du logement serait alors porteuse d'une somme d'injonctions jardinables potentielles. Lassus a matérialisé cette théorie à travers l'ornementation de façades, support imaginaire visiblement peu compris des habitants car ces façades semblent toujours attendre leurs apports. Le Corbusier, à propos de *l'immeuble-villas*, définit les terrasses-jardins comme « des éponges qui permettent au bâtiment de respirer » (cité par Nivet, 2011), respirations autant aérauliques, que visuelles et proxémiques (au sens de Hall comme de Barthes). À travers cette dernière métaphore, serait-ce cela la politesse de l'habitat collectif, un vide en prolongement du logement à transformer et support d'imaginaires, un vide permettant de prendre la mesure du chez-soi tout en tenant une juste distance avec le voisin ? La clef de réussite de la politesse des maisons ne réside-t-elle pas dans la conception du vide ?

### **Proposer un espace permettant de tenir ses distances par le biais des sens**

Enfin, comment dimensionner ce vide et les dispositifs qui le ceinturent ?

Le petit jardin doit permettre à l'habitant de tenir ses distances au sens propre comme figuré. À travers la profondeur de ce petit jardin, sa hauteur, sa largeur, les matières qui le composent et sa distance aux dehors, l'habitant prend quotidiennement la mesure tactile, visuelle et sonore de son univers afin de le configurer pour lui comme pour l'autre. Ce jardin univers ainsi créé permet à l'habitant d'être à la fois chez lui et d'ajuster physiquement et mentalement la distance qui le sépare de ses semblables.

## REFERENCES

- Barthes R. (2002, 1976), Comment vivre-ensemble ; simulations romanesques de quelques espaces quotidiens, Notes de cours et de séminaires au Collège de France, 1976-1977, Sous la direction d'Eric Marty, Paris, Seuil/Imec
- Bonnin P., Clavel M. (dir.) (2010), Natures urbanisées, in Ethnologie française, 40(4)
- Breviglieri M. (2006), Penser l'habiter, estimer l'habitabilité, Tracés, Bulletin technique de la suisse romande, n°23, pp. 8-14
- Cauquelin A. (2000, 1989), L'invention du paysage, Paris, PUF
- Chaljub B. (2009), La politesse des maisons : Renée Gailhoustet, architecte, Arles, Actes Sud
- Clément G. (2003), Manifeste du tiers-paysage, Paris, Editions Sujet/Objet
- Collet S. (2010), Les murs végétaux, ou la confusion des éléments, Revue Anthos 1.10. pp. 34-37
- De Certeau M. et al. (1994, 1980), Chapitre IX Espaces privés / Section Le jardin clos peuplé de rêves L'invention du quotidien ; Tome 2, Habiter, cuisiner, Paris, Gallimard
- François E. et Lewis D. (1999), Construire avec la nature, Marseille, Edisud
- Frileux P. (2008), La haie et le bocage pavillonnaires, Diversités d'un territoire périurbain entre nature et artifice, Paris, Muséum National d'Histoire Naturel, thèse de doctorat d'ethnologie
- Grapp C. (2008), From Yard to Garden ; The Domestication of America's Home Grounds. Chicago, The University of Chicago Press
- Hall E. T. (1971, 1966), La dimension cachée, Paris, Editions du Seuil
- Harrison R. (2007), Jardins : réflexions sur la condition humaine, Paris, Editions le Pommier
- Heidegger M. (1980, 1954), Bâtir Habiter Penser, Essais et conférences, Gallimard, pp. 179-194
- Ingold T. (2000), II: Dwelling/Chapter Ten: Building, dwelling, living: how animals and people make themselves at home in the world, The perception of the environment; Essays in livelihood, dwelling and skill, London, Routledge, pp. 172-189
- Lassus B. (1975), Paysages quotidiens ; de l'ambiance au démesurable, Catalogue de l'exposition Musée des arts décoratifs 8 janvier - 9 mars 1975, Paris, Centre Beaubourg - Centre de Création Industrielle
- Lassus B. (1976), Une poétique du paysage ; apport+support = nouveau paysage, Traverses, 5-6, «jardins contre-nature», pp. 220-224
- Leenhard J. et Labertini A. (2007), Jardins verticaux dans le monde entier, Paris, Citadelles et Mazenod
- Lortie C. (2008), The importance of residential urban gardens for biodiversity maintenance within cities, Ecocity world summit 2008; 7th international ecocity conference San Francisco, California USA, Academic and talent scouting sessions, En ligne sur [www.x-cdtech.com/EcoCity08/pdfs/7413.pdf](http://www.x-cdtech.com/EcoCity08/pdfs/7413.pdf) (consulté le 11 juin 2010)
- Luginbühl Y. (2006), Un monde au balcon, la nature dans le quartier, in Vaquin J.-B., À la découverte de la nature à Paris, Paris, Atelier Parisien d'Urbanisme/Le Passage, pp.249-265
- Mathieu N. (2010), Jardin de ville, jardin de campagne, quel rôle dans l'émergence d'un mode d'habiter durable ?, Conférence introductive aux Journées scientifiques de la Société d'Ecologie Humaine, Colloque international Les Jardins : Espaces de vie, de connaissances et de biodiversité, Brest, 2-4 juin 2010
- Moley C. (2003), Les abords du chez-soi en quête d'espaces intermédiaires, Paris, Editions de la Villette
- Nivet S. (2011), Le Corbusier et l'immeuble-villas, Paris, Mardaga
- Paris M. (2011), Le végétal donneur d'ambiances ; jardiner les abords de l'habitat en ville, Grenoble, Cresson, Université de Grenoble, Thèse de doctorat d'architecture et d'urbanisme
- Paris M. (2012), Chapitre 8 : Montre-moi ton jardin et je te dirai comment tu habites, In Annabelle Morel-Brochet et Nathalie Ortar, La fabrique des modes d'habiter, Paris, L'Harmattan, pp. 161-178
- Perianez, M. (2010), Hideux les HID ? Courte synthèse sur la satisfaction des Français dans le logement social, In Habitat pluriel : densité, urbanité, intimité, Sous la direction de Sabri Bendimérad, Editions du PUCA, pp. 71-83
- Potin H. et Guinée A.-F. (1999), Matière(s) d'architecture, Nantes, Diagonale
- Sansot P. et al. (1978), Si j'étais jardinier..., In L'espace et son double, Sous la direction de Pierre Sansot, Paris, Editions du Champ Urbain, pp. 176-191
- Stefulesco C. (1993), L'urbanisme végétal, Paris, Institut pour le Développement Forestier, Collection Mission du Paysage
- Thibaud J.-P. (2002), L'horizon des ambiances urbaines, Communications, n° 73, Numéro : Manières d'habiter, pp. 185-203

# ORGANICITÉ ARCHITECTURALE DU SILENCE

PEUT-ON COUPER LE SILENCE EN QUATRE ?

**BOUJILA BEN AFIA SYRINE**

Équipe de Recherches sur les Ambiances (ERA) - Tunisie

## ABSTRACT

Silence is a sound matter for composers like John Cage; it could even be built by contemporary artists like Tom Kotik who made it physical in an almost visual version. Famous « architecture of silence » expression and poetic Valery's singing buildings image allow wondering about architecture that could inspire silence and be neither mute nor speechless. Examining the link between silence and aesthetics in Dewey's pragmatic understanding as well as embracing Wunenburger point of view -that considers the sacred as an interface- enable us to study the three-notion connection Silence-Limit-Sacred and to put forward the theory that silence is a phenomenon linked to an intense experience of the 'Sacral' atmosphere in the porous spaces of the In-between: highly luminal sacred spaces, both non religious and religious, prompting numinous feeling. In a phenomenological approach, this work aims to treat silence as architectural organ and to reach its materiality. In order to capture it, Moles behavioural topology of the sacred can be combined with sensory measurement and vocal-characteristic study of silence.

Keywords: Silence, sacral, entre-deux, expérience, sensible

## LE SILENCE N'EXISTE PAS !

Commencer une communication dédiée au silence et à son architecture par une telle affirmation semble scier la branche sur laquelle nous tentons de nous tenir. Une précision s'impose : il s'agit du silence absolu qui ne peut exister. Car même on s'obstinant à bien se boucher les oreilles, le simple fait de poser les mains sur elles produit un son. Le son ne disparaît jamais totalement. Et si c'est le monde sonore externe que l'on cherche à fuir, on finit par se plonger dans un monde sonore interne, tout aussi bruyant. John Cage, le célèbre compositeur new-yorkais, en a fait l'expérience et a même consacré quatre minutes et trente trois secondes<sup>1</sup> au silence qui est inéluctablement fait de bruits non prévus, de sons perdus : respiration, toussotements, grincement de meubles...

<sup>1</sup> 4'33", titre de partition de musique contemporaine pour piano, composée par John Cage, interprétée par David Tudor au Maverick Concert Hall de Woodstock, New York, 29 août 1952.

Cage a traité le silence comme une matière sonore à part entière en déconstruisant son opposition à la musique. Plus récemment, un artiste tchèque Tom Kotik s'est aussi intéressé à la matière silence et à ses architectures<sup>2</sup>. Il s'est attelé, quant à lui, à le construire en en livrant une version visuelle presque palpable<sup>3</sup> : voir des membranes de haut-parleurs d'enceintes audio vibrer sans entendre la moindre note étant donné que la musique est diffusée dans des fréquences infrasonores. Cette sculpture sonore du silence rappelle les limites de nos sens. « Les oreilles n'ont pas de paupières » comme l'avait noté l'écrivain Pascal Quignard<sup>4</sup> mais elles ont des limites et surtout elles sont dotées de filtres qui, sans eux, feraient qu'on serait submergé d'un flux incessant de sons de toutes parts. Ceci dit, l'expérience visuelle du silence de Kotik nous en dit long aussi sur l'utilité d'étudier la question en ne se contentant pas de la seule mesure des décibels, de l'intensité du son qui n'en est qu'une des propriétés.

Lors de notre passage du silence dans l'art au silence dans l'architecture, est venue se glisser l'image poétique de Paul Valéry quand il reconnaît dans la ville de rares bâtiments qui chantent, qui font taire pour les écouter. Les vers valéryens nous ont amenés tout droit à la célèbre expression d'« architecture du silence », associée à d'illustres noms comme Louis Kahn<sup>5</sup> ou Tadao Ando<sup>6</sup>. Ces concepteurs, dont on s'accorde à reconnaître une haute qualité aux ouvrages réalisés, sont en architecture ce que Beethoven est en musique : des maîtres du silence. Ils parviennent, semble-t-il, à mettre en valeur le silence en l'exprimant par un jeu savant où le vide, qui n'est pas que creux, et la lumière, qui n'est pas qu'éclairage, sont des matières à part entière.

À partir de ces données est née notre proposition de porter un intérêt scientifique à la compréhension du silence en architecture en lui consacrant un travail qui nous fait inéluctablement prendre le large vers des horizons aussi mystérieux que *l'espace indicible* de Le Corbusier<sup>7</sup> ou le *langage silencieux* d'Edward T. Hall<sup>8</sup>. Ceci dit, la précaution est de mise pour veiller à ne surtout pas perdre pied en cédant au chant des sirènes qui altèreraient la scientificité du travail.

A vrai dire, ce travail est lui-même parti d'une intuition, d'un déclic qui fut un ressenti personnel : une expérience vécue de silence associé à un sentiment de sacralité dans un lieu non religieux. Il a donc été question au départ de situer le rapport Silence-Sacralité au cœur de l'étude mais ce duo s'est vite vu compléter par une notion supplémentaire, celle de Limite, obtenant ainsi une relation triangulaire Silence-Limite-Sacré comme objet d'exploration. Cette communication vient alors exposer des éléments de la réflexion théorique, menée jusqu'à ce jour, et introduire les pistes opératoires qui se présentent à nous et qui sont soumises à amélioration puisque l'objectif immédiat est de construire une méthode expérimentale solide et applicable.

## SILENCE ET EXPÉRIENCE « AESTHÉTIQUE »

La réflexion menée dans ce travail, qui puise ses ressources dans la pensée actuelle interrogeant le rapport sensible de l'être humain au monde, s'inscrit dans la continuité des travaux menés dans le cadre de la recherche interdisciplinaire sur les ambiances architecturales. La posture de départ a été de se pencher sur une désignation langagière connue, la fameuse expression quasi-ésotérique d'« Architecture du silence » et ce, en opérant une sorte de digression par rapport au sens commun pour s'intéresser au lien qu'elle vient établir entre le silence et une certaine esthétique architecturale.

**2** Tom Kotik, *Architectures de silence*, Exposition à la Fondation Miró, Barcelone, Mars - Avril 2010.

**3** Idem, *Installation sonore Untitled (for Jan)* (2007).

**4** Pascal Quignard, *La baine de la musique*, Calmann-Lévy, 1996.

**5** Louis I. Kahn, *Silence et lumière*, Editions du Linteau, 1996.

**6** Tadao Ando, *Architecte du silence*, film de 26', Réalisation Jean Antoine, Production Cinéma et Communication, 1989.

**7** Le Corbusier, *L'espace Indicible*, Savina, dessins et sculptures, éd. Sers, Paris, 1984.

**8** Edward T. Hall, *Le langage silencieux*, Seuil, Paris 1984.

Le raisonnement se fonde alors sur un premier questionnement qui correspond à l'une des préoccupations centrales présentées lors de la conférence inaugurale du colloque *Faire une ambiance* à Grenoble, à savoir « Qu'est-ce l'esthétique ? ». Tandis que son expression usitée à tendance hédonique l'associe au surplus, à l'accessoire voire au luxe, d'autres formulations, comme celle pragmatique deweyenne, lui donnent une valeur moins superficielle et viennent l'intégrer, l'ancrer au quotidien (Augoyard, 2011). L'expérience esthétique est alors considérée comme diffuse et ininterrompue, indissociable de l'ensemble des activités dites « ordinaires » puisqu'elle préserve, tout en amplifiant ou intensifiant, les traits génériques de toute expérience « normale » (Dewey, 1969). Dewey rejette ainsi la scission catégorique des facultés diverses de l'homme en émotionnel et rationnel, car elles forment un « tout ».

Il s'agit là donc d'emprunter le chemin préconisé par Augoyard (2011), celui du retour à la racine grecque de l'esthétique, l'*Aisthêsis*, c'est-à-dire au sentir comme réceptivité globale qui engage une perception par les sens, par tous les sens, et une saisie de l'esprit. En puisant à la source antique du vocable, le sens fondamental perdu ressurgit et rend possible de retrouver une compréhension de l'esthétique comme ce qui est perçu par l'ensemble de nos facultés, à la fois sensibles et mentales qui se complètent plus qu'elles ne s'opposent dans « une sorte de culmination perceptive mobilisant toutes les ressources de notre être » (Van Lier, 1972).

De ce point de vue, l'expérience esthétique, continue et plurisensorielle, atteint un degré d'intensité dans des espaces qui sont chargés de « quelque chose » de particulier puisque participant à porter à « l'avant-plan » de notre conscience des « traits » présents dans toute expérience de base (Dewey, 1969). Cette intensité est marquée ou accompagnée d'un silence qui n'est pas vécu comme oppressant, lourd ou macabre. Il s'associe davantage à ce qui est de l'ordre du profond, du poétique, allant au-delà du seul registre religieux, dans une expérience du sacré qui peut être non religieux, comme l'avaient étudié Séguy ou Tillich, dans l'expérience d'une « version laïque » du sacré (Rivière, 1990).

Ce silence est de l'ordre du « *numineux* » pour reprendre le terme de Rudolf Otto<sup>9</sup> quand il désigne le sentiment ambivalent fait de la détonante rencontre de l'émerveillement, lié à de la révérence, avec la crainte faite de doute et d'hésitation. Le silence numineux est ce qui dépasse les frontières dressées entre le religieux et le mondain, entre l'exceptionnel et l'usuel. Il échappe alors à la dualité sacré-profane pour s'inscrire dans une vision où la sacralité, modalité d'être dans le monde, est diffuse mais est à intensité variable ou « à degrés divers » (Vernant, 1979) rejoignant ainsi la définition pragmatique deweyenne de l'expérience esthétique qui est « résonance » et « relation » avec l'univers ambiant, ancrée à l'ordinaire et sujette à amplification (Dewey, 1969).

Cette perspective donne alors une autre lecture des limites habituelles érigées comme des barrières générant des polarités : l'extraordinaire n'est plus le contraire de l'ordinaire, le sacré n'est plus le contraire du profane et le silence n'est plus le contraire du son. Dans une logique plus fluide, une dimension donnée n'est plus conçue comme la négative d'une autre et les limites incarnent des zones de mise en relation de domaines différents, des interfaces ou les précédemment appelés « contraires » se rejoignent et ne s'excluent pas.

## SILENCE ET ESPACES DE L'ENTRE-DEUX

L'ensemble de ces éléments ont permis d'émettre l'hypothèse qu'il est possible de rassembler les espaces du silence dit « spirituel » sous une même catégorie, celle des espaces de l'Entre-deux : des espaces chargés d'une sacralité, areligieuse ou religieuse, qui sont de nature hautement liminale et qui relèvent du *numineux*. Le silence fait partie de cet Entre-deux, il y contribue en tant que phénomène découlant de la liminalité même des espaces de l'Entre-deux, qui peuvent être des musées, des bibliothèques ou des lieux de culte... Relever un phénomène commun entre des lieux aussi divers conduit même

<sup>9</sup> Rudolf Otto, *Le sacré*, Payot, Paris, 1949.

à envisager l'existence d'une géométrie commune du silence *numineux*, une géométrie qui serait plus qu'euclidienne car faite « formes invisiblement visibles » pour reprendre la formule de Moles.

Concevoir le silence *numineux* comme phénomène architectural et expérience vécue, requiert sa reconnaissance comme ce qui s'adresse à toutes les facultés de l'homme et comme matière sonore spécifique qui n'est ni antibruit ni vide sonore. Cela soulève au passage la question de son identification parmi d'autres valeurs possibles du silence. Comment distinguer le silence *numineux* d'un silence sourd de chambre insonorisée, d'un silence oppressant de prison ou d'un silence funèbre de cimetière ? Il est possible, de prime abord, de placer le ressenti au cœur de la réponse et d'envisager une possible distinction physique grâce à l'exploration de paramètres autres que l'intensité du son, en s'intéressant par exemple aux effets sonores.

Dans l'univers des arts sonores, le silence des espaces sacrés intéresse particulièrement des artistes multimédia comme Pietro Riparbelli<sup>10</sup> dont le projet K11 consiste à capturer les dimensions « magiques » des lieux à travers les sons qui proviennent de l'atmosphère et de l'invisible<sup>11</sup>. Il y vise le dépassement de la dichotomie visible-invisible et se consacre à traiter le silence des espaces sacrés comme un son saisissable, enregistrable.

Quant à nous architectes, il s'agit d'un essai de compréhension du silence *numineux* dans son rapport aux espaces où il se révèle ou qui le révèlent pour mener une étude du silence comme phénomène ayant une certaine matérialité. Il est question, pour nous, « d'atmosphère silencieuse » s'apparentant à ce qu'Isambert décrit dans *Le sens du sacré*, et que tout un chacun serait en mesure de comprendre intimement, quand il évoque son ressenti dans la cathédrale de Chartres : « ...je peux, sans partager la foi des bâtisseurs et des pèlerins, parler d'une « atmosphère sacrée », créée par l'expression de cette foi : le mouvement des voûtes, le clair-obscur des vitraux, les agenouillements et les cierges devant la Vierge noire... ». Cette atmosphère est une fusion entre le lieu ou l'édifice - lui-même, l'activité des adhérents et le partage de leur expérience. Son étude démarre, dans notre approche, par l'exploration de la relation triangulaire déjà annoncée, celle de Silence-Sacré-Limite.

De prime abord, ce trio semble évoquer trois composantes relevant de trois champs clairement distincts : le sonore, le métaphysique et le spatial. Mais, il faut admettre que les notions sont encore plus complexes : composites et multiples, chacune est formée par la juxtaposition de réalités de registres différents. Cela signifie qu'il n'existe pas un mais plusieurs « silence(s) », pas un mais plusieurs « sacré(s) », pas une mais plusieurs « limite(s) ». Des écrits d'une grande clarté sur les trois notions ont rendu la tâche beaucoup moins ardue et ont permis d'éviter le télescopage. La notion de limite est venue se greffer aisément au duo Silence-Sacré quand Eliade (1979) considère l'expérience du sacré comme une « situation-limite ». La question du trio s'est alors posée pour, ensuite, s'imposer avec l'adoption de la proposition de Wunenburger d'un schéma, non plus binaire mais ternaire du sacré ; une tripartition qui le situe, non plus à l'opposé du profane, mais comme « interface entre le plan métaphysique d'un monde surnaturel et invisible et un monde matériel et familier ». Avec sa position médium, le sacré met en relation deux mondes en « permettant de rendre visible l'invisible et de reconduire le visible vers l'invisible... ». Il permet de circuler entre les plans de réalité visible et invisible, il assure les descentes du transcendant (catabase) et les remontées (anabase) sans être jamais ni le très haut ni le tout bas. » (Wunenburger, 2010)

La validité de l'étude de ce trio s'est aussi confirmée par l'observation de situations de « plasticité » du sacré (Wunenburger, 2010) et d'extensibilité du silence au-delà des limites établies ; l'exemple le plus intrigant étant l'état vers lequel glisse l'espace de la rue quand la grande prière du vendredi déborde des murs d'une mosquée. La confrontation entre les notions de Sacré et de Limite a permis d'instaurer une dialectique qui les a rapprochées, ce qui n'est pas étonnant vu leur forte liaison depuis le début de l'histoire de l'humanité.

<sup>10</sup> <http://www.pt-r.com>

<sup>11</sup> « In this project I use only sounds coming from the atmosphere and from invisible places... » Pietro Riparbelli

Leur simple interrogation étymologique contribue à les faire converger vers une idée commune, le seuil, et à nous rapprocher de la pensée des seuils, de la Soglitude (Barazon, 2010). En découle alors la proposition qui consiste à étudier l'espace du sacré, et son silence, par le biais de ses attributs de seuil, espace hybride et ambivalent, pris entre deux domaines différents.

Cela requiert au passage d'abandonner son ancienne définition comme ce qui s'oppose à l'espace profane pour le considérer comme une membrane qui se glisse tel un interstice entre ce que l'on désigne habituellement comme "profane" et le *Tout autre* ou le *Ganz andere* (Otto, 1949). De la notion de limite résulte l'emprunt du terme de « liminalité », un concept à l'origine anthropologique, chez Turner (1969) par exemple, mais qui a été aussi utilisé par Carol Duncan dans une analyse rituelle des espaces muséaux<sup>12</sup>.

Il vient désigner, dans le cadre de notre étude du silence, ce qui fait du lieu de sacralité un lieu de « retrait » par rapport à un ordinaire prosaïque, un lieu de « suspension » d'un déroulement habituel de la vie (Caillois, 1976) dont la parole. Ceci dit, de notre point de vue, ce retrait et cette suspension relèvent davantage du vécu d'une situation ambiguë et d'une ouverture sur "autre" chose que d'une rupture nette avec la chose quotidienne ; le silence n'est pas considéré comme l'abandon de la parole comme composante habituelle de la vie ordinaire mais il se lie à la nature même de l'espace de l'Entre-deux. Il est l'équivalent d'un degré intense, amplifié d'une forme d'expression où l'on a moins, beaucoup moins recours au verbal. Ainsi, la liminalité correspond à ce qui fait d'un lieu de sacralité un « mi-lieu »<sup>13</sup> :

on y est à la fois au bout de quelque chose, soit du Connu, et au bord d'*autre* chose, de l'Inconnu. Concevoir l'espace du sacré comme limite et l'étudier sous cet angle reconnaît une de ses caractéristiques clés, son ambivalence comme lieu à mi-chemin entre des dimensions que l'on a pour habitude de considérer comme non miscibles, étanches l'une à l'autre telles que l'Ordinaire et l'Extra-ordinaire, le Matériel et l'Immatériel, l'Ici et l'Ailleurs.

## SILENCE ET POROSITÉ DES ESPACES DE L'ENTRE-DEUX

La relation triangulaire Silence-Sacré-Limite livre plusieurs éléments qui soutiennent clairement la migration vers un paradigme nouveau dans la compréhension des espaces du numineux et de leur silence : puisqu'il est question de limite entendue comme ouverture et non plus comme rupture et que l'expérience du monde est ininterrompue et à intensité variable, la pensée duelle Sacré-Profane est supplantée par la logique du *continuum* que l'on retrouve dans l'anthropologie modale de Laplantine (2005) et qui reconnaît le composite. L'idée du *continuum* donne de la porosité aux limites, prend en charge toute la dynamique qu'elles accueillent, une dynamique d'échanges et de passages qui ne pouvaient qu'être ignorés par l'étanchéité des dichotomies classiques, nature-culture, objectif-sujetif, émotion-raison, fondées sur des scissions, des séparations et des oppositions ne laissant aucune place à l'existence possible d'un intermédiaire siège de mouvances (Younès, 2007). Et c'est dans cette dynamique que se révèle le lien avec le silence : l'espace sacré est une limite dont l'une des propriétés est la porosité.

L'espace-même est poreux parce qu'entre-deux et sa porosité est en relation avec le silence qui s'y installe. Walter Benjamin a déjà évoqué l'idée de la porosité en architecture, dans un contexte certes différent, mais qui mérite d'être cité : « ... poreuse comme cette pierre est l'architecture. Structure et vie interagissent continuellement dans les cours, dans les arcades, dans les escaliers... »<sup>14</sup>

Le lien qui vient s'établir est celui d'un silence qui émane de la porosité de l'espace. Cette porosité est davantage constructrice du son silencieux qu'absorbante de bruit indésirable.

<sup>12</sup> Carol Duncan, *Civilizing Rituals: Inside Public Art Museums*, Routledge, 1995.

<sup>13</sup> Gianpiero Moretti, *la limite comme mi-lieu : une exploration architecturale et urbaine des territoires intermédiaires*, Université Laval, 2007

<sup>14</sup> Dans un article sur la ville de Naples paru dans le *Frackfurter Zeitung* du 19 août 1925.

Cette dernière, d'ordre technique, concerne les matériaux réducteurs de son, tandis que la perméabilité de l'Entre-deux ne se réduit pas aux propriétés concrètes du lieu. Elle est de l'ordre de l'ambiantal dans la mesure où elle est à la croisée des facteurs physiques, du vécu sensible des usagers et des dispositifs architecturaux. Le silence numineux se construit donc par une porosité qui l'engendre mais ne le "fabrique" pas puisqu'il ne s'agit pas de mettre en forme tel un objet concret aux propriétés déterminées. Cette perméabilité ambiante rend possible l'apparition du phénomène silence en assoyant les conditions propices à son déploiement. Le silence contribue donc à « faire » l'ambiance de l'Entre-deux et compte parmi les « extases » de l'espace (Böhme, 2011), c'est à dire le moyen pour l'espace de sortir de lui-même, d'irradier. Étudier le silence comme composante de l'ambiance de l'Entre-deux revient à explorer les composantes ambiantales, humaines, spatiales et sensorielles qui rendent possible l'accès à une compréhension sensible de la porosité des espaces de l'Entre-deux.

## SILENCE ET PLURISENSORIALITÉ

La porosité du lieu est génératrice du silence et par l'emploi de l'expression de "générateur d'ambiance", il devient tentant de recourir à celle de "catalyseur", et en contrepartie "d'inhibiteur", exprimant davantage un penchant pour l'idée d'une formule chimique du silence, d'un processus fait de déclenchement d'action et de réaction. Mais sans aller jusque là, un aspect en particulier nous semble primordial à traiter dans cette étude, car souvent relégué à l'arrière-plan : explorer l'aspect plurisensoriel de l'expérience du silence qui parle au corps et à la sensibilité. On a beau moins parler et avoir moins recours à la parole, force est de constater que le corps est toujours là ! La corporité est entièrement engagée dans l'expérience du silence *numineux* : l'absence de verbalisation ne peut-elle donc pas signifier que le champ est plus libre, laissant plus de place à d'autres réactions d'ordre physique ?

Le silence *numineux* est souvent considéré comme l'apanage de l'intériorité. Prendre en compte l'aspect corporel de l'expérience du silence s'inscrit donc dans ce rappel de la logique du *continuum*, qui dépasse toute scission dont celle de l'intériorité-physicalité opérée souvent dans la compréhension du sujet humain et de son rapport à l'environnement. Car il semble que, dès qu'il s'agit d'expérience du sacré, la question physique est souvent passée aux oubliettes, le corps est alors réduit au rôle d'enveloppe, de carcasse ou de coque dont l'esprit, considéré comme supérieur à la chair, s'empresse de se détacher, de se libérer en rompant tout lien pour pouvoir "s'élever".

Le recours classique à l'opposition tranchée corps-esprit semble concerner davantage l'expression « apollinienne » que celle « dionysiaque » du sacré pour reprendre les catégories de Wunenburger (2009). Dans cette dernière qui engage des scènes de déchaînement, d'effervescence voire de transe, l'implication physique est difficilement contestable tandis que dans la retenue du sacré « apollinien », l'expérience semble plus intime, profonde, plus mentale et moins émotive car ses effets sont moins décelables "à l'œil nu" de l'observateur.

L'expérience de l'Entre-deux dans les espaces du sacré admet nécessairement un volet psychologique et un volet physiologique par la mobilisation des sensations. Pour exprimer ce souci du dépassement - théorique et ensuite expérimental - des scissions, la notion de "Sacral" est proposée comme terme à caractère ambiantal pour désigner le sacré intégral, qui rompt l'association exclusive au religieux et à l'intériorité, comme expérience « esthétique » (Augoyard, 2010) intense dont la nature liminale projette l'individu dans un entre-deux, un « mi-lieu » (Moretti, 2007) fait de visible et d'invisible, de matériel et d'immatériel. Les espaces du 'Sacral' ont une porosité ambiante génératrice du phénomène Silence dont l'expression du rapport au corps est, bien que discrète, bel et bien existante.

## LE SILENCE COMME ORGANE DE L'ENTRE-DEUX

L'emprunt du mot "Organe" en architecture renvoie à des références aussi incontournables que l'organicisme développé par Hugo Häring ou *L'espace comme membrane* de Ebeling<sup>15</sup>, théoricien du Bauhaus qui met à contribution des concepts comme « squelette » ou « peau » dans une conception de l'architecture comme membrane favorisant et exacerbant l'interrelation homme-nature. Sur un plan lexical, considérer le silence comme organe de l'ambiance de l'Entre-deux réaffirme l'intégration des préoccupations d'ordre physique et sensoriel dans cette étude. Il vient aussi étayer une compréhension de l'espace du "Sacral" comme limite vivante et poreuse. Le sens premier du mot « organe » permet de dire que le silence est un élément à fonction précise dans un corps ou une machine puisqu'il contribue à « faire » l'ambiance du "Sacral". Mais il est possible d'aller plus loin en adoptant le sens figuré du mot selon lequel l'organe est ce qui sert d'instrument, d'intermédiaire, ce qui désigne par ailleurs la voix d'un individu. Au-delà de la métaphore anthropomorphiste, le silence peut s'entendre comme moyen par lequel l'architecture s'exprime et agit, ce qui amène à le considérer comme bien plus qu'un organe de l'Entre-deux; le silence devient l'organe même de l'architecture. Le silence devient la forme expressive de l'architecture du "Sacral".

Etudier le silence de l'architecture du "Sacral" et les conditions de son apparition implique sa saisie. Le capturer permet d'accéder à sa matérialité en laissant entrevoir des applications comparables à celles qu'inspirent les études de la sensibilité spectrale de l'homme à la lumière bleue ou jaune et à sa modulation pour l'amélioration de l'environnement des malades dans les hôpitaux ou des enfants dans les écoles...

Traiter le silence comme facteur physique permet de compléter l'exploration de ses dimensions humaine - à la fois individuelle et collective - et spatiale. Dans ce domaine, les recherches de deux laboratoires semblent déterminantes : le LMA de Marseille<sup>16</sup>, avec la psychoacoustique et l'approche qualitative du son, et le LAM<sup>17</sup> de Paris et son approche sémantique du son qui remonte à **la source du bruit et au sens qu'on lui associe**.

Ces recherches s'intéressent à des aspects physiques du son mais non liés à la seule mesure des décibels et elles confirment l'importance capitale de l'accès aux ressentis pour dépasser la catégorisation d'un son par la seule mesure de son intensité. Appliquer ces approches au silence comme matière sonore donne des possibilités de transpositions qui peuvent s'avérer utiles dans la distinction entre les différentes valeurs d'un silence qui n'est pas le même pour tout le monde et qui peut aisément devenir source d'angoisse. N'est-il pas vrai que, de nos jours, beaucoup craignent le silence ?

Actuellement, nous disposons d'une piste expérimentale, encore sujette à amélioration, qui consiste à développer la topologie comportementale du sacré de Moles (1982) et à la compléter par un volet sensoriel qui peut être pris en charge par une mesure de paramètres biométriques, tels que le rythme cardiaque, la respiration ou la tension artérielle, comme le permet la mesure de la réaction électrodermale (Grapperon, 2012). Dans un article de Moles (1982) intitulé *L'espace sacré : une valorisation de l'environnement*, la topologie comportementale - dont certains aspects ont été jugé « humoristiques »<sup>18</sup> - est présentée comme méthode de mesure du sacré par l'observation du comportement. Elle consiste à identifier des comportements considérés comme traceurs de sentiments associés au sacré pour, par la suite, en faire la projection dans l'espace. Moles a alors posé deux échelles de mesure du sacré dont l'une d'elles considère que « garder le silence » est équivalent au plus haut degré associé au respect, un sentiment

<sup>15</sup> Siegfried Ebeling, *Der Raum Als Membrane*, publié à Dassau en 1926.

<sup>16</sup> Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, <http://www2.cnrs.fr/presse/journal/3232.htm>

<sup>17</sup> Laboratoire d'acoustique musicale à Paris

<sup>18</sup> Victor Schwach, communication au Congrès international de Sociologie, centenaire de l'Institut de Paris, Sorbonne, juin 1993 ; Table ronde « Autour d'Abraham Moles : Sociologie de l'espace ». Publication in Bulletin de Micropsychologie n 24, 1993.

associé au sacré. Ces mesures permettent de tracer alors des lignes « isosacrées », d'obtenir des cartes de champs de forces où il devient possible de lire, de localiser des « sources de radiation du sacré » (Moles, 1982).

Il est envisageable, dans notre cas, de remplacer le recours à la représentation de champs par celui d'un graphe si on s'appuie plus sur l'idée de « degrés divers » du sacré (Vernant, 1979). On obtiendrait alors un « sacragraphe » ou un « silenciomètre » comme outil relevant les variations de l'intensité du « Sacral ». Cette topologie comportementale doit être complétée par une étude sensorielle chez les mêmes personnes sujettes à l'observation du comportement. La mesure électrodermale offre la possibilité d'accompagner l'observation par une captation éventuelle des stimulations physiologiques pour identifier, si possible aussi au niveau sensoriel, une situation de silence du « Sacral ». Cette phase permettra alors de dresser un parallèle entre le comportement et le sensoriel et de le projeter dans l'espace afin d'étudier les dispositifs architecturaux engagés.

L'identification du silence du « Sacral » permet d'aspirer à le reconnaître et le connaître comme facteur physique. Pour ce dernier aspect, la méthode envisagée actuellement vient s'appuyer sur l'idée consistant à étudier l'organe « Silence » - forme expressive de l'architecture du « Sacral » - en empruntant la piste des propriétés vocales : hauteur, durée et timbre. Sans tomber dans l'anthropomorphisme ou la métaphore, l'objectif demeure celui de trouver des pistes qui ouvrent la voie au dépassement de la seule question de l'intensité, mesurée par des décibels, qui distingue un son fort d'un son faible. La « piste vocale » permet d'interroger la pression de l'air, qui fait la durée du son, et aussi les vibrations qui font la hauteur du son silence. La question du timbre, quant à elle, est une notion complexe car elle correspond à une identité du son où il est question de « couleur » et même d'« épaisseur »<sup>19</sup>. Le timbre est complexe mais fort intéressant à explorer puisqu'il est fonction des harmoniques contenues dans le son et qu'il est dépendant des cavités de résonance dans lesquelles circule le son. Qu'en est-il alors des cavités de résonance architecturales dans lesquelles résonne le son du silence ?

Pour conclure, nous retrouvons le chant des bâtiments des vers valéryens en nous apprêtant à ouvrir les portes d'un monde de musique fait de spectres sonores et de sonagrammes, ces mêmes portes que propose d'ouvrir Jacob Boehme<sup>20</sup> quand il adopte le modèle d'un instrument de musique dans sa conception des objets. Comme l'explique Gernot Böhme, « le corps est quelque chose comme la caisse de résonance de l'instrument de musique, tandis que ses particularités extérieures nommées « signatures » par Jacob Boehme, sont les ambiances qui articulent ses formes expressives. Et au bout du compte, ce qui les caractérise, c'est leur tonalité, leur « parfum », ce qui émane d'eux - c'est-dire la façon dont leur essence s'exprime. La tonalité et l'émanation - c'est ce que j'appelle *extases* détermine l'atmosphère irradiée par les choses »<sup>21</sup>. Pour Böhme, le philosophe, il est question d'irradiation tandis que pour Moles, ingénieur et psychologue social, il est question de localisation d'une « source de radiation du sacré ». L'idée d'une force invisible agissante, d'un champ de force rejoint l'idée de cette « manière dont la présence des objets est ressentie dans l'espace » (Böhme, 2011). Radiation et Irradiation : ces deux termes de physique appliqués à la lumière, désignent ce qui rayonne, s'étend, se propage à partir d'un point central. « L'étude vocale » de l'organicité architecturale du silence considère ce dernier comme une des « choses » irradiées de l'architecture ; ce qui laisse penser que le silence du « Sacral » admet un point de propagation, de résonance au sein de son architecture.

<sup>19</sup> <http://mediatheque.ircam.fr/sites/voix/decire/timbre.html>

<sup>20</sup> Jacob Boehme, *la signature des choses*, Chacornac, 1808.

<sup>21</sup> Gernot Böhme, *Un paradigme pour une esthétique des ambiances : l'art de la scénographie*, in Faire une ambiance, actes du colloque international, Grenoble, 2011, p226

Nous achevons alors cette communication, sur le silence que l'on voit et sur le silence que l'on écoute, en reprenant une formule que Böhme utilise dans la conclusion de sa conférence lors du Colloque de Grenoble, en disant que le silence est à l'architecture du 'Sacral' ce que la lumière est au feu, sa *parousia*. Nous tentons d'accorder toute notre attention de scientifique pour écouter cette architecture que l'on considère, un peu à la hâte, comme *aphone* car même si elle semble silencieuse, l'architecture parle.

## REFERENCES

- Augoyard J-F. (2011), Faire une ambiance, Grenoble, À la croisée
- Barazon T. (2010), La «Soglitude» aperçu d'une méthode de la pensée des seuils, Conserveries mémorielles (7), url : <http://cm.revues.org/430>
- Cage J. (1961), Silence, Connecticut, Wesleyan University Press
- Dewey J. (1969), L'art comme expérience, Paris, Gallimard
- Eliade M. (1979), Images et symboles : essais sur le symbolisme magico-religieux, Paris, Gallimard
- Grapperon J. (2012), La mesure de la réaction électrodermale, L'encéphale, 38(2), pp. 149-155
- Isambert F.A. (1982), Le sens du sacré, Paris, Editions de Minuit
- Laplantine F. (2005), Le social et le sensible, introduction à une anthropologie modale, Paris, Téraèdre
- Le Corbusier (1984), L'espace Indicible, Paris, Sers
- Moles A., Rohmer E. (1982), Labyrinthes du vécu : l'espace, matière d'actions, Paris, Librairie des Méridiens
- Otto R. (1949), Le sacré, Paris, Payot
- Rivière C., Piette A. (1990), Nouvelles idoles Nouveaux cultes Dérives de la sacralité, Paris, l'Harmattan
- Thibault E. (2010), La géométrie des émotions Les esthétiques scientifiques de l'architecture en France, 1860-1950, Wavre, Madraga
- Turner V.W. (1969), Le phénomène rituel : Structure et contre structure, Paris, Presses Universitaires de France
- Valéry P. (1923), Eupalinos ou l'architecte, Paris, Gallimard
- Van Lier H. (1968-1972), Architecture - l'Espace Architectural, Contributions à Encyclopaedia Universalis.
- Vernant J-P. (1979), La cuisine du sacrifice en pays grec, Paris, Gallimard
- Vernant J-P. (2006), Religions, Histoires, raisons, 10/18
- Wunenburger J-J. (2010), Le sacré, Paris, Presses Universitaires de France
- Younès C. (2007), Limites, passages et transformations en jeu dans une architecture des milieux, Le philotope (6), pp. 65-69



# MATIÈRE, MATÉRIALITÉ ET COMPORTEMENTS PSYCHOMOTEURS

LE CAS D'ENFANTS PRÉSENTANT  
DES TROUBLES PSYCHIQUES GRAVES

LÉOTHAUD ISABELLE

Centre de recherche sur l'espace sonore et l'environnement urbain,  
CNRS UMR 1536 - France

## ABSTRACT.

It is a work of thesis, that joins in the problem of the ambiances, which allowed us to attach us to the sensori-motor relation that children showing psychic disorders (psychotics or with autisms) maintain with their environment whatever it is (spatial, physical, social, temporal) and the perception which they have of a space by the use and the combination of their various sensitive modalities.

So, with regard to the theme of the sensitive material, we shall develop at first the situations in which the children use the material in a research of sensations, of hyperstimulation which mainly give rise to drivings of isolation. Then, secondly, we shall detail some situations where the contact with the material seems to represent a psychological support very important for this population of children. We shall illustrate our comments by the presentation of sensitive configurations and narratives of observations detailing the physical attitudes of the children to underline, in a socio-temporal dynamics, their relationships in the space, to the materiality, to the material.

Keywords : matière, environnement sensible, modalité sensible du toucher, contact, approche du normal par le pathologique.

La diversité et la complexité des milieux, juxtaposés ou imbriqués, posent de manière centrale la question du mode d'approche de l'ordinaire. De nombreuses dimensions physiques, architecturales, environnementales et sociales participent à celui-ci. Comment mettre en évidence et comprendre les phénomènes quotidiens, les plus ordinaires, qui s'organisent dans différents contextes environnementaux ?

Comment théoriser, thématiser, analyser les choses qui vont de soi ?

Divers travaux se servent du pathologique pour accéder au normal. Georges Canguilhem (1966) s'appuie sur des exemples pris dans la médecine somatique pour démontrer que c'est à partir de la pathologie que nous connaissons le normal. Dans le domaine de la psychologie et de la psychiatrie, de nombreux cliniciens ou philosophes, considèrent que le pathologique est un révélateur du normal.

Parmi eux, Henry Maldiney (1991) souligne le fait qu'une pathologie comme la psychose peut permettre de révéler des éléments qu'un sujet « mentalement sain » ou névrosé voile, cache par sa capacité de représentation ou d'ajustement en référence aux normes socio-culturelles. L'approche du pathologique est alors révélatrice de l'humain comme le souligne à son tour Fernand Deligny (1980) qui défend le fait que les autistes nous donnent à voir le « à même les choses » à partir du moment où ils n'ont aucune référence à laquelle se plier, mise à part celle d'*être*, simplement. En effet, notre culture, notre éducation nous inculquent des normes socioculturelles. Ces normes définissent les conduites appropriées pour un individu et par rapport à des situations données. Nous pouvons citer Erwin Goffman (1973, 1974, 1987) qui a étudié les conduites sociales dans l'espace public. Ces normes se portent à la fois sur les attitudes corporelles, les manières d'agir, mais aussi sur les sens que l'individu convoque. En effet, la société occidentale se caractérise par la primauté de la vue tandis que le toucher, l'odorat ou le goût par exemple sont chargés d'interdits.

Ainsi, comme le défend entre autres Roger Mucchielli (1986) et Henri Maldiney (1991, 2001), le sujet normal et le sujet pathologique possèdent tous deux une structure humaine identique. Nous pourrions citer une multitude d'exemples, que ce soit dans nos espaces publics ou dans notre environnement personnel qui tendraient à rapprocher, à assimiler et à apparenter par exemple la mise en éveil des sens d'une personne présentant des troubles psychiques à celle de l'individu dont le Moi est structuré. En effet, ne nous sommes nous jamais enfermés dans un soliloque silencieux, ou une chansonnette pour faire abstraction de notre environnement ? Ne nous sommes nous jamais accroché à un ami à l'approche d'un chien féroce ? N'avons nous jamais respiré profondément un « grigri » quelconque ? Ne nous est-il jamais arrivé de grignoter pour oublier, quelques instants, le stress d'un travail ? etc. Ce n'est pas le sens des mécanismes mis en œuvre qui diffère mais les retenues, l'échelle plus modérée des attitudes, des façons d'agir, les règles de civilité qui auraient tendance à rendre moins lisibles, voir parfois à masquer la relation que le sujet entretient avec son environnement.

C'est dans ce sens que notre parti d'analyse des ambiances a été d'utiliser des brèches comme un révélateur des interrelations que le sujet entretient avec son environnement. Ce qui est évident peut être pensé à partir du dérapage, de la discordance, du dysfonctionnement. C'est un travail de thèse, qui s'inscrit dans la problématique des ambiances, qui nous a permis de nous attacher au vécu des ambiances d'enfants présentant des troubles psychiques graves (psychotiques et autistiques) au sein de leurs structures d'accueil hospitalières. Nous pensons que le jeune âge de ces enfants soulignent davantage leur affranchissement vis-à-vis des retenues socioculturelles qui gèrent les comportements de tout individu dont le Moi est structuré. Aussi, nous nous sommes attachés à la relation sensori-motrice que ces enfants entretiennent avec leur environnement quel qu'il soit (spatial, physique, social, temporel) et la perception qu'ils ont d'un espace par la convocation et la combinaison de leurs différentes modalités sensibles. Ainsi ces situations « problématiques » devraient nous aider à mieux cerner l'essentiel de ce qui est mis en jeu dans le vécu des ambiances et notamment dans le vécu de la matière et la matérialité.

Sur trois hôpitaux de jour du territoire français, la méthode comprend de longues campagnes d'observations ethnographiques des enfants dans leur milieu d'accueil (entre observation participante et observation passive - observation des conduites spatiales, des attitudes, des gestes, des mimiques etc., du sujet en train de percevoir, avec la prise en compte d'une grande diversité d'éléments du contexte et de l'ambiance tels que la dimension sociale, spatiale, physique, sensible, ainsi que les combinaisons de dimensions), des relevés architecturaux, des mesures d'ambiances (principalement sonores et lumineuses), des vidéos ainsi que diverses discussions avec les professionnels touchant à notre sujet.

Nous exposerons ici seulement quelques éléments susceptibles d'alimenter la thématique de la « matière sensible », mais nous ne développerons pas l'ensemble de ces pistes que vous trouverez sur le site <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00399049/fr/>.

## **LA MATIÈRE POUR LA RECHERCHE DE SENSATION**

Le tactile est très souvent sollicité par ces enfants, que ce soit par l'intermédiaire des mains, des pieds ou de toutes autres parties du corps. Ce facteur, chez l'enfant présentant des troubles psychiques, n'est chargé d'aucun interdit : il n'y aura aucune gêne à toucher, de quelque manière que ce soit, qui que ce soit ou quoi que ce soit.

Très souvent l'enfant sollicite la matière dans une recherche de sensations diverses : kinesthésique, sonore, tactile, visuelle, gustative, parfois même olfactive. Nous pouvons citer l'exemple d'une petite fille qui, souvent, colle son front aux réglettes de métal qui protègent les angles saillants de la structure d'Echirrolles, se regarde dedans, y pose ses lèvres, sa joue, la sent, parfois même la goûte en caressant le mur avec ses mains. D'autres matières comme celle de la toile du trampoline procurent à l'enfant des sensations kinesthésiques : l'enfant s'y allonge et tapote la toile avec ses mains, son corps vibre et les différentes sonorités produites le fascinent.

Même le simple fait de taper des pieds sur le sol dur, offre à l'enfant des sensations qu'il aime explorer, répéter (répétition dans laquelle, souvent, il s'enferme). À la pataugeoire, l'enfant prend un plaisir immense à expérimenter ces sensations sur le sol mouillé, il s'applique à frapper ses pieds bien à plat sur le sol pour accentuer les clapotis sonores et les sensations que cela lui procure. Nous pouvons également citer l'exemple de l'enfant qui dès son arrivée dans la structure se déchausse et enlève ses chaussettes, celui d'un autre qui longe le mur en y faisant courir la main, ou encore celui d'un enfant qui caresse les coussins.

À propos des sensations tactiles, nous pourrions penser que cette recherche s'applique prioritairement à des matières granuleuses, rugueuses ou au contraire très douces, c'est-à-dire à des matières qui procurent davantage de sensations. Mais nous pouvons infirmer cet à priori, car nous avons observé que, quelle que soit la matière, qu'elle soit granuleuse, douce, rugueuse ou parfaitement lisse, l'enfant frotte, caresse, tapote de la même manière, avec le même intérêt.

Tous ces exemples tendent à montrer avec quelle créativité les enfants utilisent, s'approprient, transforment les affordances en référence à Gibson (1986) de toutes les matières présentes dans les structures. La moindre matière constitue une fabuleuse ressource à l'action pour l'enfant.

Cette recherche incessante de sensation voire d'hyperstimulation mettant en jeu la matière et la matérialité de l'espace aboutit souvent à l'isolement de l'enfant par rapport à son environnement mais participe également à son développement, son éveil.

Etant donné la difficulté de cette population à avoir une image de sa corporéité comme une unité, il semble que la découverte de ces diverses sensations l'aide à prendre conscience de celle-ci et à se structurer.

## **LE MIROIR COMME MODULATEUR D'AMBIANCE**

Le miroir offre un large potentiel d'action que l'enfant utilise pour moduler l'ambiance. Il peut, en effet, permettre à l'enfant de se couper de son environnement, de s'isoler, comme il peut lui permettre de communiquer et de surveiller son entourage.

S'il se trouve très proche du miroir, voire en contact avec celui-ci, son champ de vision se limite à sa propre image. Il fait abstraction de son environnement qu'il ne voit pas et auquel il tourne le dos. Dans ce cas, le plus souvent, l'enfant s'enferme en faisant des traces dans la buée qui se forme sur le miroir.

À l'inverse si l'enfant se trouve à une certaine distance du miroir, son champ de vision s'élargit et couvre une grande partie de ce qui l'entoure. De nombreuses fois, nous avons pu l'observer en train de communiquer avec son soignant par l'intermédiaire du miroir, lui faire des signes, lui sourire.

Même s'il tourne le dos aux personnes qui l'entourent, grâce aux caractéristiques du miroir, il n'en sera pas isolé. Seul l'enfant décide, choisi de faire varier la distance qui le sépare du miroir, d'agrandir son champ de vision ou au contraire de le rétrécir jusqu'à s'isoler visuellement et psychologiquement. Il semble que cela permette aux plus régressés de faciliter les échanges en évitant les regards directs, souvent trop intrusifs, trop difficiles à soutenir tandis que pour les moins malades, ce moyen d'échange semble davantage ludique.

Ce type de situation a également pu être observé avec les vitrages selon leurs surfaces, leurs emplacements, les conditions météorologiques et d'éclairage. Cependant, ces situations offrent davantage la possibilité à l'enfant de s'isoler ou d'observer son environnement proche que la possibilité de communiquer avec celui-ci.

Soulignons, ici encore, que le potentiel en devenir de la matière, la matérialité va induire les actions et les comportements des enfants, qui, à leur tour, vont inventer des « arts de faire » particuliers en référence à Michel de Certeau (1990), parfois même surprenants. On voit bien ici l'importance de cette dimension dans la constitution d'une ambiance située et le fait qu'elle peut avoir une incidence au niveau des formes d'occupation de l'espace. Certaines matières très appréciées et localisées dans un espace précis pourraient provoquer le regroupement des enfants et des pratiques. La matière génère et permet des réponses individuelles (s'isoler, se reposer, jouer) mais aussi groupale (se réunir, jouer, regarder un camarade), et donc ouvre à la communication ou, au contraire, à l'isolement.

## **SOLIDITÉ DE L'ENVELOPPE SPATIALE ET DU MOBILIER**

De façon régulière, l'enfant lance un objet par terre puis le ramasse et le regarde attentivement comme pour voir s'il a bien résisté au choc. De même, par rapport à l'enveloppe spatiale, nous pouvons citer l'exemple de l'hôpital d'Echirolles où de nombreux enfants s'élancent sur leur tricycle pour atterrir violemment dans les murs. Par ces conduites, de façon quasi quotidienne, l'enfant vérifie la solidité des objets, du mobilier ou de l'enveloppe spatiale. Cependant, à partir du moment où un de ces éléments est abîmé, systématiquement les enfants continuent obstinément et inlassablement à les détériorer. Par exemple, si le revêtement plastique de l'assise d'un fauteuil est percé, alors l'enfant va dans un premier temps agrandir le trou puis peu à peu en sortir la mousse ; si la peinture s'écaille alors l'enfant va chercher à enlever tout ce qui se décolle puis continuera à gratter ; enfin, même si une paroi est endommagée, l'enfant va concentrer ses efforts pour agrandir la fissure et enlever de petits morceaux de matière. Quelque soit l'élément concerné (enveloppe spatiale, mobilier etc.), l'enfant agit exactement comme s'il souhaitait en vérifier les limites, la solidité, en comprendre la structure. Nos observations soulignent le fait que l'enfant présentant des troubles psychiques graves se comportent de la même manière face à sa corporalité : il éprouve sa solidité et ses limites corporelles, il semble intrigué, curieux de sa composition physique.

Au-delà de la curiosité que certains enfants peuvent avoir à décortiquer la structure conceptuelle de leur environnement physique et matériel, les dégradations sont un facteur d'angoisse pour ces enfants, ce qui souligne l'importance de la qualité des matériaux mis en œuvre et de l'entretien accordé aux structures d'accueil.

## LA MATIÈRE COMME SOUTIEN PSYCHOLOGIQUE

Il semblerait que les enfants les plus régressés aient une préférence pour les matières dures, particulièrement dans les moments difficiles, dans les moments très angoissants. Souvent, nous avons pu les voir trouver refuge contre un mur, s'accrocher à une rambarde de bois ou se recroqueviller par terre, autant de configurations qui se caractérisent par un contact avec des matières très dures. Un contact qui apparaît même parfois vital pour l'enfant en référence à Geneviève Haag (1991). La proportion du corps que l'enfant maintient en contact avec la paroi varie d'une situation à l'autre. En effet, dans certaines d'entre elles l'enfant se trouve en avant de la paroi, d'autres fois l'enfant s'y adosse sans vraiment accorder à ce contact beaucoup de tonicité musculaire, et d'autres fois encore l'enfant colle toutes les parties possibles de son corps à la paroi. Sa posture est dans ces cas là très éloquente, certainement très inconfortable : les talons, les fesses, le dos, les bras, les mains bien à plat et la tête sont collés au mur. Si nous analysons ces degrés de contact en fonction des situations, nous nous apercevons très souvent que celui-ci est lié soit au fait que l'enfant est extrêmement régressé soit au fait que la situation est vécu difficilement par l'enfant concerné.

Nous présenterons ici trois situations particulières afin d'illustrer nos propos.

La première concerne un enfant qui se blottit dans un angle rentrant. En effet, cette configuration réduit les angles de vision morts, les possibilités d'attaque, offre le meilleur point de surveillance sur ce qui se passe dans les couloirs, la plus grande liberté d'action si l'enfant se sent en danger (possibilité de fuite dans deux directions opposées) mais aussi une configuration contenant où le contact est primordial. En effet, les angles situés aux fonds des couloirs, dans les culs de sac, semblent bien plus contenant mais moins intéressants du point de vue des angles de vision et de la liberté d'action qu'ils offrent (figure 1).

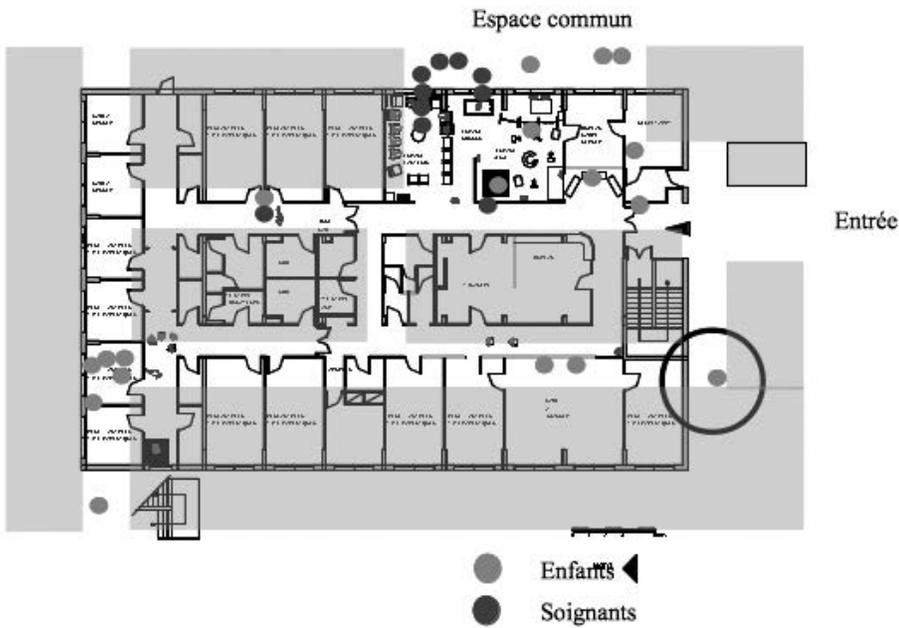
Lorsque ses camarades se trouvent au fond des couloirs, proches de la cabane, il ne les quitte pas des yeux, cependant s'il entend des grincements de tricycle provenant de l'autre côté (côté entrée), il se retourne précipitamment. Tant que son camarade sur le tricycle n'apparaît pas, il fait osciller son regard entre le fond des couloirs, où se trouvent ses autres camarades, et l'entrée, d'où proviennent les grincements. Puis, lorsque le tricycle apparaît, au fur et à mesure qu'il approche de lui, la tension musculaire que l'enfant mobilise pour maintenir toutes les parties de son corps en contact avec la matière s'intensifie. Il ne lâche pas son camarade des yeux jusqu'à ce que ce dernier se soit éloigné. Ici, les dimensions visuelle et sonore lui permettent toutes deux de monter la garde mais l'enfant privilégie toujours la surveillance de ses camarades les plus proches de lui, même s'il refuse le plus souvent le regard de l'autre.

Lorsque la structure est calme, qu'aucune irruption sonore ne vient perturber les lieux, que la majeure partie des enfants et des adultes se trouve dans l'espace commun, l'enfant semble totalement isolé dans ses pensées, il reste adossé à la paroi mais détendu. Désormais seule la partie haute de son dos est en contact avec la matière. Le regard fixé au sol, il a baissé ses gardes, cessé de regarder à droite puis à gauche. Il quitte doucement son poste, fait quelques pas, mais dès qu'une personne arrive, il regagne rapidement son poste : prioritairement l'angle rentrant dans lequel il se trouvait. Mais, s'il se trouve au milieu des couloirs, trop loin de son poste d'origine, il colle son dos au mur le plus proche ou s'accroche à la lisse de bois qui borde les espaces de circulations, jusqu'à ce que la personne passe son chemin.

Le second exemple se situe à l'hôpital Mosaïque.

Ce matin, un des enfants a du mal à entrer dans la structure. Le taxi l'a déposé avec deux de ses camarades qui ont filé directement dans le groupe de vie. L'enfant rechigne, il ne veut pas entrer. Puis, sitôt qu'il a franchi le seuil de la porte, il se précipite contre la courbe saillante de l'entrée. Tout son corps est en contact avec la paroi, depuis ses talons jusqu'à sa tête, sans oublier ses bras. L'enfant regarde d'un air inquiet autour de lui.

Figure 1  
Un angle contenant  
Hôpital d'Echirolles  
Sud (38)



Plan de situation

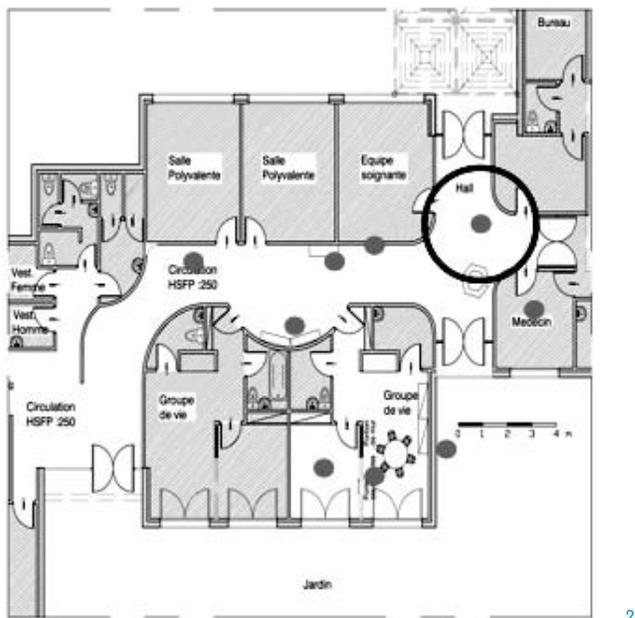
1

Son corps, son visage sont tendus. Deux adultes sont assis devant l'entrée du groupe et tentent de le rassurer mais en vain. L'un d'entre eux lui demande d'enlever sa veste. L'enfant s'exécute lentement, en prenant garde de ne jamais perdre le contact avec la paroi. Il enlève d'abord un bras puis l'autre, si bien qu'après avoir enlevé ses manches, sa veste reste coincée entre son dos et la paroi. L'enfant restera ainsi un moment avant de venir s'asseoir par terre proche des soignants devant l'entrée du groupe de vie (figure 2).

Enfin la troisième situation concerne un enfant qui est seul dans les couloirs de la structure tandis que ses camarades et les soignants se trouvent dans l'espace commun. Au bout d'un moment, il se rapproche doucement afin d'apercevoir ce qui s'y passe. Ses pas sont hésitants, ses déplacements lents, son dos est soigneusement collé au mur, son ouïe et sa vue semblent être attentives à son environnement. L'enfant s'avance, il penche au maximum son corps sans jamais dépasser la zone d'ombre qui se dessine sur le mur du couloir, tire son visage en avant afin d'augmenter son champ de vision et de mieux voir ce que font ses camarades mais sans jamais décoller son dos du mur (figure 3).

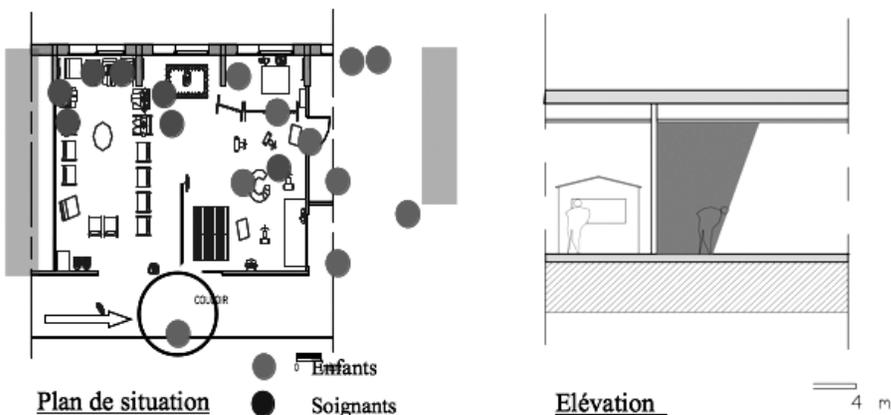
Dans sa quête incessante de protection, l'enfant se sert de l'espace construit et de ses caractéristiques physiques pour se protéger. Il semble que le contact, « l'accrochage » à l'espace aménagé, le fait de ne faire plus qu'un avec la matière, particulièrement avec l'enveloppe spatiale représente pour l'enfant un soutien psychologique, comme si le contact l'aidait à mieux vivre certains moments difficiles. En effet, sa posture, le degré de contact avec la matière et l'intensité musculaire investie par l'enfant sont éloquentes. En fonction de ses possibilités, l'enfant réduit ou augmente l'ampleur de son champ de vision, l'ampleur du territoire qu'il surveille, sa distance par rapport aux autres, ses possibilités de fuite en cas de danger ainsi que la dimension contenante des configurations et l'intensité du contact avec la matière.

Figure 2  
 Une paroi sécurisante,  
 Hôpital Mosaïque,  
 Sainte Geneviève  
 des Bois (94)



2

Figure 3  
 "La cachette"  
 Hôpital Echirolles  
 Sud (38)



3

## POUR CONCLURE

Autant d'éléments qui questionnent directement la matière, la matérialité et plus largement l'architecture, l'aménagement des lieux de vie. Les configurations spatiales, visuelles et sonores d'un site permettent aux usagers de choisir leur place (physique, matérielle, psychologique et sociale) les uns par rapport aux autres : loin de, à côté de, à proximité mais hors du champ de vision de, à l'opposé de etc. Elles jouent un rôle important dans la construction du Moi, dans la connaissance de l'individu par lui-même et dans sa reconnaissance dans le groupe, par les autres.

## REFERENCES

- Canguilhem G. (1966), *Le Normal et le Pathologique*, Paris, PUF.
- De Certeau M. (1990), *L'invention du quotidien*, Paris, Gallimard, Vol 1.
- Deligny F. (1980), *Les enfants et le silence*, Paris, Galilée.
- Gibson, J-J. (1986), *The ecological approach to visual perception*, London, LEA.
- Goffman E. (1973), *La mise en scène de la vie quotidienne (Volume 2)*, Paris, Edition de Minuit.
- Goffman E. (1974), *Les rites d'interaction*, Paris, Edition de Minuit.
- Goffman E. (1987), *Façon de parler*, Paris, Edition de Minuit.
- Haag G. (1991), *De la sensorialité aux ébauches de pensée dans le développement des enfants autistes*, *Revue internationale de psychopathologie* n° 3, Paris, PUF, pp. 51-63.
- Maldiney H. (2001), *Existence, crise et création*, La Versanne, Encre Marine.
- Maldiney H. (1991), *Penser l'homme et la folie, A la lumière de l'analyse existentielle et de l'analyse du destin*, Grenoble, édition Jérôme Million.
- Mucchielli R. (1986), *Analyse et liberté*, Issy-les-Moulineaux, EAP.

# A SPATIAL NAVIGATION SYSTEM WITH AUTO-3D TRACKING AND AUTO-STEREOSCOPIC CONVERGENCE

**YEN-LIANG WU**

Dep. of Digital Media Design, Asia University - Taiwan

## **ABSTRACT**

Virtual reality has a stronger interaction and integration than other design media for spatial visualization. In this paper, we created a low-cost 3D position-tracking device to track the height and position of navigator's viewpoint and compute convergence of the binocular stereoscopy for the spatial navigation system. Auto-3D tracking and auto-stereoscopic convergence create a more naturalness and reality for navigators to experience the virtual design space and improve precision in communications between architectural designers and general public.

Keywords: navigation, stereoscopy, 3D tracking, design media

## **INTRODUCTION**

A building, from design to the final touch, has to ultimately communicate with the user of its space. Spatial narrative is an effective way to convey architectural sensation (Venturi, 1977), while the design media of spatial narratives has changed from design media in traditional drawing and usage of models to digital media by means of digital forms due to the rapid development and wide adoption of information technology. From a 2D plan, elevation, sectional drawing, and lifelike-rendering perspectives to computer animation that display a continuous space and time changes have all been employed for the presentation of space (Hah et al, 2008). Computer animation gives a static building drawing life (Ng et al, 2006). In the past, people have had to read different static drawing sets and create a fraction of spatial images in their minds to understand the unrealized design of space that has not been created yet. After computer animation has been utilized as a tool for presentation, the space is presented in a way of continuous visual images from fractions of images.

In comparison to the active narratives of animation in space, virtual reality is relative and passive to spatial narratives. Navigators of space must navigate space by using a navigational operation device. In a virtual environment, a navigator has to employ self-controlled interaction to increase the sense of presence in virtual space (Witmer and Singer, 1998). Virtual reality allows a design space that has not yet been created to

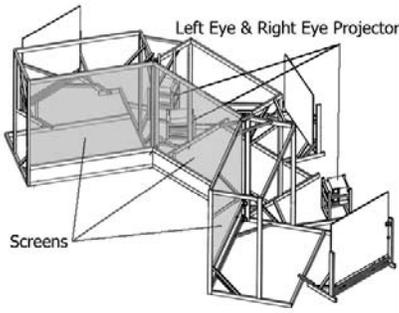


Figure 1  
VR CAVE is  
composed of three  
screens.

1

provide navigators, as Le Corbusier mentioned, the best way to experience buildings by personally walking into the building, observing, and experiencing the connection of space in the building by changing the visual angles rather than a building on paper that is only based on theories (Penz, 2004). Therefore, virtual reality has a stronger interaction and integration than other design media for spatial display. Today, the international design environment is becoming increasingly important and the future development of virtual reality will be an essential tool for intrapersonal communication for designers, team communications, owners, and the public (Kalay, 2004).

## PROBLEM AND OBJECTIVES

In terms of the development of virtual reality, in addition to the evolution of hardware, such as monitors for visual output and 3D computer graphics and input devices that allow users to interact with visual spaces. The input devices for general usages include a keyboard and a mouse, tablet monitors from the early days to commonly used touch screens and various joysticks as used for games today. However, all mentioned devices are 2D input devices. A more unique interactive input device is required for users to naturally navigate 3D virtual space (Burdea and Coiffet, 2003). Various tracking technologies that will immediately detect 3D positions of the head, hands, and bodies of navigators in virtual space have been developed. For example, mechanical, ultrasonic, magnetic, and optical tracking technologies (Burdea and Coiffet, 2003; Bowman et al., 2005) convert the viewing positions and directions of users into the positions and directions for virtual space. Current popular video game consoles like the Wii (Nintendo), Kinect (Microsoft), and Move (Sony) are much cheaper when compared to high-priced 3D positioning devices. These video game consoles feature 3D positioning technologies that allow users to interact with the content of games by using instinctive body movements. We chose the Wii as the input device for head 3D positioning when users are navigating to practice a spatial visualization system that automatically adjusts the height and position of viewpoint in virtual space and auto stereo vision that simulate binocular convergence of human eyes while viewing distant objects.

## METHODOLOGY AND STEPS

### System environment

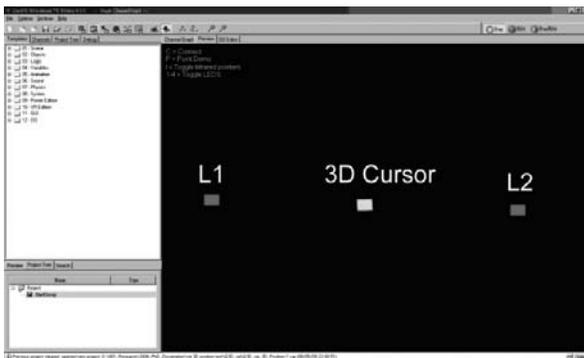
The hardware structure used in our study is VR CAVE (Virtual Reality Cave Automatic Virtual Environment) and is composed of three 120-inch projection screens. The 3D graphics are presented in the form of polarized light. The stereo graphic is projected on each screen by two projectors that manage the right and left eye using back-projection

Figure 2  
Polarized-light  
3D glasses with  
IR LEDs (left),  
WiiMote (right)



2

Figure 3  
X and Y  
coordinates of 3D  
cursor obtained  
from the two IR  
LED coordinates



3

(figure 1). The computer structure consists of one server computer and three client computers. The server computer controls the three screens to display simultaneously via the internet. The left and right eye images of each client computer are projected by two projectors in a horizontal side-by-side position. The software we used for our study is Quest3D version 4.0, which was designed for interactive virtual reality.

### Auto-3D tracking

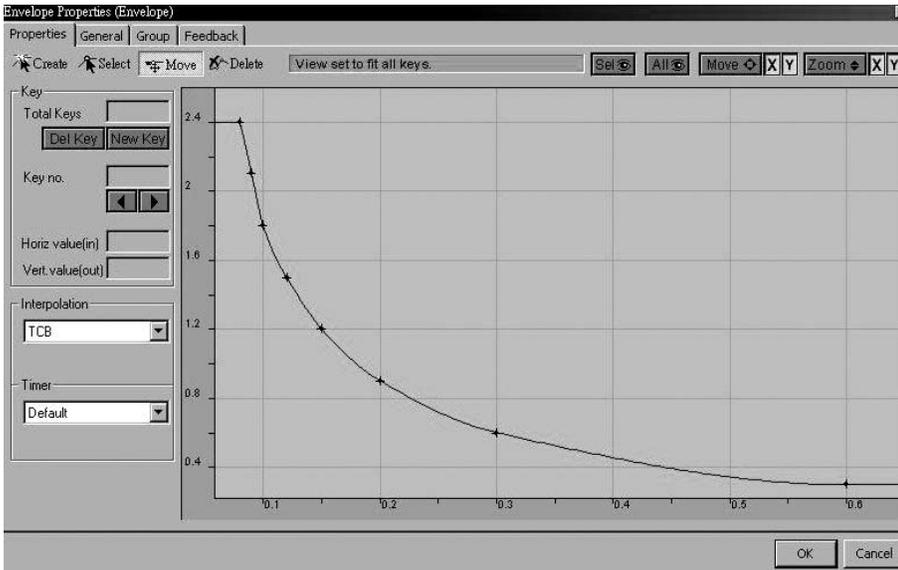
We utilized polarized-light 3D glasses with LED with infrared (IR) light and Nintendo WiiMote for our system to better adapt with each space navigation in different visual positions (figure 2). Our system promptly detects the position where a navigator stands in front of VR CAVE wearing 3D glasses and present the visual perspective in compliance with the height and position of the navigator.

Figure 3 indicates Quest3D obtaining red spots L1 and L2 from two IR LEDs on 3D glasses captured by the WiiMote camera. The green 3D cursor in the middle of the screen is the intermediate coordinate calculated from the L1 and L2 coordinates.

When a navigator wears a pair of 3D glasses, Get IR camera data channel in Quest3D will only obtain the two XY vertical and horizontal coordinates of the two IR LEDs, but will not obtain Z coordinate with depth. However, if we shoot two IR LEDs through WiiMote at a closer distance, the two IR LEDs on appear at a longer distance through the camera lens. If the two IR LEDs are placed farther away from the WiiMote, then two IR LEDs on camera lens will show a shorter distance between each other. As a result, for computing Z-axis in 3D positioning, we used the changes of differences between two IR LEDs in Quest3D

Real space (cm)	3	6	9	1	1	1	2
Quest distance	0	0	0	20	50	80	10
	0	0	0	0	0	0	0
	.6	.3	.2	.15	.12	.1	.09

**Table 1**  
LED displacement and the distance between two spots in Quest3D



**Figure 4**  
The line chart of Envelop channel in Quest3D shows the distance between L1 and L2 and real distance from Table 1.

4

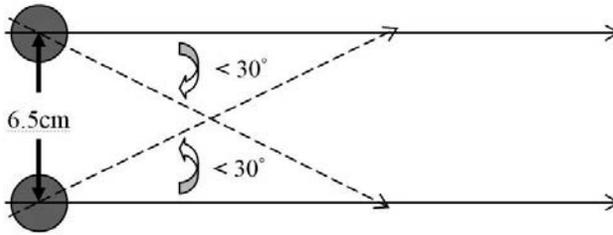
to compute the location of Z coordinate. However, Table 1 shows the results as when IR LEDs of 3D glasses and WiiMote move equidistant 30cm, the distance between the two spots on Quest3D show non-equidistant changes, while prolonged with 3D glasses and WiiMote. The distance between the two spots in Quest3D shortens gradually. We utilized value channel of the Envelop (figure 3) form to adjust the parameters of Z-axis with more equidistant changes based on the distance parameters of Quest3D the changes of non-equidistance to be more equal (table 1).

### Auto-stereoscopic convergence

In reality, humans rely on three factors binocular parallax, binocular convergence, and lens accommodation to judge a distance in a space except from monocular visual cues (Schiffman, 2000). However, the graphics presented in virtual space are visual images from monocular visual cues or parallax images of left/right eyes produced from the distance between each eye (6.5cm). The parallax generated from the angle of binocular convergence is not considered or the stereoscopic images are merely presented by a fixed binocular convergence (Shibano et al., 2003; Fukuda et al., 2005), i.e. the angle between each eye and an object is fixed and is unable to accommodate accordingly the distance of an object viewed as human eye binocular convergence. Therefore, we have added the ability of dynamic binocular convergence (i.e. like the human eye) in the system to align the vision of virtual reality closer to that perceived by the human eye in reality to improve the judgment of spatial distance in virtual space.

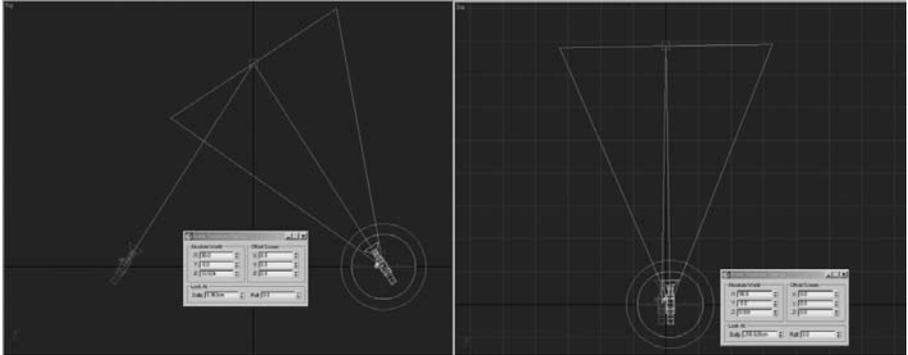
The amount of binocular parallax depends on the distance from an object. Thus, if each eye turns inward 30, then a regular triangle is formed with a distance of 6.5 cm between each eye (figure 5). The object will be located in front of the bridge of the nose within

**Figure 5**  
The convergence angle when each eye turns inward



5

**Figure 6**  
Angle measured between an object and the cameras in 3Ds Max



6

**Table 2**  
Distances from an object viewed and the corresponding angles the camera turns inward

<b>Distance (cm)</b>	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
<b>Inward angle</b>	33.02	18	12.23	9.23	7.41	6.18	5.31	4.65	4.13	3.72
<b>Distance (cm)</b>	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200
<b>Inward angle</b>	3.1	2.66	2.33	2.07	1.86	1.55	1.33	1.16	1.03	0.93

6.5 cm. Our system is able to adjust the angles that each eye turns inside based on the distance from an object as the eye views an object, we have to automatically adjust the angles of the cameras knowing the distance from the object. Figure 6 reveals the changes of camera angles in relation to the distance from an object in 3Ds Max. Table 2 records corresponding inward angles changed with the changes of fixed distance from an object. The measured distance is from 5 to 200 cm. When the distance is greater than 30 cm, the delta of changes of angles tends to direct towards 0 from 1.23 (7.41-6.18).

Auto-stereoscopic convergence is measured by the collision ray check channel in Quest3D to project rays from the center of the camera view screen and the rays located on an object in front of the camera. The Quest3D computes the 3D coordinate where the rays are projected on the surface of the object, then the coordinate and the position of camera are used to compute the relative distance, which is a distance adjusted whenever the distance from the object and camera changes. Cameras with left and right eyes immediately and relatively adjust its angles in accordance with the distance according to Envelop channel (like Figure 4) that data is from Table 2.



**Figure 7**  
The navigator stands in the middle position (left) and lower position (right) of the screens

7



**Figure 8**  
The different parallax when focusing at far (left) and near (right) distance

8

### System testing

Based on the test results, auto-3D tracking successfully changes its viewpoint according to the position and height where the navigator is standing (figure 7) and solves the issue that navigator's viewpoint was fixed in general navigation of virtual reality. However, this function limits the distance between the navigator and WiiMote due to the power of the left and right IR LEDs on the 3D glasses. The best distance for detecting is within 1 m from the front, back, right, left, upwards, and downwards.

Auto-stereoscopic convergence in system testing adjusts the inward angles of camera as left/right eyes by judging the distance from the front object (figure 8). However, when an object is viewed from a close distance, the parallax produced when an object is viewed at a distance is greater than one produced when an object is viewed from a close distance that makes eyes feel uncomfortable.

### CONCLUSION

We used the WiiMote to create a low-cost 3D position-tracking device that enables navigators to wear stereoscopies with IR LEDs to acquire viewpoint height and position where the navigator is standing in front of a screen while operating the navigation system. Meanwhile, the computed position and the distance from an object that the cameras are focused on are used to compute the camera convergence angle of stereoscopic parallax. Therefore, auto-3D tracking and Auto-stereoscopic convergence create a more natural and realistic experience for navigators when they are in virtual space. In terms of our study limitations, an initial test was conducted by the developer for system testing because the navigation system is a preliminary prototype. In the future study, we will utilize Kinect as the technology for 3D positioning instead to overcome the problems that stereoscopies need IR LEDs. Furthermore, regarding the discomfort caused by auto binocular convergence when people are viewing, research is still required to discuss how stereo images obscure far away images like the accommodation of lens.

## REFERENCES

- Bowman D. U., Kruijff E., LaViola J.J., Poupyrev I. (2005), 3D user interfaces: theory and practice, Addison-Wesley
- Burdea G.C., Coiffet P. (2003), Virtual Reality Technology, A Wiley-International publication
- Fukuda T., Kaga A., Nagahama R., Shibano N., Sasada T., Liu Y.-T. (2005), The World's Largest VR-Dome for Collaborative Design, CAADRIA'05, India, pp. 203-213
- Hah E.-J., Schmutz P., Tuch A.N., Agotai D., Wiedmer M., Opwis K. (2008), Cinematographic Techniques in Architectural Animations and Their Effects on Viewers' Judgment, International Journal of Design, 2(3), pp. 29-41
- Kalay Y. E. (2004), Architecture's new media: principles, theories, and methods of computer-aided design, MIT Press



# HACKING ARCHITECTURE TO LET COLLECTIVE INTELLIGENCE IN

RENK ALAIN<sup>1</sup>, SIMONE WALTER<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>UFO (urban Fabrique Organisation), <sup>1</sup>Renk + partner, <sup>2</sup>PREVIEW\_R&D

## ABSTRACT

Could numeric tools could facilitate the cities' transformation toward more sustainability? UFO, Urban Fabric Organisation, is a start up created in 2009 with the financial help and the labellisation of Advancity cluster (sustainable city and mobility) and Cap Digital Cluster (numeric contents). UFO developed a collaborative urbanism concept to make cities more livable, more attractive and more sustainable. To avoid to add to environmental wasting the cognitive wasting, we need to create collaborative intelligence numeric tools. In this sense, UFO is the start point of a collaborative urbanistic community composed of designers and developers. This working community is sprawling like a virus. Its decentralized network is hold by co-developers living in Paris, Sao Paolo, Tokyo, Santa Barbara, Strasbourg and Grenoble. Unlimited Cities is the first tool of collaborative urbanism developed by UFO and use by our community.

Keywords: Urbanisme collaboratif, qualité de vie urbaine, open DATA, représenter la complexité

## ET SI NOUS MODÉLISONS LA QUALITÉ DE VIE URBAINE

Engagés dans les mondes de l'architecture, de l'art numérique et du software, les quatre associés architectes d'UFO ont complété leurs structures par la création d'une start-up technologique dont les projets de R&D sont financés en partie par des fonds européens. La capacité de développer nos outils informatiques nous permet aujourd'hui d'utiliser la matière-information comme point de basculement entre l'urbanisme classique et l'urbanisme collaboratif. Nos activités ont pour but de développer les méthodes de l'open innovation pour favoriser la transition vers des villes plus vivables et plus soutenables.

UrbanDash est le projet fondateur d'UFO. Il s'agit d'une plateforme systémique multicritères et multiéchelles d'évaluation et de représentation de la qualité de vie urbaine. Les enjeux de la R&D collaborative UrbanDash sont de participer aux transformations des modes de conception, de décision et de fabrication des villes contemporaines en intégrant la société civile (individus et organisation) en tant qu'acteur effectif de l'ensemble des étapes de la transformation des territoires. La R&D collaborative UrbanDash est



Figure 1  
Screenshot sur  
fond de carte 3D  
représentation  
d'indices de  
qualités de vie  
urbaine avec  
module d'interface  
utilisateur.

1

développée avec les laboratoires de recherche publique CNRS LIPN (informatique), CNRS LAA (Architecture Anthropologie) et Telecom ParisTech (Sociologie des usages numériques).

Le parti pris méthodologique pour construire l'évaluation est de se situer du point de vue de l'habitant et de construire les indicateurs de la qualité de vie urbaine à partir des réalités concrètes dont chacun fait l'expérience au quotidien.

Les verrous à lever étaient :

- Construire la confiance des utilisateurs.
- Définir un thème partageable par rapport à l'éclairage des décisions urbaines.
- Développer un système de représentation accessible.

La triple solution proposée par UrbanDash :

- Une plateforme d'évaluation qui relie, à travers une structure systémique et une arborescence, des critères abstraits à des variables géo-référencées.
- Le thème de la qualité de vie urbaine
- Un modèle 3D intégrant les nécessités du calcul, (le modèle est actif, détermine les positions relatives des éléments et fait fonctionner les différentes règles d'évaluation) mais aussi les nécessités de représentations accessibles aux non professionnels de l'urbain.

Les résultats sont obtenus à travers un outil d'évaluation de la qualité urbaine capable de relier sans coupure l'évaluation de concepts globaux à l'évaluation du territoire local, et inversement, l'évaluation du territoire local qui doit être lié à l'évaluation de concepts globaux.

## RÉSULTATS MAJEURS DU PROJET URBANDASH

Le projet UrbanDash a donné lieu à deux expérimentations pour les modules Unlimited Cities et Evolving Cities présentés au grand public simultanément en ligne (accès internet ouvert) et au sein des manifestations Furtur en Seine 2011 et Futur en Seine 2012 à Paris. Ces deux expérimentations n'étaient pas prévues au départ, mais sont devenues nécessaires pour la recherche.

Les expérimentations ouvrent des pistes sur le potentiel d'outils d'intelligence collective accessibles à la société civile, sur le domaine de l'urbain, et pouvant produire des résultats effectifs pour l'aide à la décision des professionnels. L'implication des habitants et des

Figure 2  
Screenshot  
paramétrage  
d'interface  
utilisateur/  
modulation  
d'environnement  
urbain qualitatif.



2

organisations à travers ces plateformes d'expérimentation numériques conduit également à des modes d'implications et de participations identifiés comme nécessaires pour les transformations durables, avec des évolutions possibles des systèmes de gouvernances. Il semble également que des bénéfices en terme d'innovation émergente et d'identité des territoires, participant à de nouvelles attractivités puissent être attendus.

La première expérimentation Unlimited Cities est liée à l'amont des projets, il s'agit d'expériences liées à la programmation de l'évolution d'un quartier. L'action collaborative pourrait être assimilée à de la co-programmation. Le premier terrain était à Paris, quartier de la Bastille. En octobre 2012, la ville de Rennes a commandé une expérimentation sur le quartier sur de la gare TGV.

La seconde expérimentation Evolving Cities est liée au développement concret des projets. Dans ce cas, l'action collaborative pourrait être assimilée à de la co-conception. Le terrain était à Évry.

Le projet UrbanDash lui-même sera expérimenté de façon partielle à New York, à Brooklyn au Sud est de Manhattan avant la fin 2012, date de fin de la recherche.

La première expérimentation Unlimited Cities a été sélectionnée par le pôle Cap Digital au sein du projet européen Open Cities. Ce projet ouvre la voie à des relations avec les villes et les universités de 6 pays. Unlimited Cities va être testé à Helsinki, Amsterdam et Berlin avec des analyses d'usage réalisées par les laboratoires de l'Institut Mines Telecom. La seconde expérimentation Evolving Cities mise en place de façon expérimentale sur l'école de l'ENSIIE, par l'intermédiaire de l'Institut Mines Telecom, a donné lieu à des demandes de collaboration de plusieurs laboratoires de recherches liés aux systèmes de capteurs et à la réalité virtuelle.

Le secteur de la santé publique, et en particulier l'Institut de Santé Urbaine, en lien avec l'École Centrale de Paris, semble également vouloir collaborer avec les plateformes collaboratives interactives issues de la R&D urbanD sur les thèmes de l'urgence vitale, de l'accessibilité et de la pollution extérieure et intérieure. Des synergies de recherche sont actuellement en cours de développement.

Notre cheminement actuel s'appuie sur des applications numériques qui lient expérimentation, perception, imaginaire et représentation, financement, recherche, besoins, résultats et témoignages. Parmi nos étonnements, le fait que nous recherches ont été aussi rapidement repérées en France et à l'étranger et que nous soyons invités des aujourd'hui à participer à des projets concrets sur plusieurs continents. C'était évidemment notre but et nous avons passé du temps à expliquer que nos propositions ne s'opposent pas aux méthodes classiques, mais viennent les compléter. Notre explication est que notre présence sur internet, même assez peu organisée, à travers des fragments de réflexions et des vidéos de making of imprécises, mais ouvertes, a participé à la diffusion de l'engagement d'une start-up fondée par des architectes franco-américains au service d'une implication radicale et concrète de la société civile pendant toutes les étapes des projets.

Les avancées de la R&D ont été présentées lors de nombreuses conférences comme au Japon en février 2012 (mois du numérique), à Helsinki lors de l'Open Knowledge Festival en septembre 2012, ainsi qu'au Festival International de la Géographie FIG en octobre 2012, ainsi que lors de nombreux workshop avec les laboratoires de recherches impliqués dans le projet. (CNRS LAA anthropologie architecture, CNRS LIPN informatique, Telecom ParisTech Laboratoire de sociologie des usages )

L'aventure engagée depuis début 2010 correspond à un surf permanent entre déplacements géographiques, réorientations des problématiques et intégrations des apports liés aux différents tests et conditions d'utilisation. Par exemple, se trouver confronté brutalement au déplacement des conditions d'une expérimentation : conçue pour une tablette de 20 centimètres, Unlimited Cities a été projetée une nuit sur un cube de VJing de 20 mètres de base dans la ville de Rennes pour être utilisée par les habitants et les élus. Si la carte n'est pas le territoire, des situations imprévues provoquent d'étranges déflagrations de sens quand matières virtuelles dynamiques et individus se combinent à l'échelle 1:1

L'inattendu est parti prenante de nos recherches et expérimentations, car c'est la caractéristique même de l'hybridation fractale du digital et du tangible. Les notions d'incertitudes et de multiples voies (forks) se précisent lors des prototypages rapides et des beta-test. De fait, la R&D collaborative UrbanDash n'intégrait pas au début des modules expérimentaux Unlimited Cities et Evolving Cities. Ceux-ci sont devenus nécessaires pour la recherche. Le fait de disposer de modules expérimentaux spécifiques avancés a permis d'améliorer les interactions et les compréhensions entre les laboratoires et les PME sur le sujet complexe de la qualité de vie urbaine.

Figure 3  
Montage photo  
module VSL  
Renne V1 sur  
Ipad.



3

## POUR CONCLURE

Sur Rennes, lors de l'expérimentation Unlimited Cities, en 7 jours, plus de 600 personnes ont pris du temps pour construire une proposition parmi 15 625 combinatoires possibles. Plus des deux tiers des personnes ont commenté leurs choix. À travers l'interface mobile, c'est en temps réel que le code ADN de chaque proposition a été distribué vers des serveurs qui assemblent et traitent ces données pour en créer des représentations intelligible et partageable entre tous.

Comment avoir de l'affect et de l'intérêt pour un sujet complexe (le futur de mon environnement) sans en comprendre le sens ? Les outils de l'urbanisme collaboratif permettent de créer un langage commun, compréhensible par tous. Non pas pour être tous fabricant de notre environnement urbain, mais pour être capable d'en comprendre ses mécanismes, les évolutions, et les éléments sur lesquels intervenir pour introduire de manière collective des désirs et des imaginaires de vie locale.

Face aux méthodes habituelles de concertations, la différence est flagrante entre un projet "re"-présenté à la population et un projet à multiples représentations dynamiques. Dans le premier cas, le projet est perçu comme un objet extérieur, alors que dans le second, le projet crée une appropriation, un attachement à travers une action personnelle. Les résultats sont riches et multicritères, ils intègrent des points de vue différents et proposent des solutions qui peuvent s'étagé dans le temps.

L'insertion dans le réel des projets urbains de la médiation numérique collaborative apporte des nouvelles conditions capables de définir le projet urbain à partir de l'expression des contraintes métaboliques et atomiques des territoires contemporains. Ces nouvelles conditions peuvent donner accès des solutions de gouvernance plus contemporaines que le tryptique élus, professionnels et concepteurs pour les villes du XXI<sup>e</sup> siècle.

[www.urbanfab.org](http://www.urbanfab.org)





# SULPHUR, ARCHIVAL TRACES AND NARRATIVES OF HYPER-MATERIALITY

KOTSANI EFTHYMIA DIMITRA  
TELLIOS ANASTASIOS  
TSAKIRIDIS GEORGIOS

School of Architecture, Aristotle University of Thessaloniki (AUTH)

## ABSTRACT

A weak point of advanced digital techniques in architectural design, is its doubted capacity, sometimes inability and sometimes even reluctance to address physical existence. Significant work has been done, though, mainly inside academic communities, so as to explore the potential of advanced design tools in the physical world. Advanced fabrication has been able to deliver tangible spatial proposals into life, while digitally driven design research has facilitated the capturing and encoding of an entire level of immaterial attributes of space, linked back to history, culture and theoretical science.

An example of design speculation as described above, is suggested by a research project called 'Lapis Callidus'. The project suggests the introduction of a highly sophisticated robotic system with swarm-like behavior properties, in an inherently dystopic territory, such as the abandoned sulphur mines, located in volcanic subterranean areas. Sulphur and its natural and fictional attributes, in a creative coexistence with technology have been the architectural medium for the exploration and research of new ways of habitation.

Keywords: sub-natures, hyper-materiality, narrative, sulphur, archive

## RESEARCH BY DESIGN: LAPIS CALLIDUS:

The project is named after the Latin term: "Lapis Callidus" (smart stone) (Fig: 1), where "Lapis" is apprehended, as the material expression of the archival "recordings" of the continuous evolutionary and transformative processes in nature, directed to function as a communicating platform between information and the user.

In an era, when the concept of "universal order" seems, rather, inadequate to describe an ever-changing environment, in which human activity still retains an important role, the trace and systematic investigation of relations and topologies constitute the major means of comprehension. One of the major repercussions of the rapid development in the fields of Science and Technology has been the renegotiation of the terms of nature and artifact,



1

along with their mutual relation<sup>1</sup>. In that context, the emergence of a new aesthetics, both in terms of materiality and spatial formations, relates to a set of natural elements, which have been formerly marginalized. Those aspects of nature, which are quoted as: “subnature”<sup>2</sup>, are primarily considered hostile, either for the subject/user or for the principals and the material formations that constitute Architecture.

The architectural narrative of “Lapis Callidus” is developed in an alienating ‘physis’ (nature), where every parameter is set to the extreme, and the causal relation between materiality and (human) reaction, is expressed through a kind of ‘struggle for survival’. Such an inherently dystopic territory is located in the abandoned sulphur mines of a volcanic subterranean area, called ‘Paliorema’ on the Greek island of Milos (Fig: 2). The key factor in this ambiguous equilibrium is the natural element of Sulphur, through its multitude of forms and connotations.

## METHODOLOGY FOR THE MATTER:

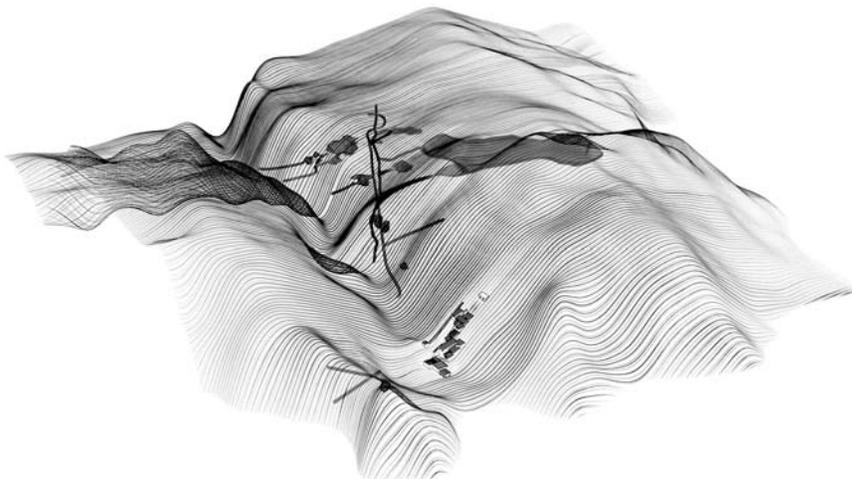
The design evolves through a site-specific investigation, in which the outcome of the combination of objective information analysis and subjective reaction towards the stimuli of physical experimentation (Fig: 3), updates the process, following a formula of feedback loops. Thus, the research initiates with the collection of scientific data, regarding the physical and chemical properties of sulphur (S) and its numerous compounds<sup>3</sup>, along with its interaction with the rest of the material world. The uniqueness of this particular element is depicted on its duality, as far as the variation of its form and its chemical properties are concerned. Firstly, it retains two different states of solid matter, by transforming its formal expressions according to the temperature of the environment (orthorhombic crystals < 91° C / monoclinic crystals > 91° C). Secondly, the pure, almost beneficial properties of its clear form (S8) can be easily converted into hazardous, even lethal for the living beings, compounds with other elements (H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etc.). A first set of chemical experiments, which include mainly copper sulphate (CuSO<sub>4</sub>) crystal-growing techniques, is introduced, in order to speculate on the various properties of crystalline formations in human scale. Moreover, the necessity of familiarizing with the inherently complex structure of sulphur, both in micro and macro scale, is enhanced by the development of digitally driven simulations of Diffusion Limited Aggregation (DLA) crystalline systems.

**1** Bensaude-Vincent B., Newman W. R. (2007), *The Artificial and The Natural - An Evolving Polarity*, Massachusetts, The MIT Press

**2** Gissen D. (2009), *Subnature - Architecture's other Environments*, New York, Princeton Architectural Press

**3** Meyer B. (1965), *Elemental Sulphur: Chemistry & Physics*, Interscience Publishers

Figure 2  
The site of  
Paliorema, Milos



2

Figure 3  
Copper sulfate  
formations  
and limestone  
corrosion  
installation

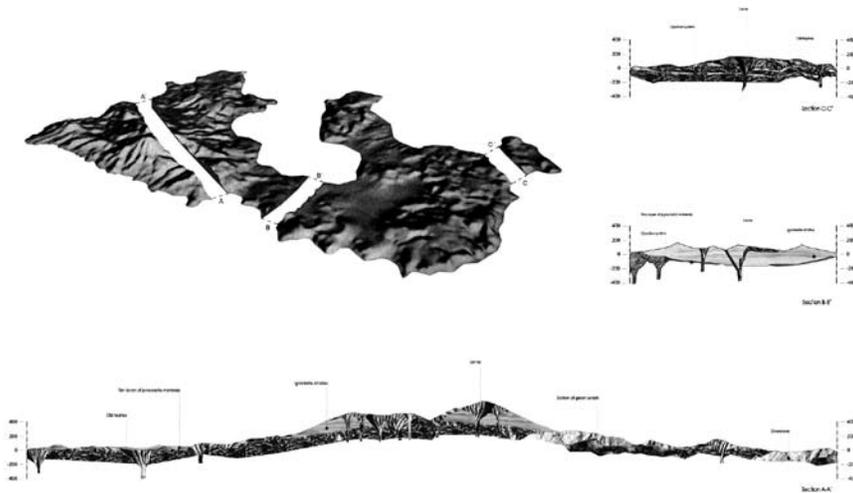


3

Aiming towards a complete understanding of the parameters and the dynamics of a distinct system, such as the sulfuric terrain of “Paliorema”, the project advances on the geological analysis of Milos, regarding the anaglyph formations and its soil consistency. (Fig: 4) Through the systematic research on historical and geological records, a number of maps and diagrams were generated, depicting the subterranean distribution of minerals, and more specifically, the sulfuric reserves and the existing sulphur-mine galleries of the area. Additionally, the extensive concentrations of limestone in the region led to a further investigation on the interrelating effects of the two elements, resulting in an experimental installation for the study of the corrosive properties of sulfur- acidic compounds on limestone specimens.

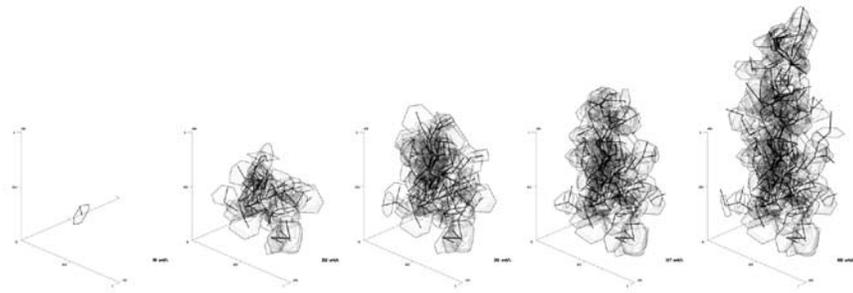
The thorough study of the actual, but sometimes fictional and historical relations of sulphur to the human activity, concluded on the emphases of its highly symbolic character, surprisingly, engaging with the figure of duality in the social context. Throughout the human history, there have been numerous examples; such as the ancient Greeks and the

Figure 4  
Geological  
anaglyph and  
sections of Milos



4

Figure 5  
Sulfuric crystal  
breeding  
formations



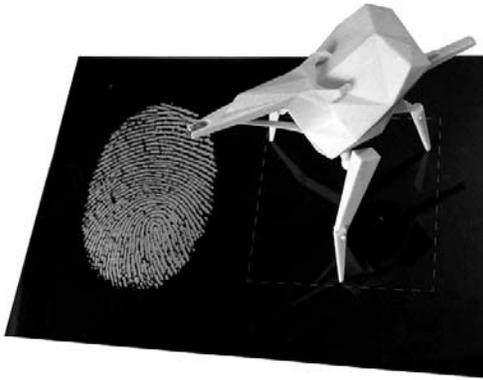
5

Alchemists, who identified sulfur with 'providential' and 'sanitary' powers, whereas in other cases it is assimilated to the eternal purgatory. Today, apart from its fundamental role in the contemporary, world wide industrial production, sulfur could be conceptually radicalized. Taking into account its scientific classification as mineral or stone (see above: "lapis"), the connotative links to the evolution of human civilization could designate sulphur into an information "carrier".

Consequently, the project speculates on the articulation of the, inherently complex, system of sulphur-crystalline structures (Fig: 5) through the coding/de-coding of the information, which is concentrated and exchanged on the widest contemporary 'archive of knowledge', the digital world of an immaterial network like the Web. Based on the material polymorphism of elemental sulphur, the information is 'subjected' in a physical gradual deterioration -up to its complete 'erase'- acting as a form of 'natural' hacking and, eventually, connecting to the relativistic role of the 'archivist' and the archive itself<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Voss P.J., Werner M. L. (1999), *The Poetics of the Archive*, Atlanta, GA: Georgia State University

Figure 6  
Robotic unit  
(model scale 5:1)



6

### ADVANCED DESIGN TOOLS:

The potential architectural rhetoric that emerges from the engagement with this multi-sensory system is, unavoidably, connected with a simultaneous research on possible tooling techniques, which stimulate radical material (trans)formations. Thus, the main challenge abiding is the development of an “interface”, which bridges the gap between the immaterial information and the material nature of archival recording.

The implementation of an experimenting prototype multitasking-network of robotic units (Fig: 6), as the major fabricating mechanism, enables the performance of the system. The Victorian-type production line of the old, abandoned, sulphur-mine factory on the ravines of “Paliorema” stand out as the initiative for the design of the major functional aspects of the unit. Based on the fundamentals of traditional sulphur-mining methods, along with the unyielding chemical reactions among sulfur and limestone rooted materials, the robotic swarm generates sulphuric crystal breeding formations. The resulting transformations of its territorial surrounding, which could be adequately described as an artificially generated cave-network system (Fig: 7), emerge into ‘containers of information’, signifying the materialized traces of its own ‘struggle for survival’<sup>5</sup>.

### SPATIAL SPECULATIONS:

The evolving architecture cites for the redefining of the contemporary ‘Homo Ludens’, in the evershifting reality, between the ubiquitous, invisible, cyber world and the apparent, material expression of nature. The profound, somatic memory of cave spatiality is re-inscribed (Fig: 8), through the merging of new materialities and the directed instrumentation of technological abundance. Furthermore, a series of atmospheric, spatial episodes and their true, real-time physical documentation, offers a revisiting of material as well as immaterial architectonic qualities, resonating values of architecture, rooting back as far in the past as Vitruvius’s ‘firmitas, utilitas, venustas’. And strangely enough, this transitional ability of design research to address issues of non-matter is ultimately paved by the study of sheer sulphuric matter.

---

<sup>5</sup> Newman W.R. (2004), *Promethean Ambitions: Alchemy and the Quest to Perfect Nature*, Chicago, University of Chicago Press

Figure 7  
Cave network  
system  
development

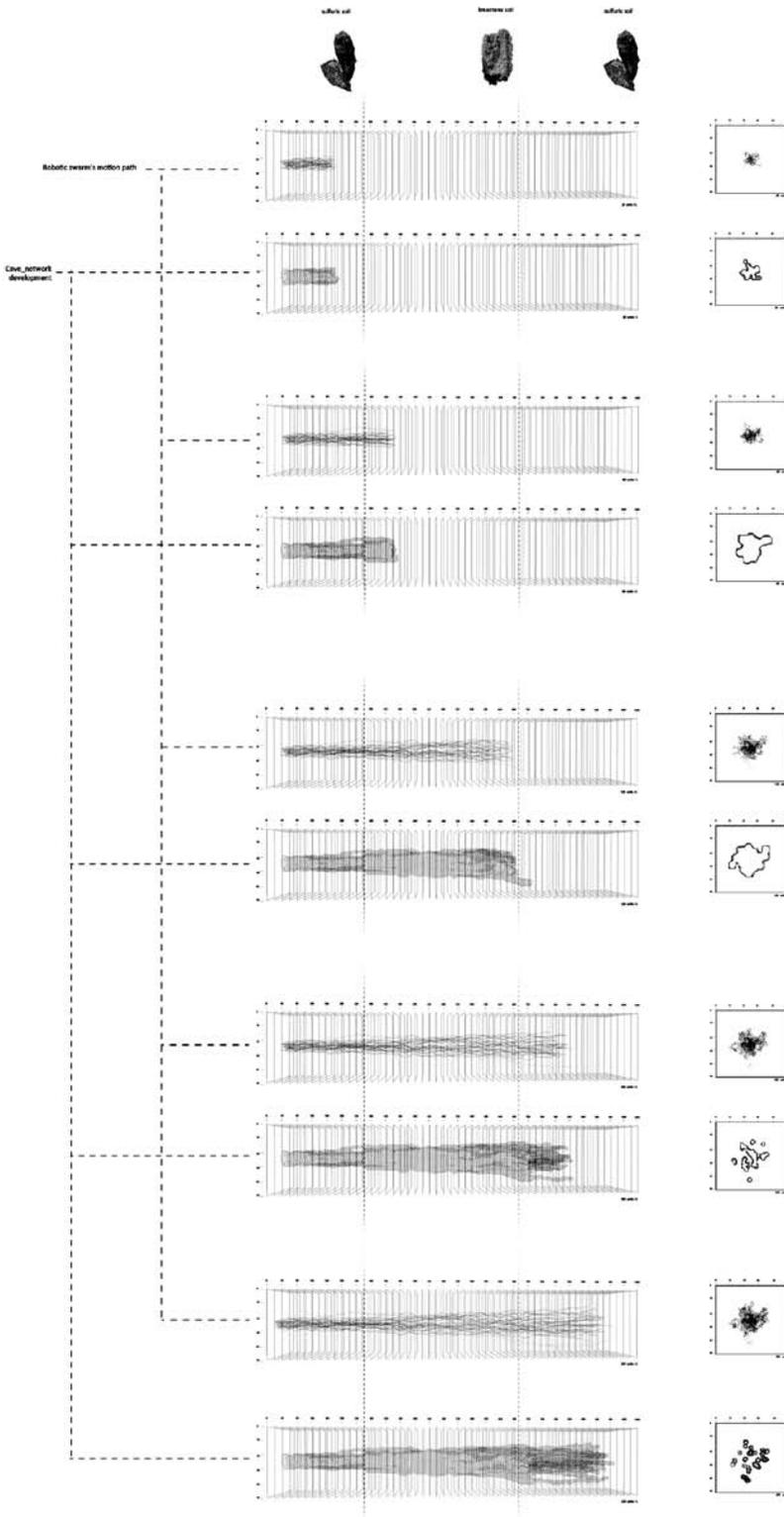
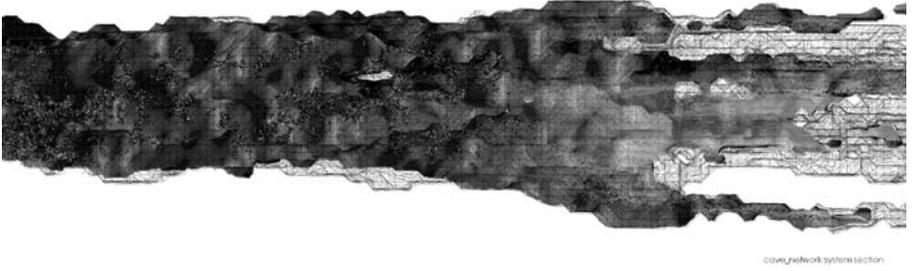


Figure 8  
Cave network  
system section



8

## REFERENCES

- Bensaude-Vincent B., Newman W. R. (2007), *The Artificial and The Natural - An Evolving Polarity*, Massachusetts, The MIT Press
- Gissen D. (2009), *Subnature - Architecture's other Environments*, New York, Princeton Architectural Press
- Meyer B. (1965), *Elemental Sulphur: Chemistry & Physics*, Interscience Publishers
- Newman W.R. (2004), *Promethean Ambitions: Alchemy and the Quest to Perfect Nature*, Chicago, University of Chicago Press
- Voss P. J., Werner M. L. (1999), *The Poetics of the Archive*, Atlanta, GA: Georgia State University



# CANOPEA® : DES NANOTOURS SOLAIRES INTÉGRÉES DANS UN ÉCO SYSTÈME URBAIN

RECHERCHE ET PÉDAGOGIE PLURIDISCIPLINAIRE  
INTER-ÉCOLES SUR L'HABITAT ET LA VILLE DE DEMAIN

BALAÏ OLIVIER<sup>1</sup>, ROLLET PASCAL<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CRESSON, UMR 1563 - France

<sup>2</sup>Labex AE&CC - France

## ABSTRACT

Canopea® est le résultat d'une recherche et pédagogie pluridisciplinaire inter-écoles sur l'habitat et la ville de demain. Cet article retrace les hypothèses de conception de nanotours solaires intégrées dans un éco système urbain. Elles se placent dans un champ de questionnements qui vise à relier recherche scientifique et réalisation pratique, enseignements techniques et sensibles, échelles urbaines et habiter individuel, théories, perceptions et mesures, approches de la ville durable par les matérialités constructives et ambiantales. Elles sont présentées ici par le Labex AE&CC et le laboratoire CRESSON, UMR CNRS 1563. L'article est porté par l'ENSAG, établissement qui accueille ces deux unités de recherche, et l'ENSAL, établissement partenaire de l'équipe « Team Rhône-Alpes » pour le Concours Solar Décathlon 2012<sup>1</sup> qui a donné naissance à Canopea®. Canopea® « Team Rhône-Alpes » propose à ses partenaires (labos et individus) une approche collaborative en préfiguration d'un Institut de recherche sur l'habitat et la ville de demain. L'équipe vient de gagner le Concours Solar Décathlon 2012 en remportant les prix Architecture, Confort, Fonctionnement domestique et Innovation.

Keywords : Architecture, Ambiances, Cultures constructives, Habitat solaire, enseignement polytechnique

**1** Le Solar Decathlon Europe est une compétition universitaire européenne basée sur les principes du Solar Decathlon créé en 2002 aux USA et qui fait concourir vingt universités internationales pour concevoir et réaliser un habitat d'une centaine de mètres carrés, entièrement autonome et fonctionnant exclusivement à l'énergie solaire. Les vingt prototypes, développés par des étudiants encadrés par des enseignants-chercheurs sur deux années, en partenariat avec des industriels et des entreprises, sont évalués au cours de dix épreuves. Ces épreuves examinent l'architecture, l'ingénierie, les performances énergétiques, les performances de maintien de conditions de confort prédéfinies, la qualité des ambiances (acoustique, lumineuses...) les performances en matières de services rendus par les équipements internes (four, réfrigérateur, congélateur, plaque de cuisson, lave-linge, lave-vaisselle, ordinateurs, TV et Hi-Fi), la qualité de la campagne de communication et de sensibilisation sociale, la qualité des études économiques et commerciales, les performances en matières de bilan écologique global (sustainability) et les aspects innovants du projet. Comme dans l'épreuve olympique du même nom, l'équipe qui obtient le plus de points sur les 1000 disponibles, remporte la compétition. Chacune des sous épreuves constitue un challenge doté d'un prix spécifique et d'une bonification définie au préalable par le comité d'organisation. Le premier SDE a eu lieu en juin 2010 à Madrid. Le prochain aura lieu en septembre 2012 à Madrid également. En 2010, l'ENSAG, l'INES et les Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau en partenariat avec Polytech'Savoie, GEM, le CSTB et l'Heig-VD, se sont classés 4<sup>e</sup> et ont remporté quatre prix en architecture, ingénierie, bilan énergétique et innovation. En 2012, Team Rhône-Alpes, composée des mêmes partenaires qu'en 2010, élargie à l'ENSAL, l'ENSEE (Grenoble Institut National Polytechnique), GEII (Université Joseph Fourier), l'Université Stendhal Grenoble 3, et au groupe Energie-Forel de l'UNIGE, a été retenue en 2011 pour concourir à nouveau. Le projet développé dans ce cadre constitue un des supports de l'expérimentation de recherche et de pédagogie.

La Team Rhône-Alpes a été créée en 2008 par l'Ecole nationale d'architecture de Grenoble (ENSAG), l'Institut national de l'énergie solaire (INES) et les Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau (GAIA) pour participer à la première édition du Solar Decathlon Europe 2010. Ayant remporté la 4<sup>e</sup> place avec son projet Armadillo Box<sup>®</sup>, l'équipe a depuis réuni nombres d'universités et d'écoles de la Région Rhône-Alpes afin de créer un véritable pôle d'excellence régional : Ecole nationale d'architecture de Lyon (ENSAL), Polytech' Annecy-Chambéry, Grenoble Ecole de management (GEM), Université Joseph Fourier (UJF), Université Stendhal, Ecole d'ingénieurs pour l'énergie, l'eau et l'environnement (ENSE3/INPG), Ecole d'ingénierie et de gestion du Canton de Vaud (Heigh-Vd), Université de Genève, Ecole nationale des travaux publics (ENTPE), Université de Troyes (UTT), Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) De même, plus de 75 partenaires publics et privés ont rendu possible cette victoire en apportant leur aide intellectuelle, matérielle et financière. Ce prix est donc le fruit de la collaboration de neuf établissements d'enseignement supérieurs et de certains de leurs laboratoires (AE&CC<sup>2</sup>, CRESSON<sup>3</sup>, GCB, G2ELab, LOCIE, LESBAT, groupe Energie-Forel) et/ou enseignants, membres des PRES Université de Grenoble et de Lyon.

## SITUATION DU SUJET

Nous proposons pour le Colloque *Matérialités Contemporaines* MC 2012 de présenter l'opération *Solar Decathlon Europe* pour ses applications architecturales et urbaines sur les sites de la presqu'île scientifique de Grenoble (projet GIANT) et de la résidence universitaire Jussieu à Villeurbanne (Plan campus de Lyon).

La prise de conscience effective des crises sociale, environnementale, financière et énergétique a initié, partout en Europe, de nouvelles approches des territoires et de leurs différentes échelles. Dans le domaine de l'habitat, ces réflexions se sont souvent incarnées dans des projets d'éco quartiers qui envisageaient la question de l'autonomie à l'échelle du bâtiment ou, au plus large, à l'échelle d'un quartier résidentiel s'apparentant plutôt à un lotissement autarcique<sup>4</sup>. Les avancées apportées par ces expériences sont certaines et ont permis l'amaçon d'une nouvelle culture urbaine basée sur de nouvelles références en matière de fabrication de la ville. Les enseignements qui en ont été tirés montrent toutefois qu'une nouvelle étape doit être franchie dans la conception urbaine. Il apparaît notamment aujourd'hui que la question énergétique globale ne pourra être résolue à la seule échelle du bâtiment et qu'une mise en connexion entre tous les composants d'un même tissu urbain doit être réalisée pour gérer de manière la plus intelligente possible les amplitudes des pics de consommation et de production en fonction des temporalités d'usage et des variations climatiques saisonnières. Comme le suggère Michel Péna<sup>5</sup>, une pensée de la ville envisagée comme un « éco système urbain » semble désormais indispensable. Dans cet éco système une *smartgrid* connectant toutes les constructions assure les transferts d'énergie nécessaires à l'équilibre de chacune, en fonction de ses besoins à un moment donné. La réflexion s'étend aux réseaux de transport et à la gestion de l'espace urbain public qui devient support de nombreux services partagés. Elle doit également s'étendre à l'architecture et aux formes urbaines.

**2** AE&CC est une unité de recherche du MCC, Ecole nationale supérieure d'architecture de Grenoble, regroupant les laboratoires CRAterre et Cultures Constructives. AE&CC est labélisée LABEX depuis mars 2011.

**3** CRESSON Centre de Recherche sur l'Espace Sonore et environnement urbain) fait parti d'une UMR CNRS 1563 « Ambiances Architecturales et Urbaines », Laboratoire MCC, Ecole nationale supérieure d'architecture de Grenoble. L'ENSA Lyon accueille trois chercheurs attachés à ce laboratoire, dont Olivier Balay.

**4** Malgré une programmation initiale mixte, le quartier Bedzed à Londres est devenu un lotissement exclusivement résidentiel autonome d'une centaine de logements. La première tranche du quartier Vauban à Fribourg est un ensemble un peu plus conséquent regroupant 220 logements alternatifs, 600 logements pour étudiants et quelques équipements. La caserne de Bonne à Grenoble est un quartier introduisant une certaine mixité fonctionnelle, mais qui reste un ensemble indépendant du tissu urbain qui l'entoure.

**5** Michel Péna. « La fabrique du paysage » in *Paysages Actualités*. Paris. Hors série mars 2011. Exposition « La ville fertile, vers une nature urbaine ». Cité de l'Architecture et du Patrimoine.

Figure 1  
Canopea® : des  
nanotours dans  
un éco système  
urbain. Simulation  
sur un îlot urbain  
à Grenoble.  
(Ch. De Tricaud,  
A.Messa, PFE  
A&CC juin 2011)



1

## QUESTIONS

Dans ce contexte, l'habitat, au cœur de nos préoccupations, s'envisage aujourd'hui dans une densité qui rend possible la proximité du voisin et la multiplicité des services, qui soit compatible avec l'efficacité de la mutualisation des moyens, la rationalisation des investissements dans les réseaux et la garantie d'une qualité de vie, notamment dans son rapport avec la nature et les espaces partagés.

Quelle densité est alors vraiment tolérable ? Quelles formes urbaines sont adaptées à cette densité ? Quels types architecturaux permettent une intégration dans l'écosystème de manière à maximiser les performances tout en préservant la mixité sociale, l'accès équitable aux services et l'intimité des individus ? Quelles sont les bonnes distances perceptives avec autrui ? Quelles matières et matériaux sont utilisables pour atteindre les niveaux de performances envisagés tout en participant à la création d'ambiances stimulantes et appropriées aux usages ? Quelle présence symbolique et quel rôle climatique, sonore, visuel le végétal doit-il remplir dans cet environnement construit ? Quels systèmes constructifs et quelle organisation de chantier sont les plus adaptés pour réaliser ces assemblages complexes tout en restant économiquement compatibles avec les moyens du plus grand nombre ? Quels dispositifs d'aide peut-on envisager pour permettre aux plus démunis d'accéder à ces logements afin de satisfaire ce droit élémentaire qu'est celui de l'abri ? Toutes ces questions orientent de manière fondamentale notre proposition qui, globalement, interroge l'avenir des milieux de vie des établissements humains.

## HYPOTHÈSES

Les hypothèses, qui intéressent autant la recherche que les modes pédagogiques que nous entreprenons avec nos étudiants de deuxième année de Master (ENSAG/ENSAL, ENSEE, GEII, Polytech' Annecy-Chambéry, GEM, Université Stendhal), sont les suivantes :

1/ Le modèle d'habitat qui a la préférence de 86% des français, la maison individuelle, n'est pas compatible avec la concentration de 70% de la population de notre pays dans les villes. Pourtant, un grand nombre des qualités spatiales qui s'y attachent (360° de liberté périphérique, des rapports de voisinage parfois efficaces, des prolongements extérieurs, l'existence de dépendances,...) peuvent être conservées et intégrées dans une architecture urbaine dense.

2/ La densité verticale n'est spatialement et économiquement viable que sous une forme soit de « monades urbaines » gigantesques, soit de « nanotours » à taille humaines. En restant inférieure à la gamme des immeubles de grande hauteur (IGH) c'est-à-dire des constructions dont le dernier plancher est à moins de 28m du sol, on peut réaliser des petites tours – des nanotours – composées de « maisons » empilées sur une dizaine d'étages qui présentent nombre des avantages de l'habitat individuel tout en partageant le terrain d'implantation. Le modèle de la nanotour est une réponse possible à la question de la densification verticale à taille humaine. Il ne s'agit cependant pas d'un modèle applicable de façon systématique, mais d'une solution contextuelle adaptée à certaines configurations urbaines spécifiques. Dans le cadre d'une réhabilitation, d'un ensemble des années 1960 par exemple, la nanotour peut être un moyen de densifier un site en apportant des énergies vivace et solaire au contexte social existant.

3/ Un ensemble de nanotours comporte des espaces servants constituant des dépendances ou des annexes partagées entre tous les habitants. Ces espaces servants donnent le sentiment de logements plus grand et assurent des fonctions communes complémentaires. Des coursives et des distributions verticales extérieures dotées de bacs de plantation<sup>6</sup> peuvent constituer des zones de rangement et des potagers verticaux. Le dernier étage de chaque nanotour aménagé en belvédère<sup>7</sup> et comportant une buanderie, un « soleillor<sup>8</sup> », une cuisine d'été, un barbecue, fournit un espace commun supplémentaire abrité où peuvent jouer les jeunes enfants et se retrouver les co-habitants à l'occasion d'événements festifs qui contribuent au développement de l'esprit de voisinage et de solidarité. On peut aussi y grimper pour échapper à l'ambiance domestique privée.

4/ Dans les niveaux inférieurs, la nanotour peut intégrer des petits équipements, des commerces, des bureaux ou des locaux d'activité qui composent une mixité urbaine productrice de diversité capable de réduire les contraintes de déplacement pour certains habitants. Elle assure également les échanges avec des moyens de transports individuels comme les vélos ou des véhicules électriques partagés.

5/ La nanotour peut être réalisée à partir d'un système constructif basé sur une préfabrication de modules d'habitat permettant de réduire les coûts de montage et d'augmenter le contrôle de la qualité de la construction qui constitue une donnée critique pour la réalisation de bâtiments à hautes performances énergétiques dans le contexte professionnel français actuel.

6/ Les espaces d'habitation de la nanotour sont pensés de manière à intégrer une forte capacité d'évolution dans le temps pour répondre aux adaptations les plus diverses des modes de vie des habitants. Le débord de la coursive tempère l'impact sonore des voisins du dessus et du dessous, rendant celle-ci mieux appropriable. La véranda devant le salon a un rôle thermique et plusieurs efficacités acoustiques, aux choix de l'habitant. La possibilité de compléter un logement par une partie du logement supérieur ou inférieur

<sup>6</sup> Comme par exemple le système COURTIREY® qui permet une agriculture urbaine biologique intensive.

<sup>7</sup> Les français en raffolent dit-on (Gritti J. Les contenus culturels du Guide Bleu Communications 10, 1967 pp. 51-64.)

De haut les gens qui se déplacent sont observables, à distance, situation qui est un des fondements pour composer des lieux appropriables dans l'espace public (Cf. The social life of small urban spaces, un film de William H. Whyte, 1979, accessible sur le net)

<sup>8</sup> Comble ventilé utilisé pour le séchage du linge à l'air libre dans la région dauphinoise

Figure 2  
Canopea® : des  
nanotours dans  
un éco système  
urbain. Simulation  
sur un îlot urbain  
à Grenoble.  
(Ch. De Tricaud,  
A.Messa, PFE  
A&CC juin 2011)



2

est laissée ouverte. La possibilité d'ajouts de modules constituant autant de petits logements (studio pour adolescent, personne âgée ou sous-location à des étudiants) le long des circulations est également envisageable.

Ces hypothèses ont amené l'équipe à développer le concept « **Canopea®** », nanotour solaire regroupant verticalement une dizaine de logements inscrits dans un écosystème urbain avec lequel elle entretient une série d'échanges de flux et de services, disposant de systèmes techniques actifs de maintien du confort thermique et proposant des espaces de vie pouvant permettre à l'habitant de régler les perceptions du voisinage et favoriser l'appropriation.

Le prototype d'un logement du dernier étage de la nanotour, surmonté d'un espace commun partagé aménagé sous la canopée de panneaux photovoltaïques biverres formant comme le feuillage d'un grand arbre, a été réalisé aux Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau, puis monté à Madrid pour participer à la compétition internationale de septembre 2012. Canopea vient de gagner le Concours Solar Décathlon 2012 en remportant les prix architecture, confort, fonctionnement domestique et innovation.

## TERRAINS D'ÉTUDE ET D'INVESTIGATION

Notre proposition s'appuie sur la déclinaison du concept Canopea® sur deux territoires spécifiques constituant des lieux d'applications possibles des principes d'organisation architecturale et urbaine décrits ci-dessus :

Dans le cadre du projet GIANT (Grenoble Innovations for Advanced New Technologies), sur la presqu'île scientifique de Grenoble, en face du campus du CEA et de MINATEC, Christian de Portzamparc développe un plan urbain basé sur les principes de l'îlot ouvert et de la ville de l'âge III. Après la Caserne de Bonne, la Ville de Grenoble souhaite poursuivre ses expérimentations en matière d'urbanisme durable et souhaite développer



**Figure 3**  
Canopea® : des nanotours dans un éco système urbain. Simulation sur un îlot urbain à Grenoble.  
(Ch. De Tricaud, A.Messa, PFE AA&CC juin 2011).

3



**Figure 4**  
CROUS Lyon/ Saint-Etienne. Canopea® Vap, Réhabilitation de la barre D de l'îlot Jussieu à Villeurbanne (en transparence l'emplacement de la nanotour de service devant le pignon de l'immeuble, Maud Bouhin, PFE AA&CC juin 2012)

4

un éco-quartier de seconde génération. Deux îlots de logements (Cambridge et Oxford) sont d'ors et déjà en phase de consultation pour des groupements promoteurs/concepteurs. Notre proposition se développe sur un site programmé en deuxième phase d'aménagement de ce nouveau quartier. La Ville de Grenoble envisage la possibilité de pousser l'expérience jusqu'à une expérimentation en grandeur réelle pour tester le concept des nanotours avec des habitants. L'application **Canopea® GIANT** constitue une déclinaison du projet Canopea® en réalisation neuve intégrée dans un écosystème urbain. L'objectif est de tester un gradient de moyenne densité allant de 100 à 200 logements/ha. Ce projet a été développé dans le cadre des enseignements du domaine d'étude de master commun ENSAG/ENSAL intitulé *Architecture, Ambiances et Cultures Constructives (AA&CC)* à Lyon, *Architecture et Cultures Constructives (A&CC)* à Grenoble, en 2011-2012. Une nouvelle application a été proposée sur le site du « Carré de soie » à Villeurbanne.

Figure 5  
Nanotours  
d'étudiant, site  
de Jussieu,  
CROUS Lyon/  
Saint-Etienne.  
Simulation pour la  
densification de la  
cité universitaire à  
Villeurbanne dans  
le Rhône  
(M. Lucia D'Alessio,  
F. Declaveillère,  
Yza Hunsinger,  
PFE AA&CC juin  
2012)



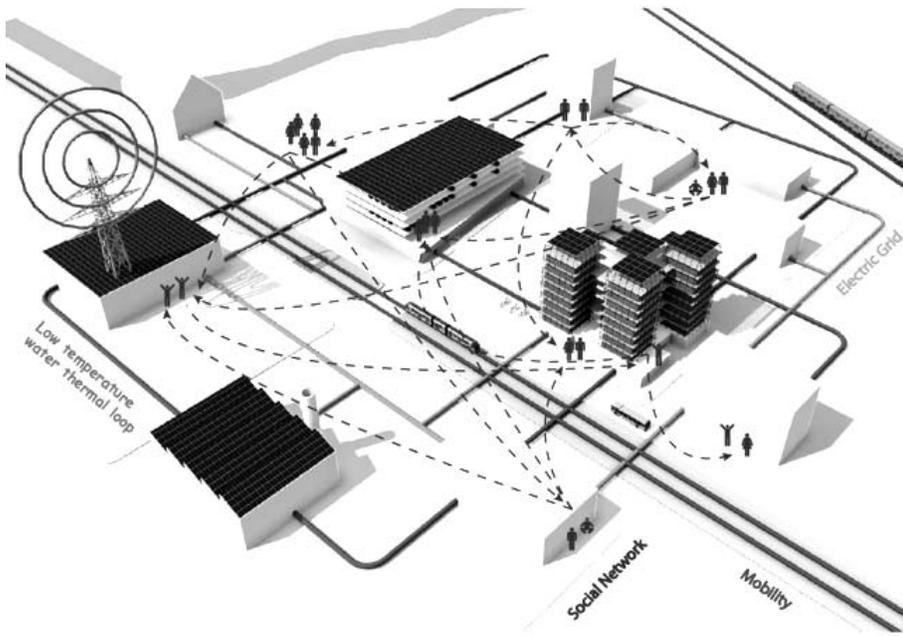
5

La résidence d'étudiants Jussieu, située en face du campus de Lyon Tech/La Doua constitue un territoire de densification dans le cadre du plan campus du PRES Universités de Lyon. La déclinaison du projet Canopea® sous la forme du programme **Canopea® VAP** (Volume d'Air Partagé) prend place dans le contexte d'un grand ensemble réalisé dans les années soixante-dix. Elle pose la question de la réhabilitation des constructions modernistes et de l'intervention en milieu urbain habité. Le projet a été validé par le CROUS de Lyon-St Etienne sous la forme d'une nanotour de service (cuisines, salle à manger) insérée à l'extrémité d'une des barres de logements existants, de l'ajout de modules d'habitat étudiants et d'un soleilloir en superstructure, du réaménagement des niveaux inférieurs en logements offerts à la colocation. Cette proposition constitue un prolongement naturel des recherches menées dans le cadre du programme AGE 2010 par la composante CRESSON de l'équipe, et des travaux développés dans le cadre des enseignements du domaine d'étude de master commun ENSAG/ENSAL intitulé *Architecture, Ambiances et Cultures Constructives (AA&CC)* à Lyon, *Architecture et Cultures Constructives (A&CC)* à Grenoble en 2011 et 2012. Le projet aboutira au financement de la réhabilitation complète de la barre de logements, avec la construction de la nanotour, par le CROUS en 2014/2015. Une première étape a déjà été franchie pour **Canopea® VAP** à travers la modification du PLU de Villeurbanne pour augmenter la densité.

## PERSPECTIVES EN TERMES DE PRODUCTION GÉNÉRALE DES CONNAISSANCES

SDE 2012 Canopéa offre des perspectives de production de connaissances dans les domaines suivants :

1/ Avancée des connaissances dans le domaine des configurations architecturales et urbaines adaptées aux évolutions requises par le Grenelle de l'environnement (BEPOS), par la demande sociale (logements économiques, logements évolutifs) et par les connaissances dans les domaines du juridique et de la culture sensible de la gestion des espaces partagés, des proximités de voisinage et de la mixité des fonctions sur une même



6

parcelle (co-propriété, co-locations, division en volumes). Ces avancées intéressent la Ville de Grenoble, l'OPAC 69 et le CROUS Lyon Saint-Etienne, avec les partenaires du projet spécialisés dans la maîtrise d'ouvrage (Bouygues Immobilier) les chercheurs et les étudiants des écoles d'architecture et de Polytech'Annecy-Chambéry et de GEM.

2/ Définition d'un concept de fonctionnement technique actif de bâtiment intégré dans une *smartgrid* à l'échelle urbaine, en liaison avec les partenaires industriels spécialisés dans la production, la gestion et l'utilisation de l'énergie à l'échelle de l'habitat et dans le cadre des recherches de convergence entre habitat et transport (Total, Schneider Electric, Philips, Peugeot, Renault ou Toyota) les chercheurs et les étudiants des écoles d'architecture ENSAG/ENSAL, de GEII et de l'ENSEE, avec le soutien des chercheurs de l'INES, de l'INPG et de G2ELab.

3/ Définition de systèmes techniques actifs de maintien du confort (ventilation, chauffage, rafraîchissement) en corrélation étroite avec des systèmes passifs économes en énergie (déphaseurs, murs en terre) et/ou de consommation directe des EnR (motorisation des protections solaires alimentées en 12 et 24V depuis stockage tampon de batteries rechargées directement par les PV...). En collaboration avec les industriels partenaires de ce domaine (Tenesol, Schneider Electric, Nilan, Bubbendorff, Somfy) les chercheurs et les étudiants des écoles d'architecture, de Polytech'Annecy-Chambéry, de GEII et d'ENSEE, avec le soutien des chercheurs de l'INES, du CSTB et du groupe Energie-Forel de l'UNIGE.

4/ Expérimentation de systèmes constructifs en terre (CRAterre) innovants et de dispositifs architecturaux efficaces pour la modulation acoustique (CRESSON) dont pourront bénéficier les habitants, en collaboration avec les industriels partenaires (CSTB Grenoble), les chercheurs et les étudiants des écoles d'architecture et de Polytech'Annecy-Chambéry, le BET Thermibel.

Figure 7  
Coupe urbaine montrant les niveaux sonores prévisibles sur le site de Grenoble.



7

5/ Avancée des connaissances dans le domaine des équipements électro ménagers et de l'amélioration de leurs utilisation au moyen d'interfaces de pilotage (tablette tactile) ou d'interfaces opportunistes (bras de projection robotisé intelligent). En collaboration avec les laboratoires de recherche prospective dans ce domaine (CEA-LETI, Dasein, VESTA System), les chercheurs et les étudiants des écoles d'architecture et de l'ENSEE.

6/ Enfin, les retours du grand public réagissant lors des visites du prototype à Madrid, comme à l'INES, constitueront une base de données sur la perception des espaces proposés. Un enregistrement de ces données est prévu sous la forme de questionnaires récoltés pendant les visites lors de la compétition.

## **OBJECTIFS EN TERMES D'INNOVATION PÉDAGOGIQUE ET D'EXPÉRIMENTATION PROJECTUELLE**

Dès 2010, notre participation à la compétition *Solar Decathlon Europe* a été motivée par le besoin ressenti depuis plusieurs années de changer les modalités d'enseignement de la conduite d'un projet architectural et urbain. Commencée dans les années 2000 avec la mise en place d'un enseignement basé sur l'expérimentation en grandeur réelle grâce, notamment, à l'outil des Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau, cette évolution est sous-tendue par l'objectif de création (re-création ?) d'un enseignement polytechnique transdisciplinaire de l'architecture et de la conception de la ville adapté aux enjeux du développement durable et associant l'approche ingénierie et le soin de la nature<sup>9</sup>, la matériaux pour construire avec les sensations paysagères.

Dans notre pays, la fragmentation des compétences en matière d'aménagement de l'espace, des milieux de vie et la séparation de leur enseignement, sont une barrière sérieuse au changement de paradigme indispensable pour réussir les mutations culturelles et sociétales qui conditionnent la mise en place d'un développement durable effectif dans le domaine de l'habitat et de la ville. La prise en compte, dès le début du processus de conception, de l'ensemble des paramètres perceptifs, sociaux, géophysiques, techniques, historiques et politiques qui influent sur la composition architecturale et urbaine est désormais reconnue comme incontournable par tous les acteurs de la production du cadre bâti. L'association de tous les acteurs de la chaîne de production de l'habitat,

<sup>9</sup> Watsuji Tetsurô, *Fûdo, le milieu humain*, traduction et commentaire par Augustin Berque, édition CNRS janvier 2011.

des concepteurs aux entrepreneurs, des industriels aux chercheurs sans oublier les financeurs et les donneurs d'ordres, autour d'un même objet d'étude est une nécessité pour fédérer tous les efforts et coordonner les actions afin d'éviter la dispersion et la multiplication d'initiatives redondantes. La manière d'opérer cette intégration est cependant loin d'être énoncée de façon intelligible et transmissible. Des méthodes de management de projets collaboratifs existent, notamment dans le domaine de l'industrie, mais ne peuvent être simplement transposées dans celui de la conception architecturale et urbaine du fait de la complexité et de l'hétérogénéité des paramètres à prendre en compte. La notion de R&D en architecture, longtemps rejetée par les architectes eux-mêmes, apparaît comme valide mais demande à être précisée.

L'expérimentation projectuelle proposée ici réside dans l'établissement d'une pratique collaborative basée sur des groupes de travail spécialisés, pluridisciplinaires afin de créer une culture commune autour d'un projet d'habitat. L'innovation pédagogique vise à construire une méthode de conception architecturale partagée, énonçable et reproductible dans des situations locales différentes.

## **OBJECTIFS EN MATIÈRE DE RÉFLEXION ÉPISTÉMOLOGIQUE ET DE CONSTRUCTION THÉORIQUE**

Prise séparément, l'approche privilégiée par chacun des différents membres de l'équipe pédagogique est orientée vers une maîtrise approfondie mais partielle d'un pan de l'habiter, en ville, demain. Qu'elle soit de manière prépondérante technologique, énergétique ou environnementale, pour les ingénieurs ; ou spatiale, formelle, matérielle, perceptive, sociale, ambiante et historique pour les architectes ; ou encore juridique, financière, relationnelle et politique pour les managers et commerciaux ; ces approches ont toutes droit de cité et décrivent un aspect de la problématique dont elles recomposent une image complète quand elles sont considérées toutes ensemble.

De fait, dépasser les attitudes orientées sur la seule maîtrise partielle d'un de ces aspects est indispensable pour replacer au cœur du projet architectural et urbain, la question culturelle ; c'est-à-dire la façon dont l'homme donne du sens au monde qui l'environne et se donne du sens en rapport avec les autres. Cette question en rejoint une autre posée par Peter Sloterdijk dans son livre *Ecumes*. Comment peut-on encore penser la possibilité de ce qu'on appelle la société « *si la phrase Chacun est une île est presque devenue vraie pour la majorité de la population dans les grandes villes modernes* » ? (...) *Quelque soit l'insularité des individus, qui ont leur manière de s'installer chez eux, il s'agit toujours d'îles co-isolées et rattachées au réseau, qui doivent être associées de manière momentanée ou chronique avec des îles voisines pour former des structures de moyenne et de grande tailles – pour une convention nationale, une love Parade, un club, une loge de franc-maçon, le personnel d'une entreprise, une assemblée d'actionnaires, le public d'une salle de concert, un voisinage suburbain, une classe d'école, une communauté religieuse, une foule d'automobilistes coincés dans un bouchon, un congrès d'union de contribuables. (...)* Nous décrivons ces ensembles comme des écumes.<sup>10</sup> »

Pour penser l'architecture et la ville de demain, nous devons donc accepter l'immense défi de « penser les écumes », sans privilégier aucun des domaines de connaissance délimités qui prennent l'habitat comme objet d'étude, mais, sans jamais en laisser un de côté... Cette démarche pourrait bien nous permettre de construire aujourd'hui une nouvelle approche synthétique qui donne à chacun sa place dans un processus complexe et prépare une passation efficace des connaissances acquises aux générations qui nous suivent. Il nous paraît en effet indispensable de construire aujourd'hui une structure de formation et de

<sup>10</sup> *Ecumes*, Sphères III, Hachette Littérature, octobre 2006, Collection Pluriel Philosophie, p. 535

recherche performante, curieuse, et innovante qui arme nos élèves et nos doctorants pour l'avenir et ne les laisse pas démunis face aux réalités de la mondialisation ni face à la concurrence d'autres professionnels, censément mieux formés. L'enjeu épistémologique et la construction théorique de cette recherche rejoignent ici directement l'autonomie économique et culturelle.



**MATIÈRE  
PHYSIQUE**

**-**

**PHYSICAL  
MATERIAL**



# ACTIVE ETFE FAÇADE SYSTEMS

**GERNOT RIETHER**

Georgia Institute of Technology - USA

## **ABSTRACT**

This paper will build on an investigation in ETFE (ethylene tetrafluoroethylene) and a research on ETFE pillow systems to develop adaptive and dynamic building envelopes. In particular the paper will highlight strategies for a lightweight, active building envelope that can adapt to changing temperature and daylight. To do that the paper will give an overview of a series of studies that present possible approaches for active ETFE envelopes that have been an outcome of a seminar at the School of Architecture at the Georgia Institute of Technology in spring semester of 2012.

## **INTRODUCTION**

As Susan Freinkel notes in her article “Plastic: too good to throw away,” recently published in the New York Times, the problem isn’t the plastic, but the way we use it. The material is too valuable to be wasted on cheap junk, but should be reserved for the things that can best take advantage of its properties. At the School of Architecture at the Georgia Institute of Technology we have been experimenting for a while with possibilities to introduce recycled plastics and bio-plastics in architecture. And within the wide range of plastics, it is ETFE in particular that is currently enjoying fame for a revival of plastics in architecture. A closer look reveals that the material only informs a very few types of architectural systems such as ETFE pillow systems.

This project started with an investigation in inflatable fabric engineering and pneumatic structures in architecture. A pneumatic structure is a self form-finding structure. More specifically, it is defined as a structural system consisting of a ductile envelope that is capable of supporting tensile stress that is internally pressurized. Since it is supported by air, it is the lightest of all existing constructions. It constantly rearranges itself into the most minimal optimum. Pneumatic structures in nature are structural systems that are usually soft and active. For instance, in the case of packed soap bubbles the surface of soap between the bubbles changes from rounded to flat due to the forces of adjacent volumes of bubbles balancing one another. The volume of air of the bubbles compresses the soap, making it tighter and stronger. Pneumatic systems became popular in architecture in the 1960s. In 1959, Frei Otto made a series of study models of pneumatic structures, such as a festival hall, a theater and large greenhouses (Figure 1). His US pavilion at the EXPO 1970 in Osaka is another well-known example of an application of these principals in architecture as air-supported structures. These examples show that a building envelope of networked pillows could be developed that, as opposed to relying on a steel frame, uses air pressure to stabilize itself structurally.

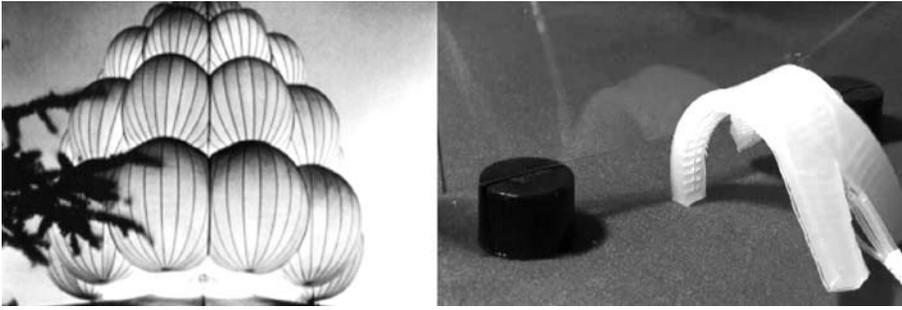


Figure 1  
Frei Otto, studies  
of pneumatic  
structures (left),  
a "soft robot" at  
Harvard University  
(right)

1

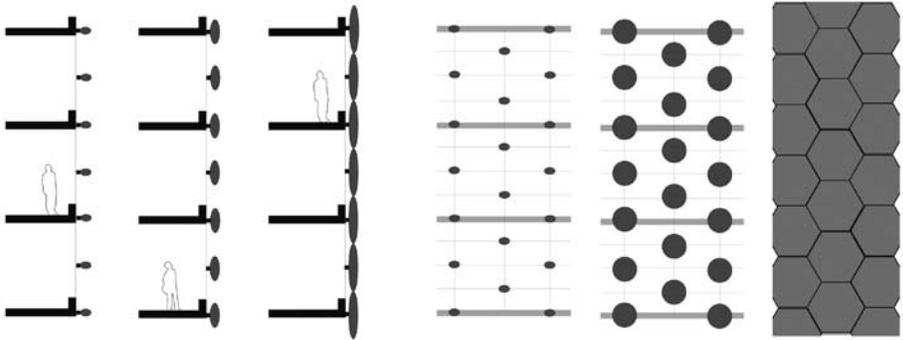
Inflatable fabric engineering is a technology used in the development of "soft robots." (figure 1) An air-powered robot that can lift 120 times its own weight was recently developed at Harvard University. This project is an example of a system that takes advantage of a change in structural performance based on the size of its cells and the state of inflation.

Comparing pillow systems to natural systems and responding to the outcome of a research in soft robots would further suggest a capacity of pillow system to change in relation to environmental conditions, such as temperature and sunlight. This approach inspired a whole new spectrum of thinking about moving building components that can dynamically regulate light and solar gain, ventilation and airflow. The paper will present a variety of approaches for such dynamic and movable architectural systems that provide large performance benefits.

## ETFE

ETFE (ethylene tetrafluoroethylene) is a polymer that has a high strength, a high melting point and excellent chemical resistance properties. The material was introduced to architecture in the late 1980s. At a large scale the material has been used as pillow system in combination with lightweight steel structures for building envelopes. Jae Baldwin's ETFE "Pillow Dome" system was realized at the Eden project by Nicholas Grimshaw in 2001. Compared to glass ETFE is 1% the weight, transmits more light and costs 24% to 70% less to install. ETFE can carry 400 times its weight and can span 30 feet or more without additional support. By adding additives and engineering its properties the material can be advanced to increase light transmission, durability, self-cleaning properties, insulation properties and fire resistance. This has allowed for large-scale architectural applications over the past 10 years. ETFE pillow systems were used for the building envelop of the Allianz Arena in Munich by Herzog and De Meuron, completed in 2005, and the Water Cube, the National Aquatics Center in Beijing by PTW architects, completed 2008. These applications of ETFE pillow systems present the capacity of the material as environmentally friendly lightweight building envelope. The system is usually built from two components: a steel frame and ETFE pillows used as an infill or cladding. This paper will study and speculate with applications utilizing dynamic qualities in pillow systems that have in its current form of application not fully been explored. Learning from dynamic systems in nature these explorations will to large degree be inspired from systems found in biology. Consulting with X from the School of Biology at X we have investigated in hydrostatic skeletons and ejection systems that can expand and retract. We then used these principals to question the tectonics of existing architectural systems and provide ideas that promote a more environmentally responsive architecture by utilizing

Figure 2  
Inflatable pillows  
as shading device  
in front of an  
existing curtain  
wall



2

dynamic properties of ETFE. ETFE can be engineered to combine high resilience, large strains and low stiffness that would provide a characteristic known from rubber-like materials. One of the main properties of ETFE is its high capacity in being deformed, without structural consequence that is an inherent property of elasticity, or the ability to deform reversibly without loss of energy and the ability to deform with little force. ETFE can therefore be used to create systems of pillows that use air pressure to stabilize themselves structurally to a certain degree.

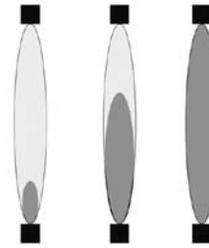
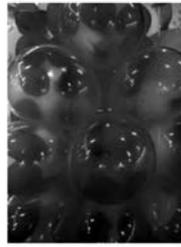
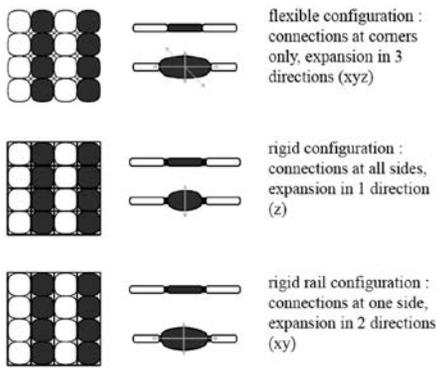
Applying ETFE as an active, movable, or transformable building envelop might therefore question the relation between structure and envelope and inform new systems for building envelopes which might expand to include systems to retrofit existing buildings with more efficient envelopes. Building on ETFE's advantages we experimented with a building envelop system that, different to the existing pillow systems are able to adapt to changing environmental conditions of temperature and daylight.

The questions for this research included: How can ETFE be targeted towards different environmentally friendly building envelopes? How can the characteristics of ETFE be used to generate active building envelopes? How can these active building envelopes adapt to environment conditions such as fluctuations in temperature?

## A TEMPORARILY SELF-SHADING FACADE:

Research Project 1: A series of black pillows were arranged within a rigid framework. (figure 2) Depending on the degree of inflation, the size of gaps between the pillows could vary allowing the façade to open and close, self-shade, or even reflect light into the space depending on different external conditions. This idea was tested by a series of party balloons assembled in a grid formation. Deflated, the series of small black balloons left large voids between them. Air and light could pass between the layer of balloons. The black balloons then absorbed heat and expanded in size until they all touched each other. The gaps between the balloons shrank until they formed a continuous and protective envelope that blocked air and light.

Research Project 2: Similar to project 1 black pillows were arranged in a pattern. This time with transparent pillows filling up the void in between to create an enclosure, see figure 3. The equally inflated pillows were exposed to the sunlight. The black pillows inflated and extruded perpendicular to the building envelope. The thickened layer of pillows self shaded. Such a shading system might be developed into a self-supported system that can be attached to an external façade or inform a system that is incorporated between two rigid and transparent layers. Depending on the support type the pillows will expand and contract differently. Figure 2 shows a system that supports each pillow at one point.



**Figure 3**  
A difference in the relation of pillow and support system results in a different expansion and performance of the system.

**Figure 4**  
Photograph of study model and section of nested pillow systems

3

Figure 3 compares three different configurations: a pillow fixed at its corners, pillows nested between rails and pillows nested in cages. Each configuration allows the pillows to expand in different ways. Supporting the pillow at points allows it to expand in three directions, nesting the pillows between rails allows it to expand in two directions and nesting it within a cage allows it to expand in one direction.

**Research Project 3:** A two-layered pillow (figure 4) was developed: Transparent pillows connect to one another, forming a permanent envelope. A second black pillow was nested within each transparent pillow. Absorbing heat the black pillow inflated and deflated based on environmental conditions.

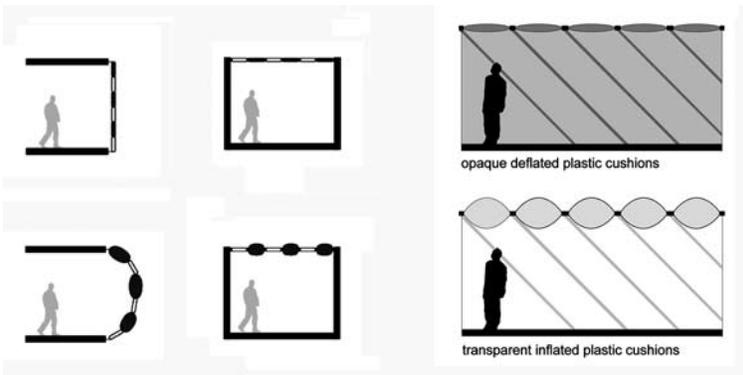
Such a system would be able to self-shade or block direct sunlight when needed. Instead of creating an additional system as another layer, this strategy took advantage of the poché space that is created by the pillows and started nesting other pillow systems within it. This approach might inform a façade system similar to the façade of the Allianz Arena or the Water Cube, two projects discussed earlier, also it would suggest a more dynamic use of the pillow itself and its material properties.

**Research Project 4:** Fixating a surface made from individual pillows that can enlarge in volumes might cause folds in the façade as shown in figure 5. Such a transformation of the façade caused by a decreasing or increasing of the surface area of an envelope could be controlled by point supports or a system of rails that would allow the façade to “breathe” and change in form. The pillow system might also be folded in a deflated state and unfold in an inflated state similar to the stomach of a balloon fish. The balloon fish or Tetraodontidae fills its extremely elastic stomach with water (or air when outside the water) until it is much larger and almost spherical in shape. The fish is using this as a backup defense mechanism. Applying these principals to a façade might mean a temporary shading device or changing degrees of transparencies or views.

## A FAÇADE AS COOLING SYSTEM:

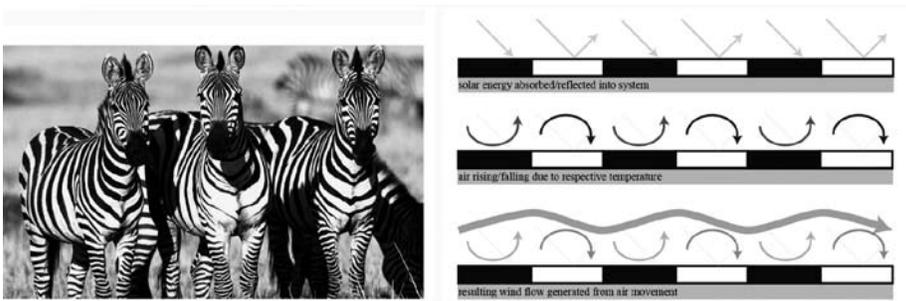
**Research Project 5:** Similar to the second investigation black pillows were spaced to leave gaps in between. Once the pillows were inflated, caused through increasing temperature the gaps closed. The air in the narrow space between the layer of pillows and the existing façade would heat up and rise. This temporary chimney effect can be used to drive a passive ventilation system in order to cool a building.

**Figure 5**  
System of black and white pillows (left), system of pillows that once inflated change from translucent to transparent (right)



5

**Figure 6**  
Zebra stripes as a passive cooling system.

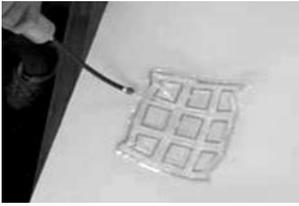


6

**Research Project 6:** Developing a pattern from the black and white pillows might be used to generate airflow along the envelope of the building. This investigation was inspired by the thermal properties of zebra skin. (Figure 6) The black stripes absorb heat from the sun, thus forcing the air around it to heat up and then rise. The white stripes act in the opposite manner, by reflecting heat from the sun air cools and then falls. By alternating these two thermal actions over an extended swathe of skin, a cooling system could be formed through the generation of airflow. In several studies lightweight ETFE panels were arranged to test different configurations that altered between black and white pillows. Filled with a gas that expands greatly when heated, the black and white pillows might expand differently which would affect the wind flow along the surface.

### **A FAÇADE THAT CHANGES IN TRANSPARENCY:**

Pillows can also be developed from a material that is opaque when it is deflated and transparent when inflated. This effect can be achieved easily by using a material that is thinning out. Such systems might replace louver systems or being used in skylights. The elasticity that can be achieved with ETFE can be in that way used to generate a system that with a minimum amount of energy can change in transparency. The individual pillows might be held in place by a steel frame that would allow each pillow to expand perpendicular to the façade, see figure 5.



**Figure 7**  
Concept model for  
a building envelope  
developed from  
a network of  
pressure chambers.

7

## **A FAÇADE AS A NETWORK OF PRESSURE CHAMBERS:**

A series of experiments used the laser cutter to melt two layers of plastic together to create different patterns of air channels. Once inflated the air channels caused different surface transformations. These effects were used to develop a movable façade system. Developing the surface from a continuous plane rather than individual pillows allowed to develop the effects that were achieved with individual pillows into a network of chambers. The different systems that were discussed previously might be combined into a complex pressure system to inform a building envelope that is able to respond to multiple and different situations. Such a ductile envelope can operate similar to internally pressurized soft and active systems found in nature. From natural systems we learned that hydrostatic skeletons provide support through a different distribution of liquids in a network of cavities. Muscles in nature for instance not only produce movement but also provide a unique form of skeletal support. This principle is shared by remarkably diverse organs such as the elephant's trunk, the octopus or the human tongue. By networking pillows on different facades of the building the envelope of a building as a whole might also start to respond as a dynamic network to different environmental conditions. The volume of air within a system that can be directed, increased or decreased which might be used to control inflatable parts of the system at different degrees to rearrange in order to self-shade, open or close.

## **CONCLUSION**

The paper makes an argument and provides strategies for lightweight dynamic façades as an environmentally friendly approach to building envelopes. A series of investigations show how ETFE, a still fairly new material to architecture, can be extended and how the advantages of lightweight cushion systems can be used to inform an active building envelop. The ideas laid out in this paper are meant to serve as a basis for further investigations in flexible façade systems that are adaptive to changing environmental conditions such as daylight or temperature which would also change the qualities of architectural space. Such systems might inform permanent building envelopes or a single or multiple layers of building envelopes. Due to its lightweight nature such systems might also be developed for being attached to pre existing structures and be used to retrofit buildings with envelops that allow for saving energy as active cooling or shading systems.

# LE BÉTON « À LA CARTE » : PERTE D'IDENTITÉ OU MATÉRIAU IDÉAL ?

**ACKER PAUL**

Scientific Director, Lafarge  
Centre de recherche (LCR) - France

## **ABSTRACT**

### **Engineered Concrete: a loss a identity?**

Since the beginning of the 20th century, concrete has been able to meet a continuously growing demand of material by the construction sector. It is now well known that, without this material, western countries would never have had the same pace of development they had during the last century. Nowadays, all the other construction materials (steel, timber, brick, ...) have strong limitations, due either to the depletion of their natural resources, or to environmental issues. With more than 30 billions tons per year, concrete still is the only material able to fill the needs of developing countries for building decent houses, schools, hospitals, etc.: nothing else is able to provide more than half a billion tons per year. Regarding global emissions of greenhouse gas, concrete remains the second source of emissions, just after steel, but this is only due to its global volume: if we consider GHG emissions per kilogram, or even per MPa (to take into account the mechanical performance of the material), concrete is one of the best material, with asphalt. In some cases, timber can be better than concrete, but only under very specific (and limited) conditions : raw material locally produced and recycling technology locally available. But this is quite rare and, as an average value, concrete is, by far, better.

On the other hand, thanks to the help of Materials science (only recently applied to cementitious materials), concrete is more and more a very versatile material, and the limits of this diversification continuously enlarge. Some physical and mechanical properties recently have been dramatically extended: compressive strength has been multiplied by five, thermal conductivity divided by three. Some new properties, like service life or even surface properties can now be specified, engineered, measured and controlled. We can produce the material with a mat surface, a satinated one, a glossy one. As any colour is possible, concrete can mimic any other material as close as wanted. All these properties can be mixed over a large range and with a high degree of freedom. Concrete is definitely no more the standard material it has been during the last century, but a very versatile one, covering a very large domain, overlapping the ones of all the other materials.



1a



1b

Figure 1a et 1b  
Le Panthéon (Rome), construit au 1<sup>er</sup> siècle de notre ère avec trois bétons différents (dont un béton de granulats légers – de la pierre ponce – pour le dôme), est un des plus grand ouvrages, et sans doute le plus technologique (McDonald), que l'Antiquité nous ait légué. Aucun ouvrage d'une telle portée n'a ensuite été réalisé avant le XIX<sup>e</sup> siècle.

The good news is that the tools and software enabling engineers to design the material composition still are available for a large range of given specifications.

The bad news is the loss of identity of the material. The street man can no more recognize the material. The practitioner can no more design a new concept of structure without having chosen a set of material specifications but also cannot define the best material specifications for a designed structure. The engineering tools (and software) required for a simultaneous optimization of the structural design and the material specifications does not exist. And we have no idea on how to build them. The optimisation by an heuristical process will take decades, as it took for reinforced concrete structures and for prestressed concrete ones. Is it acceptable to wait so long regarding the environmental and social issues we now have to face?

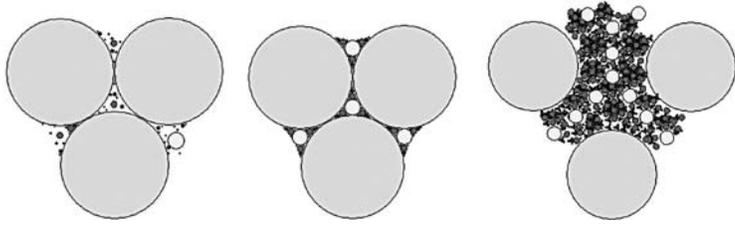
## INTRODUCTION

Si les matériaux de construction, naturels et industriels, peuvent être presque tous répertoriés et décrits dans des catalogues ou des listes de produits, il en est un, le béton, qui ne peut plus, aujourd'hui, se résumer à un nombre fini de types ou de familles.

Le béton peut maintenant être formulé pour atteindre des combinaisons extrêmement diversifiées de toutes ses propriétés physiques, mécaniques et esthétiques. En moins de 15 ans, la résistance mécanique a été multipliée par 5, la conductivité thermique a pu être divisée par trois, et l'on peut approcher aussi près que l'on veut la couleur et la texture de n'importe quel autre matériau. On peut fixer, de manière presque indépendante, chacune de ses propriétés, sur une échelle qui couvre parfois plusieurs décades. C'est aussi le seul matériau qui dispose d'une ingénierie complète permettant de spécifier une durée de vie et d'en assurer le traitement technique, contractuel et juridique.

En même temps, le béton est le seul matériau capable de répondre aux besoins du XXI<sup>e</sup> siècle, non seulement parce qu'il est, à l'échelle des besoins actuels et à venir, le seul qui soit effectivement disponible, mais aussi parce qu'il est, en termes de développement durable, le plus performant, aussi bien dans les conditions actuelles que (si l'on exploite son potentiel) dans les conditions des prochaines décennies.

Son extrême flexibilité apparaît aujourd'hui comme un atout décisif pour répondre aux enjeux majeurs de la construction et fournir des solutions constructives particulièrement efficaces en termes d'économie d'énergie, mais soulève aussi de nouveaux problèmes. Des problèmes culturels d'abord, avec une perte d'identité et de lisibilité pour l'homme de la rue, pouvant aller jusqu'à des problèmes de sécurité puisque la solidité d'un ouvrage, d'une dalle, d'un parement ne lui est plus du tout accessible. Et un énorme problème aux



**Figure 2** Apollonios de Perga, mathématicien grec du III<sup>e</sup> siècle av. J.C., avait imaginé un algorithme de remplissage de l'espace par des sphères dont le diamètre décroît indéfiniment (figure du centre). Ce modèle, fractal, montre l'existence d'un optimum de compacité (figure de gauche), mais aussi le caractère autobloquant de cet optimum : il est impossible de déformer un tel assemblage sans le dilater, ce qui implique que, s'il est soumis à des forces de cohésion (telles que les forces capillaires qui s'exercent dans un béton), celles-ci résistent à l'écoulement et celui-ci sera de type visqueux (i.e. consommateur d'énergie). Ceci conduit à la notion de mélange desserré (figure de droite) et de fins dominants (de larrard).



**Figure 3** La résistance mécanique peut couvrir, selon l'application, plusieurs ordres de grandeur : de moins de 2 MPa pour un béton de tranchée **3a** béton provisoire de chantier qui doit pouvoir être enlevé à la pelle, tout en permettant le passage des véhicules de chantier), à 200 MPa pour le béton BFUP des grandes passerelles piéton d'aujourd'hui **3b** Passerelle de la Paix à Séoul, Architecte : Rudy Ricciotti), en passant par l'incontournable B25 (25 MPa) des chantiers de béton traditionnel.

ingénieurs, aux architectes, à tous les partenaires de ce secteur : celui du choix et de l'optimisation simultanée du matériau et de la structure, optimisation qui échappe aux outils existants, car on ne sait pas les faire fonctionner en mode couplé.

Si l'on ne s'attaque pas dès maintenant à la construction d'outils opérant ce couplage, il faudra plusieurs décennies pour identifier les solutions (les associations matériau-structure) les plus performantes, un retard qui constituerait un manque à gagner considérable en termes de réduction de la consommation énergétique et des émissions de carbone, avec l'effet d'inertie qui est inhérent à la performance du patrimoine construit.

## LA FORMULATION DU BÉTON : UNE RÉVOLUTION TECHNOLOGIQUE RÉCENTE

La formulation des bétons est longtemps restée fondée sur une approche empirique, ou disons expérimentale, de type try-and-test, synthétisée sous forme de règles (les professionnels parlent eux-mêmes de règles de cuisine) utilisant peu les connaissances scientifiques, celles-ci étant longtemps restées trop incomplètes pour permettre une approche vraiment rationnelle, i.e. une approche permettant d'optimiser la composition sur la base d'un cahier des charges multifonctionnel. C'est la raison pour laquelle cette pratique est restée fondée, jusqu'à la fin du XX<sup>e</sup> siècle, sur la même démarche que celle qui avait permis, il y a plus de 20 siècles, aux constructeurs romains de progresser continûment et, finalement, de réaliser des ouvrages comme le Panthéon de Rome<sup>1</sup> (fig. 1) et Sainte-Sophie à Istanbul, deux ouvrages particulièrement durables,

**1** Quand il a dressé le projet de la Basilique Saint-Pierre, Bramante a tenté de retrouver la formule du matériau utilisé pour le dôme du Panthéon (un béton léger, utilisant des granulats de pierre ponce). Malgré cela, il n'a pas osé égaler la portée du Panthéon (43 m), et Michel-Ange, qui en a assuré la construction, non plus.

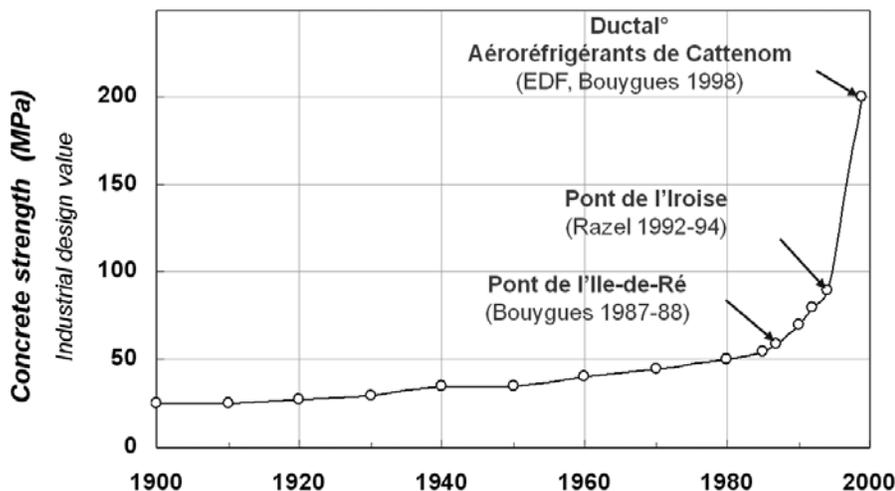


Figure 4 Si l'on trace la résistance mécanique telle qu'elle était disponible, au cours du XX<sup>e</sup> siècle, à l'échelle industrielle, et si l'on considère que chaque point de la courbe, ici caractérisé par un ouvrage réel, a donné suite à toute une génération d'ouvrages, on observe qu'un véritable saut technologique s'est produit autour de l'an 2000. Si l'on trace le même type de courbes pour les autres propriétés clés de ce matériau (durée de vie du matériau, conductivité thermique, etc.), on observe le même saut. Cela s'appelle alors une révolution technologique.

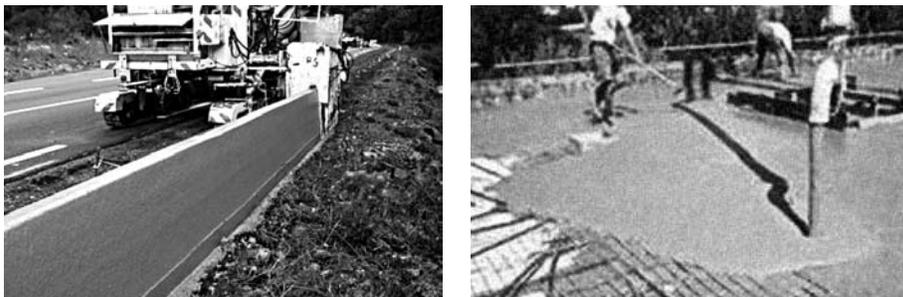
et qui sont longtemps restés sans égal<sup>2</sup>. D'ailleurs, la découverte de Pompéï, au début du XVIII<sup>e</sup> siècle, i.e. au début d'une révolution industrielle qui déjà manquait de (bons) matériaux, a généré, dans toute l'Europe, un grand intérêt pour le béton romain (Lamprecht) et les plus grands scientifiques de l'époque se sont mobilisés pour en percer le secret (Choisy). Il fallut attendre Lavoisier et les bases de la chimie moderne, pour que l'on comprenne que l'association de deux espèces pures (la chaux et les silicates, tels que le pratiquaient les romains) peut conduire à un minéral qui n'en est pas le simple mélange, et dont les propriétés n'en sont pas la moyenne arithmétique.

Il faut dire que, jusque dans les années 80, on ne disposait pas encore des concepts de la science des matériaux (fractals, modèles granulaires, théorie de la percolation) ni même des outils (simulation numérique, approches multi-échelle, homogénéisation micromécanique) qui, depuis lors, se sont révélés incontournables pour analyser, comprendre et, in fine, simuler un matériau jusqu'alors rétif à toute approche scientifique. Maintenant que ces outils existent et sont utilisés industriellement, la situation s'est inversée et le béton apparaît, aujourd'hui, comme le paradigme de la Science des matériaux. Il est en effet le seul qui couvre toutes les disciplines de cette science encore jeune (Acker).

## UN MODÈLE FONDAMENTAL POUR LES MÉLANGES GRANULAIRES

C'est avec un modèle d'empilement granulaire, permettant le calcul des compacités d'un mélange (binaire, puis multiple) de grains de tailles différentes, à la fin des années 80 (DE Larrard) que le matériau a acquis sa véritable dimension scientifique.

<sup>2</sup> Le dôme du Panthéon est resté un record de portée jusqu'au XIX<sup>e</sup> siècle. Le Panthéon et Sainte-Sophie ont un autre point commun : tous deux ont péri dans un incendie et ont été reconstruits, chacun de manière un peu améliorée, les architectes ayant alors tenu compte des enseignements, encore chauds, de la première construction. On peut donc dire que la durabilité des ouvrages de l'époque progressait plus avec la compréhension du dysfonctionnement des structures qu'avec celle du comportement des matériaux, déjà bien optimisés, eux, compte tenu des connaissances et des possibilités de l'époque.



**Figure 5** Aujourd'hui, la rhéologie (i.e. le comportement à l'écoulement) d'un béton peut être ajustée d'une consistance ferme **5a** coulage d'un béton par extrusion (photo : Carayon) à une consistance fluide **5b** coulage d'un plancher en béton autoplaçant (photo : Lafarge). Ce qui offre une plus large flexibilité dans les modes constructifs et ouvre la voie à de nouvelles conceptions.

Ce modèle montre clairement que la compacité d'un mélange de grains augmente (de plus en plus vite) avec le nombre et, surtout, avec l'étendue des tailles de grain. Il permet d'évaluer la compacité<sup>3</sup> d'un arrangement (la compacité est le rapport entre la somme des volumes des grains et le volume apparent de l'arrangement, ou encore le complément à 1 de sa porosité), mais aussi de comprendre comment tout l'empilement fonctionne. Ainsi, le modèle d'Apollonios, qui décrit le pavage asymptotique de l'espace par des sphères (fig. 2), joue un rôle conceptuel central parce qu'il montre à la fois l'existence d'un optimum (compacité égale à 1, i.e. porosité nulle), mais aussi le caractère *asymétrique* de cet optimum : un tel mélange ne peut subir aucune déformation sans se dilater ce qui, en présence d'eau notamment, gêne considérablement les écoulements et constitue, dans les applications industrielles, la principale source des difficultés de mise en œuvre. Pour échapper à ces difficultés, il faut, à toutes les échelles et avec une marge de sécurité, que les fins soient en excès par rapport à la distribution granulaire d'Apollonios. La simple application de ces idées a conduit à l'apparition, à la fin des années 80, des *bétons de hautes performances* (ou BHP), et à la fin des années 90, des *bétons de ultra-hautes performances* (BUHP ou BFUP, *bétons fibrés ultra-performants*), qui ont constitué une seconde augmentation, encore plus spectaculaire, des performances mécaniques du béton (fig. 3).

Il est intéressant de constater que cette explosion, à l'échelle industrielle, des performances du matériau a, chronologiquement, *suivi* l'apparition du modèle, car cela montre la supériorité des modèles *physiques* sur les modèles *empiriques* ou même *statistiques* : l'idée d'associer des poudres de tailles différentes et même celle d'ouvrir l'étendue granulaire étaient connues depuis longtemps, elles ont fait l'objet d'études expérimentales et de modèles statistiques<sup>4</sup>, mais n'ont jamais été explorées jusqu'à leurs limites, parce que ces approches ne permettent pas *d'extrapoler* en-dehors du domaine connu. Le fait que des performances voisines avaient déjà été obtenues en laboratoire, par différentes équipes et à différentes époques, mais sans jamais atteindre le seuil de la réalisation industrielle, montre qu'une découverte heuristique n'a pas la même portée, à l'échelle industrielle, qu'une avancée scientifique. Plus précisément : si l'on n'a pas compris *pourquoi* on a pu obtenir une nouvelle performance au labo, il est impossible d'en assurer la reproduction à l'échelle industrielle, à cause de la durée des chantiers de construction, sur lesquels il faut pouvoir corriger en temps réel les fluctuations des caractéristiques

**3** Plus précisément, cette théorie fournit la forme mathématique du modèle, dont les paramètres doivent être calibrés sur des essais réalisés avec les classes granulaires réelles.

**4** Les modèles statistiques permettent de calculer les paramètres de la loi mathématique (le plus souvent un polynôme) la plus proche des points expérimentaux. Si ces modèles sont parfaits pour interpoler, ils ne permettent aucune extrapolation en dehors du domaine couvert (cette limitation est très forte, moins à cause de l'étendue des paramètres qu'on a fait varier que par la fixité de tous les paramètres qu'on n'a pas fait varier dans le programme d'essai).

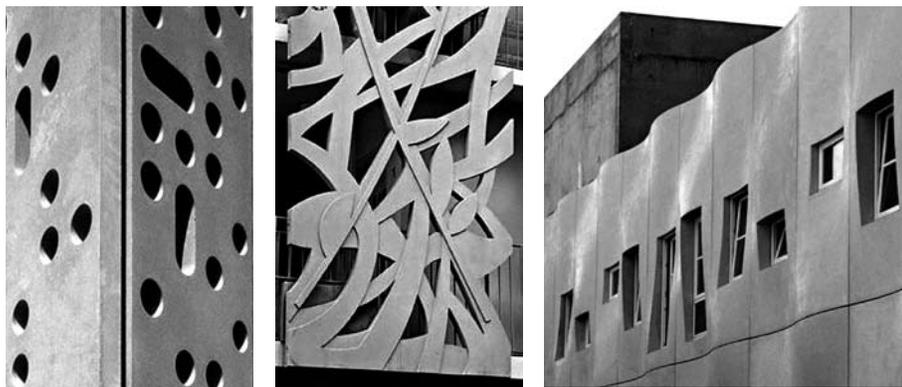


Figure 6 Mat, satiné, brillant, le béton peut imiter toutes sortes de surfaces. a Centre culturel de Sedan, Architecte : Philippe Gibert  
b ZAC Rive Gauche, Paris, Architectes : Cabinet Badia-Berger c Crèche Budin, Paris, Architectes : E. Combarel & D. Marrec

des matières premières. Inversement, l'existence d'un modèle numérique permet (au sens propre de *fournir les moyens*, et au sens figuré *d'autoriser intellectuellement*) de concevoir des outils d'ajustement « en ligne » et des logiciels « *on line* ».

Aujourd'hui, le développement de ces bétons de 200 MPa s'accélère et, quand on regarde l'évolution, au cours du XX<sup>e</sup> siècle, des performances mécaniques telles qu'elles sont arrivées à la disposition de l'industrie (les dates correspondent à des ouvrages réels, et non pas à des résultats de labo), on observe un véritable saut technologique au tournant de l'an 2000 (fig. 4).

## EN PRIME : LA CLÉ DES PROPRIÉTÉS DE MISE EN ŒUVRE

Pendant longtemps (et aujourd'hui encore, sans doute, dans beaucoup d'écoles), on enseignait que *résistance mécanique et facilité de mise en œuvre* étaient deux propriétés *antinomiques*, et la formulation du béton était donc centrée sur la recherche d'un compromis entre ces deux propriétés. La compréhension des forces capillaires, qui assurent une réelle cohésion du béton frais (et s'opposent à la dilatance), a permis de comprendre l'importance de la distribution granulaire dans le comportement du matériau à l'écoulement et de concevoir des formulations très fluides, voire liquides. Bien sûr, le développement de nouveaux polymères fluidifiants (*superplastifiants*) a facilité ce processus, mais c'est bien le concept granulaire qui est à l'origine de ce *saut technologique* que constitue l'apparition, à la fin des années 90, des *bétons autoplaçants* (BAP) : en effet, lorsque l'empilement n'est pas correctement distribué, aucun polymère ne permet de corriger son mauvais comportement. D'ailleurs, le même concept a permis d'aller, non seulement vers les plus grandes fluidités, mais aussi vers les plus faibles, puisque, à l'inverse, on sait aussi contrôler, aujourd'hui, l'absence de tout écoulement, comme dans les bétons extrudés (fig. 5).

## UN MATÉRIAU CAMÉLÉON

Le modèle granulaire cible des BHP et des BAP, plus « étalé » du côté des fines, donc, que l'optimum du modèle apollonien, possède une autre propriété remarquable : celle de reproduire la rugosité de surface du moule que l'on utilise pour le fabriquer. Or c'est la rugosité dans le domaine du dixième de micromètre à quelques microns (celui dans lequel une surface interfère avec la propagation de la lumière visible,

7



Figure 7 Le Tunnel sous la Manche (1987-92) a été le premier ouvrage dont le béton a été spécifié en termes de durée de vie (120 ans). Cela a été l'occasion de développer toute une ingénierie (code de calcul, méthodes d'essai, documents contractuels) qui a permis à l'ensemble des acteurs de la construction (architecte-concepteur, ingénieur, bureau de contrôle, contrôleur de chantier) d'assurer cette performance. Documents et outils sont aujourd'hui opérationnels en France, et en cours de rédaction au niveau Européen.

8 a-b



Figures 8 Deux exemples illustrant l'énorme impact environnemental que peut avoir, lorsqu'il est associé à une conception appropriée, un matériau de très grande durée de vie : 8a la Gare de Lyon, à Paris, construite en 1895, et qui répond toujours aux besoins d'aujourd'hui et 8b le réseau routier belge, construit à 90% en béton et dont la longévité en fait le réseau routier le moins cher du monde !

9

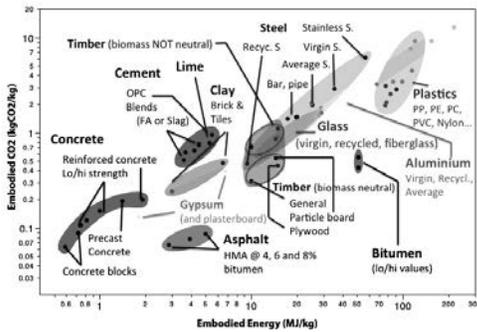


Figure 9 En termes d'énergie grise (l'énergie consommée pour produire 1 kg de matière) et en termes d'émissions de gaz à effet de serre, le béton est, de loin, le matériau qui a, au kg ou au MPa, le meilleur bilan environnemental (Hammond).

dont les longueurs d'onde sont comprises entre 0,3 et 0,8  $\mu\text{m}$ ) qui détermine l'aspect (brillant, satiné, mat,...) d'une surface [Bennett]. Si la distribution granulométrique respecte bien, jusqu'aux plus petites tailles de grains, le concept des « fins dominants », il va reproduire la rugosité de la surface coffrante et donc son aspect. Le choix d'un coffrage dont la rugosité de surface est contrôlée permet donc de contrôler l'aspect brillant ou mat du matériau.

Il est étonnant de voir à quel point le béton peut reproduire l'aspect du bois, par exemple (fig. 6). Si on y ajoute le fait qu'avec un ciment et des granulats très clairs on peut ajouter presque tous les pigments disponibles, cette capacité de mimétisme des autres matériaux semble, aujourd'hui, ne plus avoir de limite.

## UN MATÉRIAU DURABLE ET ENVIRONNEMENTAL

Le Panthéon de Rome, les premiers ouvrages du XIX<sup>e</sup> siècle<sup>5</sup>, les derniers travaux de la communauté scientifique, montrent que le béton est un matériau particulièrement durable. À la suite de la réalisation du Tunnel sous la Manche (fig. 7) qui a été, historiquement, le premier grand ouvrage dont la durée de vie a été spécifiée dans le contrat (120 ans, en l'occurrence), la méthodologie, les essais, les critères et les modèles de calcul qui avaient permis d'assurer cette durée de vie a été développée et formalisée sous la forme une ingénierie qui a maintenant fait ses preuves. Or la durée de vie du matériau est une des composantes majeures de sa performance environnementale (Fig. 8), parce que, d'une part, le coût des réparations est, dans la construction, considérable (souvent très proche de celui de la reconstruction), mais aussi parce que, d'autre part, si la structure d'un bâtiment est saine, la population locale supporte de moins en moins sa démolition et la réhabilitation sera de plus en plus souvent choisie (on voit cela, aujourd'hui, même pour les usines !).

Outre sa durabilité, le bilan environnemental du béton est excellent. Si, pour les émissions globale de gaz à effet de serre, le béton vient en seconde place (après l'acier), c'est uniquement à cause de son volume global : si par contre, on ramène les valeurs à la tonne ou même au MPa (pour prendre en compte la performance mécanique), alors les derniers travaux scientifiques [Hammond] montrent que, en termes d'énergie grise, le béton arrive largement en tête et, en termes d'émissions de gaz à effet de serre, il est, statistiquement, au même niveau que l'asphalte (fig. 9). Cela résulte des pratiques actuelles, notamment au niveau du transport des matières premières et du recyclage en fin de vie : le bois, par exemple, peut être meilleur et il l'est parfois significativement, mais seulement sous deux conditions [Ashby] :

**1/** s'il est transporté sur une courte distance, ce qui est rarement le cas et restera toujours, pour des raisons évidentes, en des quantités très limitées,

**2/** et si on peut tabler sur un recyclage réel en fin de vie, ce qui est très loin d'être acquis aujourd'hui.

Le recyclage du béton ne pose aucun problème technique : deux pays au moins (Pays-Bas et Danemark) recyclent déjà 100% de leurs bétons de démolition, parce que cela leur fournit des granulats à des coûts qui sont compétitifs par rapport au coût des granulats importés. Ce bilan a récemment été analysé plus en détail à l'échelle de l'unité fonctionnelle, de poutres et de poteaux (Purnell), et abouti aux mêmes résultats : des bilans très proches entre le bois et le béton armé traditionnel (le premier l'emportant pour les faibles portées, et vice-versa). Par contre, ces résultats montrent (car Purnell a utilisé une formulation non optimisée de BHP, dont on sait que l'on peut, à performance mécanique égale, réduire significativement le bilan *carbone*) que les BHP reprennent l'avantage sur le bois.

<sup>5</sup> Les ouvrages en béton du XIX<sup>e</sup> siècle sont souvent dans un état remarquable, car ils étaient faits avec un très grand soin, le matériau n'ayant pas encore acquis son image actuelle de robustesse. Les problèmes de qualité sont apparus juste après la seconde guerre mondiale lorsque, avec l'invention de la bétonnière, on a poussé la productivité en comptant trop sur cette robustesse sans l'avoir comprise et domptée.



**Figure 10** Inventé à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, le béton armé (BA) a d'abord été utilisé comme l'acier, alors qu'il a des propriétés et un comportement assez différent **10a** dans ce pont BA qui date de 1929, les diagonales sont en traction, comme dans un pont métallique. Il aura fallu plus de 50 ans pour que ce matériau trouve son écriture propre. Le béton précontraint (BP), inventé au début du XX<sup>e</sup> s. s'est développé surtout avec la reconstruction qui a suivi la seconde guerre mondiale, mais il a donné lieu à des innovations significatives jusque dans les années 90 **10b** Viaduc de Sylans, premier pont à âmes treillis, Bouygues 1989).

## LE SEUL MATÉRIAU CAPABLE DE RÉPONDRE AUX BESOINS DU XXI<sup>E</sup> SIÈCLE

Dès le début du XX<sup>e</sup> siècle, le béton a permis de répondre à une demande croissante de logements et d'infrastructures et on sait maintenant que, sans ce matériau, les pays occidentaux n'auraient pas pu avoir le développement qu'ils ont connu au cours de ce siècle, parce que, même cumulés, les autres matériaux sont très loin de pouvoir fournir les mêmes quantités. Aujourd'hui, hormis le béton, tous les matériaux de construction (l'acier, le bois, la brique et même la terre crue) se heurtent à des limites drastiques du fait, soit de l'épuisement de leurs matières premières, soit de leur impact environnemental. En 2010, le béton dépassait déjà les 30 milliards de tonnes par an puisque, cette année-là, la Chine a produit 1,8 milliard de tonnes de ciment, ce qui conduit à une production mondiale de plus de 3 milliards et qu'il y a, en moyenne, 100 kg de ciment par tonne de béton. Aucun des autres matériaux de construction (acier, bois, terre cuite) ne peut et ne pourra jamais fournir un demi-milliard de tonnes par an à la construction, et le béton est donc le seul pouvant répondre aux besoins actuels et à venir des pays en développement en matière de logements, d'infrastructures de transport, d'écoles, d'hôpitaux, etc. La bonne nouvelle, c'est que l'ingénieur « béton » dispose aujourd'hui d'outils de formulation, fondés sur des lois physiques (et non statistiques, ce qui change tout), pour répondre à des cahiers des charges très variés, avec une véritable ingénierie qui assure la réalisation, la vérification et le contrôle de ces propriétés. La mauvaise nouvelle, c'est que cette perte d'identité, cet « *hyperchoix* », pose aujourd'hui un sérieux problème aux architectes et aux ingénieurs, qui ne savent pas concevoir un ouvrage, un bâtiment, avec un matériau qui n'est pas défini, autrement dit on ne sait pas optimiser simultanément une structure et le matériau qui la constitue.

Les outils nécessaires à cette démarche n'existent pas, et on ne sait même pas comment faire pour les établir. Pour l'instant, les progrès se font par tâtonnements, au mieux par incréments successifs, au rythme des ouvrages expérimentaux et de l'innovation, qui est, en fait, très peu sollicitée voire, dans les pays développés, comme la France notamment, fortement freinée par l'appareil normatif. L'enjeu pourtant est de taille, car les progrès que permettrait une telle optimisation semblent considérables, surtout si l'on veut pouvoir répondre aux défis environnementaux et énergétiques qui nous attendent.

## COMBIEN DE TEMPS POUR TROUVER LES SOLUTIONS DE DEMAIN ?

L'histoire du béton armé, comme celle du béton précontraint, montre que ce processus d'optimisation, d'invention et d'identification des formes et des dispositions constructives les plus performantes que l'on peut imaginer avec un nouveau matériau, est un processus très lent qui a pris, pour chacun de ces deux matériaux, plusieurs décennies (Fig. 10).

Dans les deux cas, les innovations clés qui ont amené le matériau à son optimum technique et économique se sont étalées sur au moins quatre décennies.

Quand on les analyse, aujourd'hui, on peut penser qu'on aurait pu, grâce aux techniques actuelles de génération d'idées et surtout à la puissance des outils de simulation, réduire ce délai significativement. Mais cela suppose deux choses essentielles, et difficiles à mettre en œuvre :

**1/** la participation d'un grand nombre de partenaires qui doivent être motivés et convergents : architecte, ingénieur structure, ingénieur thermicien, économiste, sociologue,

**2/** le soutien de la puissance publique, qui seule peut lever l'embargo sécuritaire que constitue le système des normes et financer le surcoût d'étude et le prix du risque que comporte toute innovation.

## CONCLUSIONS

Compte tenu de l'augmentation prévisible de la population mondiale, la réponse aux besoins élémentaires de l'humanité, qui comprend en priorité des logements décents pour tous et des infrastructures sociales (écoles, hôpitaux, etc.), pose un problème majeur de consommation d'énergie et de matières premières, pour au moins les deux décennies à venir. Compte tenu du volume de béton qui sera nécessaire, mais aussi de son impact sur la consommation globale d'énergie, ce serait une perte considérable que de laisser la construction évoluer au gré des idées et au rythme traditionnel des innovations constructives, car on sait que ce chemin est très long, à la fois pour des raisons psychologiques (la génération des idées est un processus stochastique s'il n'est pas sollicité), techniques (le retour d'expérience et le processus de validation n'agit que s'il est géré) et politique (l'innovation est freinée si la normalisation n'a que la sécurité pour seule priorité).

Les enjeux environnementaux et sociaux peuvent-ils attendre 3 ou 4 décennies ?

On peut significativement accélérer ce processus si l'on mobilise l'ensemble des acteurs de la construction, si la puissance publique soutient vraiment l'innovation, et si on crée les outils d'une nouvelle ingénierie, une ingénierie collective capable d'optimiser en même temps le matériau (son cahier des charges) et la structure (son design).

## REFERENCES

- McDonald W.L. (1967), *The Pantheon*, Cambridge, Harvard University Press
- Lamprecht H.O. (1984), « *Opus Caementitium – Bautechnik der Römer* », Düsseldorf, Verlag Bau+Technik
- Choisy A. (1873), *L'Art de bâtir chez les Romains*, Paris
- Acker P. (2001), *Les bétons, in Qu'est-ce que les technologies ? Université de tous les savoirs*, 5, Paris, Editions Odile Jacob
- De Larrard F. (1999), *Concrete Mixture-Proportioning - A Scientific Approach*, Modern Concrete Technology Series, Londres, E&FN Spon
- Bennett J.M., Mattsson L. (1989), *Introduction to Surface Roughness and Scattering*, Optical Society of America
- Hammond G.P., Jones C.I. (2008), *Embodied Energy and Carbon in Construction Materials*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy, 161(2), pp. 87-98
- Ashby M.F. (2009), *Materials and the Environment*, Elsevier
- Purnell P. (2011), *Material Nature versus Structural Nurture. The Embodied Carbon of Fundamental Structural Elements*, in *Environmental Science & Technology*, 46 (1)

# DE GRAINS DE BÂTISSEURS À L'ATELIER MATIÈRES À CONSTRUIRE

ANGER ROMAIN<sup>1,4</sup>, DOAT PATRICE<sup>1,4</sup>, DURAND MICHEL-ANDRÉ<sup>4</sup>  
FONTAINE LAETITIA<sup>1,4</sup>, HOUBEN HUGO<sup>3</sup>, OLAGNON CHRISTIAN<sup>3</sup>, VAN DAMME HENRI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire CRAterre, unité de recherche AE&CC (Architecture, Environnement et Cultures Constructives), ENSAG (Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble),  
<sup>2</sup>Laboratoire PPMD (Physico-chimie des polymères et des milieux dispersés), ESPCI ParisTech (Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles),  
<sup>3</sup>Laboratoire MATEIS (Matériaux : Ingénierie et Science), INSA de Lyon,  
<sup>4</sup>Les Grands Ateliers

## ABSTRACT

Strangely, material science is badly taught today, even though it provides fundamental keys to understand our lives and our society. To familiarize students with material sciences and its applications in construction, *Grains Builders Workshop* is an innovative educational tool that brings together more than one hundred phenomenological experiences to acquire, without advanced physical, chemical and mathematical knowledge, a scientific and technological general knowledge of granular material in its use in the fields of buildings construction and conservation. This educational program was initially focused on earth material and then more generally on granular material, including concretes. The process is now thorough and extended to other materials with new themes intended to eventually cover the full range of building materials. This is the ambition of the *Workshop on Building Materials*, excellence center for teaching materials science for sustainable construction.

Keywords: Pédagogie par l'expérimentation, sciences de la matière, construction durable

## INTRODUCTION

Quels sont les constituants de la matière terre ? Quels sont les phénomènes physico-chimiques qui régissent leur comportement ? Quelles sont les forces qui font tenir ce matériau ? Grâce à une centaine d'expériences didactiques réalisées en temps réel, l'atelier *Grains de Bâtitseurs* est un outil pédagogique innovant permettant de se familiariser avec la matière en grains, pour clairement comprendre comment elle fonctionne. La physique des milieux granulaires secs, la physique des milieux granulaires humides et la physico-chimie des argiles montrent, de façon inattendue, les nombreuses analogies entre la terre et le béton. Au cours de ces dix dernières années, cette approche phénoménologique de la matière a permis de promouvoir les innovations constructives,

d'ouvrir de nombreuses pistes de recherche et de diffuser les connaissances auprès des universitaires et du grand public. Cette nouvelle forme d'ingénierie pédagogique conduit naturellement à penser pouvoir reproduire l'expérience pour d'autres matières et matériaux tels que l'eau, la matière molle, la matière en fibres, etc. *L'Atelier Matières à Construire* (AMàCO), lauréat des Initiatives d'excellence en formations innovantes (IDEFI), est né de cette idée. Il s'agit de créer un lieu exclusivement dédié à l'exploration pédagogique de la matière pour la construction et l'architecture. La première partie de cet article décrit l'atelier pédagogique *Grains de Bâisseurs*. La deuxième partie décrit la manière dont *L'Atelier Matières à Construire* permettra d'approfondir cette démarche.

## GRAINS DE BÂISSEURS

L'atelier pédagogique *Grains de Bâisseurs* se présente comme un parcours de découverte où l'on peut manipuler une série d'expériences interactives et contre-intuitives sur la matière en grains minéraux permettant d'acquérir, par un cheminement qui va de la géologie à l'architecture, une culture scientifique et technique de la matière en grains. Le projet vise à faire découvrir de façon ludique la physique des grains, à faire aimer la science et ainsi susciter des vocations scientifiques en particulier parmi les jeunes, facilitant la compréhension de l'architecture, et réintroduisant la notion de territoire, porteuse de valeurs culturelles, façonnées par le lien naturel qui existe entre la géologie et la géographie d'une région et la présence des matériaux disponibles qui sont utilisés par ses habitants pour se loger. Les expériences de *Grains de Bâisseurs* sont agencées selon un cheminement qui, tout en faisant découvrir le fonctionnement de base de la matière en grains, invite à passer successivement de la géologie à la construction et à établir des liens entre les paysages, la matière et l'architecture. Dans ce circuit initiatique, beaucoup plus que la découverte de lois qui gouvernent la matière, c'est une transformation des conceptions du monde qui est en jeu. Le public est tour à tour invité à changer d'échelle, à la fois au niveau spatial (de l'infiniment petit à l'infiniment grand) et temporel (temps humain et temps géologique) et à porter un regard attentif sur la nature.

Les expériences sont classées par thèmes, que nous décrivons brièvement ci-dessous.

### **Une matière fluide et solide à la fois**

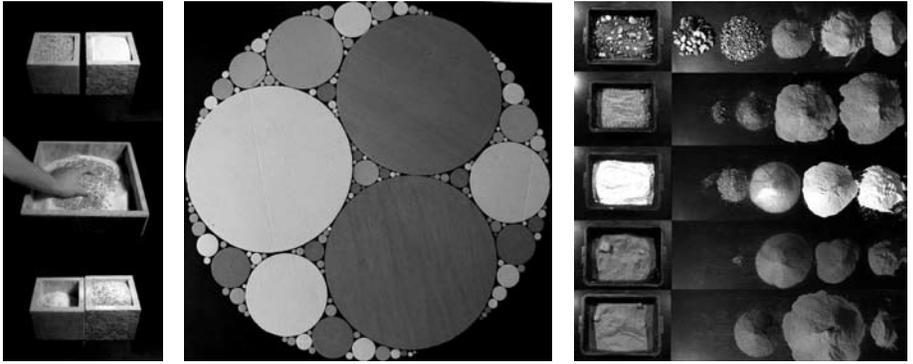
Le premier thème aborde la faculté de la matière en grains à passer successivement de l'état solide à l'état liquide. Cette propriété est fondamentale : elle confère toute sa force aux matériaux granulaires pour la construction, comme le béton de ciment, véritable pierre qui coule, ou la terre, qui peut être versée dans un coffrage comme un liquide en adoptant parfaitement sa forme puis devenir solide par simple compaction.

### **Les empilements de grains** (fig. 1)

Moins il y a de vides, plus le matériau obtenu est solide et résistant. La seule différence entre un tas de terre prêt à l'emploi et le mur en pisé qui vient d'être décoffré est la proportion de vides entre les grains. D'où l'importance des empilements de grains qui permettent de remplir au maximum l'espace avec un ensemble de grains de différentes tailles. Les chercheurs qui formulent les bétons de ciment utilisent des modèles géométriques comme l'empilement apollonien ou l'empilement espacé pour concevoir des matériaux de plus en plus performants : ces concepts sont applicables au matériau terre. Ainsi, la solidité d'un béton dépend avant tout de la proportion de grains de différentes tailles qui le constituent.

De la même manière, modifier la répartition granulaire de la terre engendre des matériaux innovants aux propriétés inattendues : la clé de la réussite réside dans la précision de l'ajout de sables ou de graviers à la terre naturelle. Couler un mur en terre comme un béton est par exemple possible (fig. 2). D'ordinaire, il est inimaginable de réaliser un mur massif en terre coulée sans qu'il fissure en séchant. L'astuce consiste à compléter la

1 a-b-c



**Figure 1** Expériences sur le thème des empilements de grains. **1a** un volume de graviers et un volume de sable identique sont mélangés. Le mélange ne remplit qu'un volume et demi : mélanger des grains de différentes tailles permet donc d'obtenir des matériaux plus compacts. **1b** Comment remplir au maximum un espace uniquement avec des sphères ? La solution mathématique optimale est l'empilement apollonien. **1c** chaque terre est un mélange de grains de différentes tailles en proportions variées. Il est possible de modifier cette granularité naturelle pour obtenir des matériaux plus performants.

2 a-b



**Figure 2a et 2b** La découverte des empilements de grains permet aujourd'hui de couler une terre naturelle comme un béton, en utilisant les principes utilisés pour formuler des bétons fluides dits autonivelants ou autoplaçants.

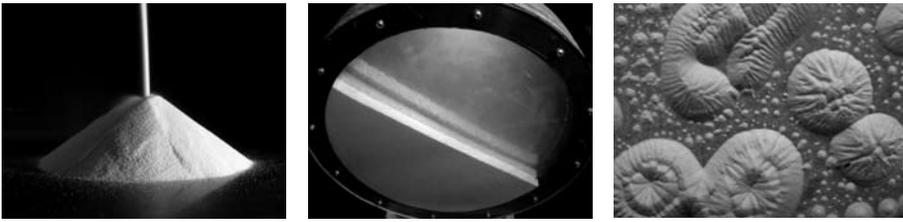
granulométrie d'une terre naturelle avec du sable et des graviers, afin de s'approcher du modèle de l'empilement espacé. Il devient alors possible de la couler comme un béton avec un minimum d'eau, sans fissuration au séchage.

### **La pente du tas de sable** (fig. 3)

Remplir les vides pour obtenir un matériau plus solide revient à augmenter le nombre de points de contact entre tous ces grains. Mais lorsque deux grains se touchent, quelles sont les forces qui les lient au niveau de chacun de ces contacts ? Avant de s'intéresser à un matériau aussi complexe que la terre, il faut commencer par observer un tas de sable sec. Son organisation révèle l'existence des forces de frottement, responsables de la pente naturelle du tas, et permet d'introduire les notions d'angle de repos et d'angle d'avalanche.

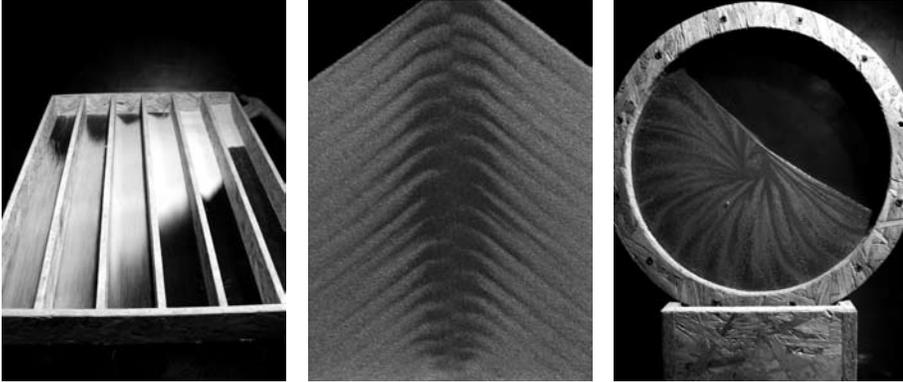
### **Ségrégation granulaire** (fig. 4)

Des grains de différentes tailles ont des angles d'avalanche différents. Lorsqu'ils sont mis en mouvement, ces grains se séparent spontanément par catégories de tailles : c'est le phénomène de ségrégation granulaire, qui posent beaucoup de problèmes dans l'industrie et sur le chantier.



3 a-b-c

**Figure 3** Expériences sur le thème de la pente du tas de sable. **3a** un tas de sable se construit par successions d'avalanche qui ramènent régulièrement la pente à sa valeur initiale. **3b** Du sable fin, moyen et grossier présentent la même pente. On parle d'angle de repos. **3c** du sable fin étalé sur une plaque vibrante se réorganise selon son angle de repos et dessine un « paysage miniature » structuré par une pente constante.



4 a-b-c

**Figure 4** Expériences sur le thème de la ségrégation granulaire. **4a** des grains de différentes tailles présentent des angles d'avalanche différents. **4b** un mélange de grains de différentes tailles versé dans un cadre transparent se sépare par catégories de tailles. **4c** dans une bétonnière rudimentaire, des grains secs différents se trient par catégorie de taille au lieu de se mélanger.

### Chaînes de forces

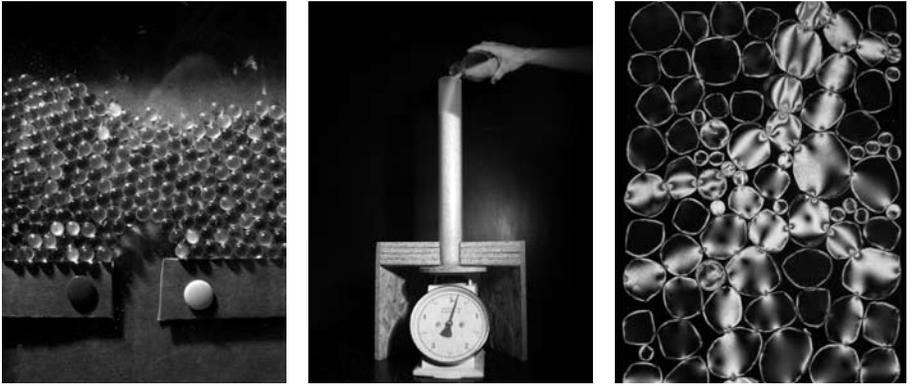
Les interactions de contact et de frottement dans un ensemble de grains distribuent les forces de manière très particulière. Dans certains cas, plusieurs grains en contact forment une voûte et abritent de petits espaces vides qui empêchent les empilements de se placer dans une configuration plus compacte. Par contact et frottement, les contraintes sont transmises grâce à un réseau de chaînes de forces qui dévient les forces verticales sur les côtés (fig. 5).

Les coffrages à béton doivent être suffisamment résistants pour vaincre cette poussée horizontale des grains. De la même façon, lors de la mise en œuvre du pisé, les coups verticaux du pisoir qui compactent la terre sont partiellement dirigés dans les coffrages. Ceux-ci doivent être suffisamment résistants pour vaincre ces poussées horizontales. L'effort de compaction vertical disparaît ainsi partiellement sur les côtés : les chaînes de forces ne parviennent pas jusqu'en bas car elles se dissipent sur les bords. C'est pourquoi le pisé se met en œuvre en compactant de fines couches de terre. Si l'épaisseur de terre est trop importante, au moment de l'impact aucune force de compression n'est transmise jusqu'au bas de la couche, qui n'est alors pas compactée (fig. 6).

### Forces capillaires (fig. 7)

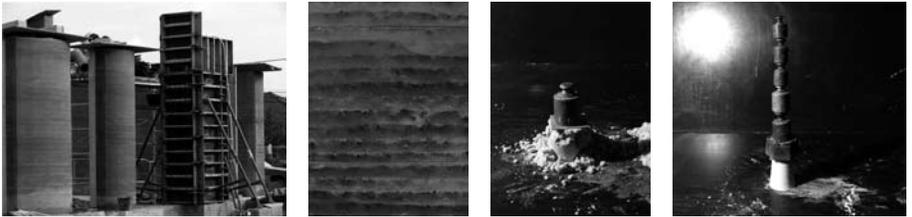
Après ce tour d'horizon de la physique des milieux granulaires secs, de l'eau est ajoutée pour découvrir la physique des milieux granulaires humides. Une série d'expériences sur les liquides réintroduit les notions de tension superficielle (ou de force capillaire), de surfaces hydrophiles et surfaces hydrophobes, auxquelles sont liées les phénomènes de remontée capillaire et de cohésion capillaire.

5 a-b-c



**Figure 5** Expériences sur le thème des chaînes de force. **5a** dans un sablier rudimentaire plan, les billes de verre restent bloquées et forment un arc au-dessus de l'orifice. **5b** Ces effets de voûtes entraînent des phénomènes de blocage. Ici 1 kg de sable est versé dans un tube placé au-dessus du plateau d'une balance. La balance semble bloquée et indique 130 g. **5c** visualisation des chaînes de forces (grâce à un matériau photoélastique) qui dévient l'effort vertical sur les côtés.

6 a-b-c-d



**Figure 6** **6a** Lors de la compaction de la terre à pisé, les coffrages doivent être suffisamment résistants pour vaincre la poussée horizontale des grains. **6b** aspect d'un mur en pisé. **6c 6d** un pâté de sable conventionnel ne résiste pas à une charge de 500 grammes lorsque tout le sable est compacté en une seule fois. Si le sable est compacté par fines couches, comme dans la technique du pisé, le pâté résiste à une charge de 3 kg.

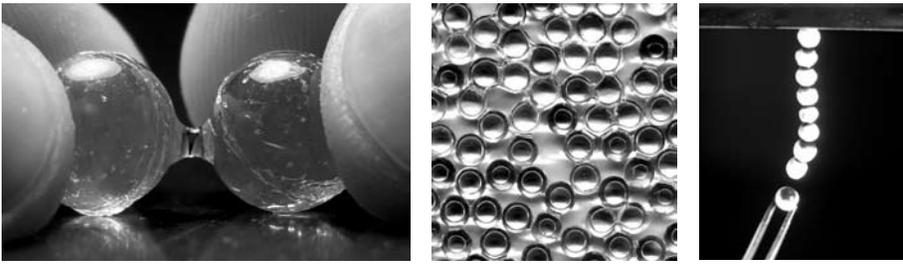
7 a-b-c-d



**Figure 7** Expériences sur les forces capillaires. **7a** du sable sec et fin versé dans une assiette contenant une nappe d'eau de un centimètre d'épaisseur forme une stalagmite de sable, fruit de l'action conjuguée des remontées capillaires et de la cohésion capillaire. **7b** mise en évidence de la tension superficielle avec des aiguilles métalliques flottant à la surface de l'eau. **7c** mise en évidence de la tension interfaciale en l'eau et l'huile. **7d** un pétale de fleur est une surface hydrophobe

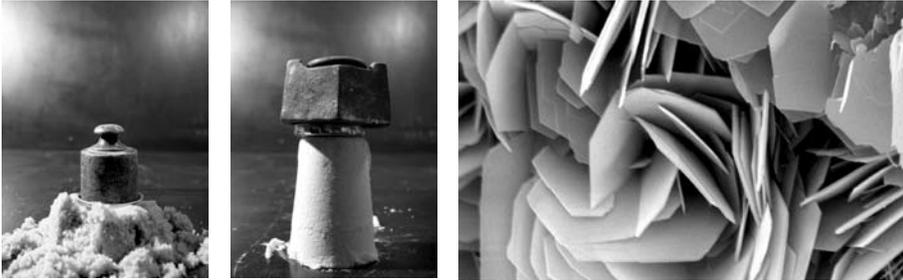
### Cohésion capillaire dans un château de sable (fig. 8)

Une goutte d'eau entre deux billes de verre prend la forme d'un pont capillaire, qui exerce une pression attractive entre les surfaces qu'elle mouille. Ainsi la cohésion du château de sable est due aux ponts capillaires qui relient les grains entre eux : l'eau est une véritable colle. C'est la présence simultanée d'eau et d'air entre les grains qui assure la cohésion. Un pont capillaire n'a de sens qu'à travers l'interface eau-air : sans air, la tension superficielle disparaît. Lorsque la teneur en eau augmente, les ponts capillaires fusionnent jusqu'à la disparition de la phase gazeuse : le château de sable perd alors sa cohésion.



8 a-b-c

**Figure 8** Expériences sur la cohésion capillaire dans un château de sable. **8a** pont capillaire entre deux billes de verre. **8b** ensemble de billes de verre liées par des ponts capillaires. **8c** chaînette de billes de polystyrène de 2 mm de diamètre, tenues ensembles par des ponts capillaires.



9 a-b-c

**Figure 9** Expériences sur la cohésion capillaire dans un mur en terre. **9a 9b** un pâté de sable grossier est beaucoup moins résistant qu'un pâté de sable fin. **9c** plaquettes d'argile observées par microscopie à balayage (\*Hydrasa).

### **Cohésion capillaire dans un mur en terre** (fig. 9)

Un pâté de sable fin est beaucoup plus résistant qu'un pâté de sable grossier : la pression capillaire entre deux grains de sable augmente énormément lorsque la taille des grains diminue et que la courbure du pont capillaire augmente. Entre les plaquettes d'argiles, environ mille fois plus petites qu'un grain de sable, les ponts capillaires ont une dimension extrêmement petite (2 nm environ) : à cette échelle la pression capillaire devient gigantesque et suffisamment intense pour construire des édifices de taille importante. Pour un type particulier d'argile, la kaolinite, il a été montré que la cohésion est essentiellement due aux forces capillaires : l'eau est le véritable liant, la taille et la forme des plaquettes d'argile permettant à la cohésion capillaire d'être beaucoup plus importante que dans un château de sable.

Si l'eau est la colle de la terre, pourquoi un mur en terre ne s'effondre pas quand il sèche, comme un château de sable ? A l'échelle nanométrique du pont capillaire entre les particules d'argile, l'eau ne s'évapore jamais complètement et c'est même l'inverse qui se produit parfois : l'humidité de l'air peut venir se condenser entre les plaquettes d'argile, en formant des ponts capillaires microscopiques de quelques nanomètres et en enrobant les plaquettes d'un film de molécules d'eau encore plus mince. Ainsi un mur en terre n'est jamais complètement sec : il contient toujours un peu d'eau entre les plaquettes d'argile, eau qui ne s'évapore pas car elle est en équilibre avec la vapeur d'eau contenue dans l'air.

### **Gonflement et retrait des argiles** (fig. 10)

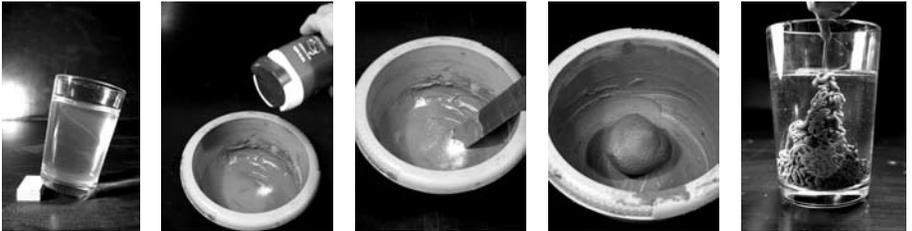
Cette physique du château de sable, où la cohésion capillaire n'est possible qu'à la condition que de l'eau et de l'air soient simultanément présents entre les grains, n'est d'aucun secours pour comprendre le matériau terre à l'état plastique, visqueux ou liquide. Dans ces trois états hydriques, la terre est un mélange de grains saturé d'eau, sans air : il

10 a-b-c-d



**Figure 10** Expériences sur le gonflement et le retrait des argiles. **10a** les mêmes quantités de smectite et de kaolinite sont placées dans deux bouteilles d'eau de même volume. La smectite est une argile gonflante : elle occupe presque tout le volume d'eau disponible. **10b** à taux de matière sèche identique, un mélange de smectite et d'eau forme une pâte ferme tandis que la kaolinite forme une boue liquide. **10c** une boue de smectite séchée fissure énormément. **10d** une boue de smectite s'agglomère autour d'un fil électrique connecté au pôle positif d'une batterie. La smectite porte une charge électrique négative.

11 a-b-c-d-e



**Figure 11** Expériences sur les boues d'argile. **11a** une boue de laponite extrêmement diluée forme un gel constituée de 98% d'eau en masse. **11bcd** une boue d'argile liquide devient plastique lorsqu'une petite quantité de sel est ajoutée. **11e** une boue d'argile liquide coule dans un verre d'eau salée et s'agglomère sous l'eau en formant un boudin, au lieu de se disperser et de troubler l'eau.

n'existe donc plus de forces capillaires. Une autre discipline, la physico-chimie des boues d'argile, est alors davantage adaptée pour décrire et comprendre la terre. Il existe de nombreux types d'argile qui présentent en particulier des propriétés de gonflement et de retrait très différentes. Les argiles gonflantes, comme la smectite, sont capables d'absorber énormément d'eau entre leurs feuillets : elles fissurent énormément au séchage. Ce n'est pas le cas des argiles non-gonflantes, comme la kaolinite. La différence principale entre ces deux argiles est que les feuillets de smectite portent une charge électrique négative tandis que le feuillet de kaolinite est neutre.

### **Boues d'argile** (fig. 11)

Les propriétés électriques de surface des particules colloïdales gouvernent les propriétés rhéologiques des boues d'argile. Celles-ci présentent par exemple la propriété de se transformer en gel au repos ou de se fluidifier lorsqu'elles sont malaxées.

La phase aqueuse dans laquelle sont dispersées les particules argileuses joue un rôle prépondérant dans les propriétés macroscopiques des boues. Un mélange argile/eau peut être liquide en milieu basique ou plastique en milieu acide, pour une teneur en eau identique. La concentration en sel modifie également la viscosité d'une boue d'argile de manière spectaculaire. La composition chimique de l'eau modifie la nature des interactions entre particules d'argile et leur organisation spatiale, qui influence en retour les propriétés rhéologiques des matériaux obtenus.

## ATELIER MATIÈRES À CONSTRUIRE

La manière dont l'atelier pédagogique *Grains de Bâisseurs* aborde la matière conduit naturellement à penser pouvoir reproduire l'expérience pour d'autres matières et matériaux tels que l'eau, la matière molle, la matière en fibres, etc. *L'Atelier Matières à Construire* (AMàCO), lauréat des Initiatives d'excellence en formations innovantes (IDEFI), est né de cette idée. Il s'agit de créer un lieu exclusivement dédié à l'exploration pédagogique de la matière pour la construction et l'architecture. Actuellement, aucune structure pédagogique n'est axée exclusivement sur ce thème. La façon de l'aborder, qui consiste à « lever le voile sur la matière », est, elle aussi, originale. Nous percevons ordinairement les différences des matériaux par leurs qualités sensorielles telles que la couleur, le grain, la texture, la sonorité, la réactivité au toucher, l'odeur, etc. Pourtant, si nos sens nous permettaient de « voir au cœur de la matière », nous découvririons une diversité de formes, d'édifices, de structures internes beaucoup plus vaste que ce que nous pouvons imaginer. C'est cette pluralité « d'architectures » de la matière qu'il est intéressant de mettre en évidence. La matière se compose d'éléments de différentes tailles, de différentes formes, de différents types qui sont liés entre eux par différents « assemblages ». Construire, c'est agréger ensemble (latin : cum-struere). La matière est donc construite. Il s'agit donc d'une part de tisser des liens entre la microstructure de la matière et les problématiques structurelles à l'échelle d'un bâtiment et d'autre part de mettre en lumière la nature intrinsèque de la matière et ses mécanismes internes pour comprendre clairement comment elle fonctionne. En donnant une vision limpide de ce qu'est la matière et des processus qui se déroulent en son sein, on permet une plus grande clarté d'esprit du futur bâtisseur. Dans le meilleur des cas, on peut espérer qu'elle se transforme en « clairvoyance » et lui permette d'imaginer de nouvelles solutions constructives. *L'Atelier Matières à Construire* approfondira l'expérience de *Grains de Bâisseurs* dans deux directions. D'une part il s'agira de développer les liens entre le comportement physico-chimique de la matière et la réalité de chantier. D'autre part, le contenu, initialement centré sur la matière en grains, sera diversifié en quatre nouveaux axes thématiques (matière molle, eau, liants minéraux, fibres végétales), destinés, à terme, à couvrir la gamme complète de tous les matériaux de construction.

### De la compréhension de la matière à la construction

Pour chaque axe thématique, une cinquantaine d'expériences didactiques, similaires à celles développées dans l'atelier *Grains de Bâisseurs*, seront créées pour illustrer le comportement physico-chimique de la matière enseignée. Le lien avec la réalité de chantier sera approfondi avec un ensemble d'images de constructions et de restaurations du patrimoine accompagnées d'explications. D'autre part une dizaine d'exercices pédagogiques de chantier seront mis au point, afin de mettre les étudiants en situation réelle dans le cadre d'expérimentations à l'échelle 1 et d'illustrer par la pratique le lien entre les phénomènes physico-chimiques et la construction.

Par exemple (fig. 12), les réflexions sur la dispersion des contraintes dans la matière en grains selon un réseau de chaînes de forces ont conduit à la réalisation d'une tour de sable de 3 m de hauteur d'une incroyable finesse. Les murs en sable ont seulement 4 cm d'épaisseur, pour une tour qui pèse environ 400 kg. L'astuce consiste à placer des armatures horizontales à intervalle régulier entre les couches de sable compactées : les armatures reprennent en traction la poussée horizontale des grains. Certaines portions de la muraille de Chine sont construites selon ce système constructif, par superpositions de lits de sable et de roseaux. Cette technique rappelle aussi la terre armée de l'ingénieur français Henri Vidal, très utilisée dans le domaine des travaux publics pour réaliser des murs de soutènements. Toutefois le système utilisé pour cette tour de sable est plus contre intuitif puisqu'il n'y a aucune peau pour retenir les grains en surface : l'armature est invisible.

12



Figure 12 Tour de sable compacté armé. Les murs ont une épaisseur de 4 cm pour une tour de 3 mètres de haut. L'image de droite, la surface a été frottée pour laisser apparaître des armatures placées entre les couches de sable compactées.

13 a-b-c

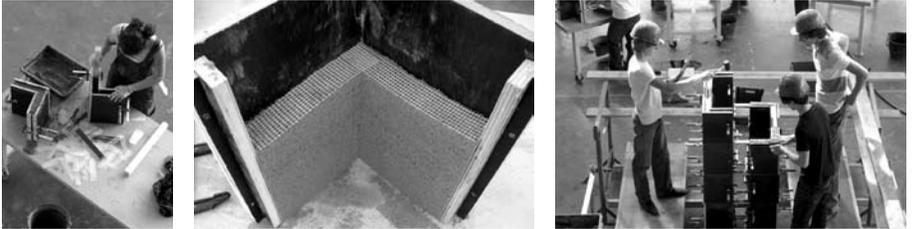


Figure 13 13a le sable est compacté par fines couches dans des coffrages en bois. 13b coffrage ouvert pour rendre visible l'armature placée à intervalle régulier entre les couches de sable. 13c les coffrages sont mis en œuvre comme des éléments maçonnés. Le mortier est constitué de sable humide.

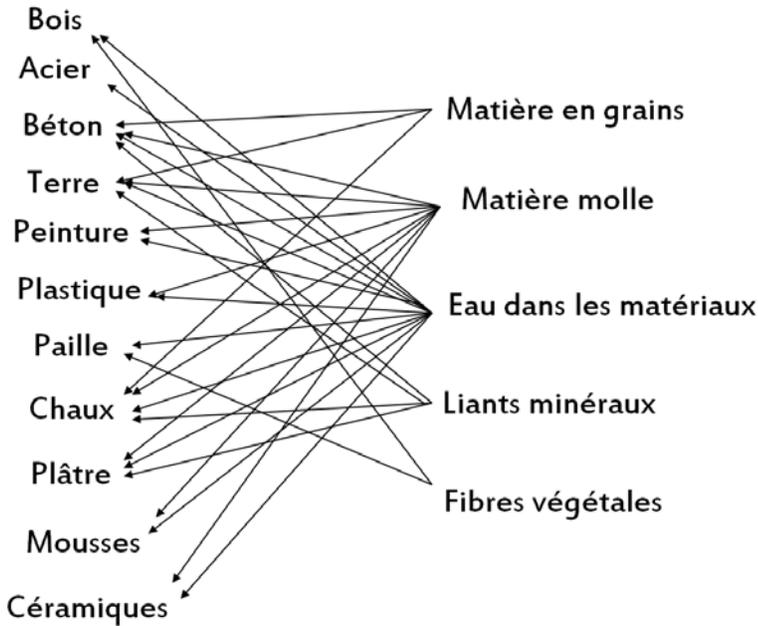
14



Figure 14 A gauche : organisation du chantier. A droite : décoffrage de la tour de sable.

La réalisation de cette tour de sable prend la forme d'un exercice pédagogique pour un groupe de 60 étudiants (fig. 13). De fines couches de sable humide sont compactées dans de petits coffrages en contreplaqué en forme de « L » à l'aide d'un pisoir miniature. Entre chaque couche d'1 cm d'épaisseur sont placées des armatures souples. Une fois remplis de sable armé, les coffrages sont déplacés et assemblés comme des briques à maçonner, à l'aide d'un maillet en caoutchouc et d'un niveau à bulle. Les cadres carrés en bois servant de chaînage entre les étages sont positionnés au sommet de quatre coffrages. Le système choisi est un coffrage intégral.

10 tables sont placées en arc de cercle autour de l'emplacement final de la tour (fig. 14). 4 étudiants par table remplissent 4 coffrages, à l'aide de 4 pisoirs, 4 tiges longues et fines permettant de positionner les armatures au fond du coffrage, un seau d'eau pour humidifier le sable, un récipient rempli de sable humide et 2 gobelets en plastique. Simultanément, un groupe d'étudiants découpe les armatures aux bonnes dimensions, tandis qu'un autre groupe tamise le sable. La structure est décoffrée en commençant par les étages supérieurs et en terminant par le bas.



15

Figure 15 Les 5 axes thématiques de l'Atelier Matières à Construire renvoient à des matériaux différents, habituellement séparés par filières économiques et dans l'enseignement classique.

### Les nouveaux axes thématiques

Dans l'Atelier Matières à Construire, 5 axes thématiques seront traités (fig. 15). La classification choisie est celle du physicien et non pas celle du constructeur. Les 5 axes thématiques favorisent le transfert de connaissances entre filières de matériaux de construction séparées, à la fois 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.

Le premier axe est celui de la *matière en grains*. Cet axe concerne le sable, les graviers et autres granulats utilisés pour la construction ainsi que tous les bétons, c'est-à-dire tous les matériaux constitués de grains agglomérés par un liant (le béton de ciment, la terre, les mortiers de chaux, le béton bitumineux, etc.).

Le deuxième axe est celui de la *matière molle*. Cet axe concerne à la fois les dispersions de petites particules solides dans un liquide, les dispersions de petites particules liquides dans un autre liquide, les dispersions de petites particules de gaz dans un liquide ou un solide. Les matériaux concernés sont les liants à l'état de boue ou de pâte (ciment frais, argile, peintures, enduits, pigments minéraux, céramiques avant cuisson, etc.), les émulsions, les mousses et les aérogels.

Le troisième axe est celui de l'*eau dans les matériaux de constructions*. Cet axe renvoie indirectement à tous les matériaux de construction, qui interagissent avec l'eau à des degrés divers : action du gel, hydratation du plâtre et du ciment, phénomènes capillaires, phénomènes de condensation et d'évaporation, matériaux hydrophiles et hydrophobes, eau de gâchage, attaques chimiques liées à l'eau, eau salée et phénomènes de cristallisation, etc.

Le quatrième axe est celui des *liants minéraux*. Cet axe renvoie à des matériaux tels que le ciment, le plâtre, l'argile, la chaux ou les ciments naturels. Les mécanismes de durcissement de ces matières liantes seront mis en évidence. Par exemple, l'argile durcit par simple séchage. La prise du plâtre, de la chaux hydraulique et du ciment est liée à une réaction d'hydratation. La chaux aérienne fait prise au contact du CO<sub>2</sub> de l'air.

Le cinquième axe est celui des *fibres végétales*. Cet axe renvoie à des matériaux tels que le bois, le bambou, le roseau, la paille, le carton ou les tissus, mais concerne aussi l'utilisation de fibres dans les matériaux de constructions. Il renvoie aussi à toutes les substances organiques d'origine animale ou végétale utilisées dans la construction. Par exemple, la cellulose qui constitue à elle seule 50% de la biomasse. Au-delà de l'organisation multi-échelle des matériaux vivants, il s'agira de parler des utilisations les plus innovantes de macromolécules naturelles comme additifs dans les matériaux de construction.

## **CONCLUSION**

L'approche phénoménologique de la matière développée dans l'atelier *Grains de Bâtitseurs* et prolongée par l'*Atelier Matières à Construire* est un formidable outil de transmission des connaissances. Elle favorise notamment le décloisonnement des connaissances entre chercheurs, enseignants et professionnels aux spécialités variées (architectes, ingénieurs, artistes, spécialistes des sciences de la matière). Elle fait également émerger de nouvelles pistes de recherche et favorise les innovations constructives. Elle suscite enfin un fort intérêt de la part du grand public et de la société en général.



# IMPACTS OF SHIV AND BINDERS ON THE MECHANICAL AND HYGRO-THERMAL PROPERTIES OF HEMP CONCRETES

ARNAUD LAURENT, GOURLAY ÉTIENNE

ENTPE National School of Public Works, University of Lyon, France

## ABSTRACT

Hemp concrete is a multifunctional sustainable material used for building constructions in Europe. Due to its high porosity (about 80% in volume), it presents high performances characterized by a ductile mechanical behavior and very high acoustical absorption and hygrothermal properties particularly interesting. This paper focuses on the impacts of shiv (hemp particles) used as aggregates and binder on the mechanical and thermal properties of the hemp concrete. It is shown that a physico-chemical interaction between the binder and the vegetable particles may disrupt the mechanical hardening and setting of the material. Moreover, the hemp concrete compressive strength may be correlated with the morphological characteristics of the hemp particles. Finally, the water and vapour transfers and the water phase changes (condensation and vaporization) within the material influence hugely the thermal behaviour of this envelop material.

Keywords: Hemp concrete, mechanical, thermal properties, vapour, transfers, granulometry, binder.

## INTRODUCTION

Natural aggregates can be preserved today when designing building materials since the use of plant particles with low environmental impact enables to design building materials with high technical performances.

The hemp concrete is a composite material obtained by mixing together a binder and hemp particles (the non-fibrous fraction of the hemp stem called "shiv"). It is used in the building field as filling material of a load-bearing structure or as ready-made units or also as coating of wall. Its carbon footprint is negative : indeed, a Life-Cycle Analysis of this "green concrete" established that each square meter of hemp concrete implemented results in storing 35 kg of CO<sup>2</sup> (Boutin *et al*, 2005).

<b>Binder</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
Apparent powder density (kg/m <sup>3</sup> )	650	700	1700

Table 1 Apparent powder densities of the binders

<b>Shiv (Plant particles)</b>	<b>HS n<sup>o</sup>.1</b>	<b>HS n<sup>o</sup>.2</b>	<b>HS n<sup>o</sup>.3</b>
Bulk density (kg/m <sup>3</sup> )	105	90	94

Table 2 Bulk densities of shiv

This material has a very high porosity (more than 80% in volume) from which come the physical performances, which are at the same time original and very interesting. Hemp concretes are characterized by their lightness (dry bulk density of about 400 kg/m<sup>3</sup> for a "wall" mixture) but also by an important mechanical ductility (compressive strains higher than 10% are possible). They can reach outstanding levels of thermal and phonic isolation (dry thermal conductivity of 0.08 W/(m.K) (Cerezo, 2005) and acoustic absorption higher than 0.8 (Arnaud et al, 2006), (Glé et al, 2010). So, it is possible to define specific mix proportions depending on the use of hemp concrete : roof and floor insulation, wall infilling or insulating plasters and renders (Hustache & Arnaud, 2008).

To manufacture hemp concretes, various types of binders and several qualities of hemp shiv, whose physical characteristics vary sharply, are available. In this work, the impacts of various shiv and binders on the mechanical and thermal properties are assessed. The influence of heat and mass transfers on the hygrothermal control of a hemp concrete wall is also measured.

## EXPERIMENTAL PROCEDURES

### Raw materials

Three kinds of binders and three shiv were used to manufacture hemp concretes. Binder A is a pre-formulated lime-based binder made up of air lime (75%), hydraulic lime (15%) and pozzolanic lime (10%). Binder B contains only hydraulic lime and binder C is made up of Portland cement clinker. The apparent powder densities of the various binders are shown in Table 1.

The three studied shiv have various geographical origins and result from very different methods of hemp harvesting and processing. The bulk densities of shiv are given in Table 2.

### Preparation of specimens

The specimens were manufactured by using a concrete - mixer with rotary drum and fixed blades according to a clearly identified procedure (RP2C, 2006).

The name given to each mixture indicates the raw materials used : for example, "B-2" stands for a mix with binder B and hemp shiv n<sup>o</sup>.2. The amount of water introduced into each mixture was adjusted in order to take into account the water requirement of binder and shiv (Table 3).

For each mixture, 9 cylindrical specimens, measuring 160 mm in diameter and 320 mm in height, 3 square specimens, 270 mm long and 50 mm high, and a wall, measuring 600 mm in length and 100 mm in height, were filled with 50 mm thick layers under a stress of compaction of 0.05 MPa. The specimens were preserved in their mould in a climatic room controlled at 20°C and 50% RH until the date of the test (RP2C, 2006).

<b>Hemp concrete</b>	<b>% Weight</b>			<b>% Volume</b>		
	<i>Hemp shiv</i>	<i>Binder</i>	<i>Water</i>	<i>Hemp shiv</i>	<i>Binder</i>	<i>Water</i>
<i>A-1</i>	<i>34.1</i>	<i>48.9</i>	<i>61.6</i>	<i>19.9</i>	<i>18.5</i>	<i>18.5</i>
<i>A-2</i>	<i>36.4</i>	<i>45.4</i>	<i>66.6</i>	<i>18.4</i>	<i>15.0</i>	<i>15.0</i>
<i>A-3</i>	<i>37.1</i>	<i>44.3</i>	<i>66.1</i>	<i>19.1</i>	<i>14.8</i>	<i>14.8</i>
<i>B-1</i>	<i>34.5</i>	<i>48.3</i>	<i>62.7</i>	<i>18.8</i>	<i>18.5</i>	<i>18.5</i>
<i>B-2</i>	<i>36.0</i>	<i>46.0</i>	<i>67.2</i>	<i>17.3</i>	<i>15.5</i>	<i>15.5</i>
<i>B-3</i>	<i>37.7</i>	<i>43.5</i>	<i>67.3</i>	<i>18.1</i>	<i>14.6</i>	<i>14.6</i>
<i>C-1</i>	<i>33.6</i>	<i>49.6</i>	<i>69.8</i>	<i>8.6</i>	<i>21.6</i>	<i>21.6</i>
<i>C-2</i>	<i>38.6</i>	<i>42.1</i>	<i>76.8</i>	<i>8.1</i>	<i>15.1</i>	<i>15.1</i>
<i>C-3</i>	<i>39.6</i>	<i>40.6</i>	<i>76.7</i>	<i>8.5</i>	<i>14.8</i>	<i>14.8</i>

Table 3 Mass and volume composition of freshly-mixed concretes

## Characterization methods

### - Mechanical properties

Before being tested, the cylinders were removed from their mould and placed during 48 hours in a drying oven at 50°C in order to prevent the saturation water from disrupting the mechanical properties measurements.

Compressive strength tests were made on hemp concrete specimens using a universal hydraulic servo-controlled compressive testing machine at a crosshead speed of 5 mm/min.

### - Hygrothermal transfers

An experimental device was developed in the laboratory. Relative humidity and temperature on one side of the sample are simultaneously controlled using a climatic chamber: the hemp concrete sample is thus subjected to temperature and relative humidity gradients between the inside of the climatic room and the laboratory. Measurements are carried out using five temperature and relative humidity probes put in the chamber (sensor A), in the laboratory (sensor E), on the surface of both sides of the sample (sensors B and D) and in the middle of the wall (sensor C). The analysis is mainly based on the variations of this last sensor.

### - Dry thermal conductivity and effusivity

The square specimens were put in a drying oven at 50°C during 24 hours and then, the dry thermal conductivity of material was measured using an apparatus based on a transient hot-wire method. The dry thermal effusivity was determined using a transient hot plate method.

<i>Hemp concrete</i>	<i>28 days</i>		<i>60 days</i>		<i>90 days</i>	
	$\sigma_{max}$ (MPa)	<i>E</i> (MPa)	$\sigma_{max}$ (MPa)	<i>E</i> (MPa)	$\sigma_{max}$ (MPa)	<i>E</i> (MPa)
<i>A-1</i>	0.34	17.9	0.51	28.0	0.59	24.8
<i>A-2</i>	0.24	13.2	0.42	11.9	0.42	13.4
<i>A-3</i>	0.37	17.6	0.42	22.4	0.52	18.8
<i>B-1</i>	0.09	3.4	0.08	1.3	0.08	1.4
<i>B-2</i>	0.07	1.7	0.09	1.0	0.10	1.2
<i>B-3</i>	0.11	1.6	0.10	1.3	0.11	1.4
<i>C-1</i>	0.06	1.8	0.09	2.4	0.11	1.3
<i>C-2</i>	0.09	4.9	0.16	1.9	0.19	2.3
<i>C-3</i>	0.09	4.4	0.21	2.6	0.25	3.1

Table 4 Mean compressive strength and Young's modulus measured for each mixture

## RESULTS AND DISCUSSION

### Mechanical properties

First the shiv in bulk has been tested. A compressive strength test is performed on a 16x32 cm cylindrical sample prepared with shiv alone without any binder. The objective is to determine the main differences on the mechanical contribution of the aggregates. This test corresponds to the determination of quasi elastic modulus for mineral particles but in this case, the porous particles cannot be tested independently, and the behaviour is not elastic. So, a sample is prepared as shown with the pictures in figure 1 and the resulting stress – strain curves are plotted in the figure 1. These are not the same samples of particles but shiv with various origins. Significant differences are observed with a more rigid shiv n°1 as compared to the others.

For each mixture of hemp concrete (see Table 3 for the mix proportions), 3 cylindrical specimens were tested in compression after 28, 60 and 90 days. The typical stress-strain curves of hemp concretes manufactured using binder A are shown in figure 2. The mean compressive strength and Young's modulus measured for each material in compressive strength tests performed are presented in Table 4.

Figure 2 shows that the hardening kinetics of hemp concretes is relatively slow: therefore the mechanical behavior of hemp concrete is mainly linked to its age. At early ages, hemp concretes present a very ductile behavior (characterized by the presence of a long post-peak plastic plateau on the curve). The binder hydrates do not form a connected network yet, consequently, the behavior of the concrete is close to the one of shiv which can sustain very large strains. With time, the hydrates become connecting together and

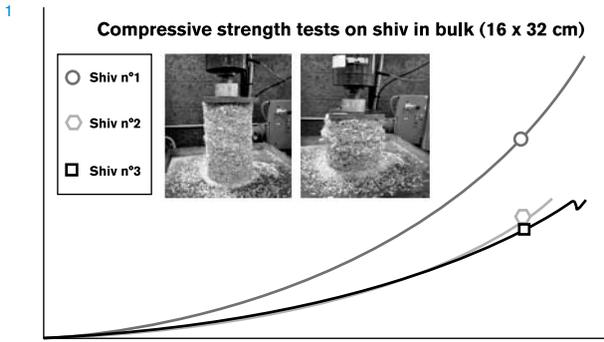


Figure 1 Stress-strain curves of shiv tested in bulk under compressive strength.

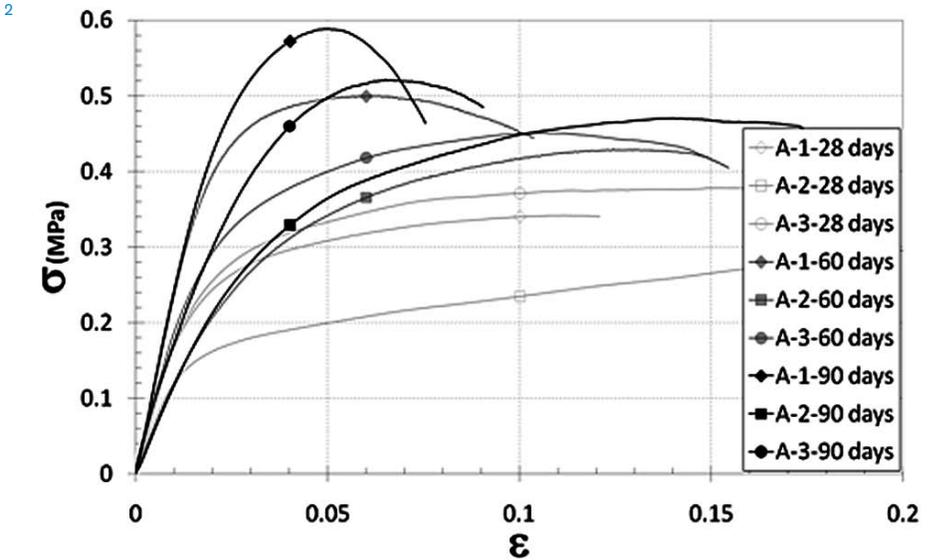


Figure 2 Stress-strain curves of hemp concretes based on binder A after various setting times

gradually create a continuous skeleton enabling stresses transmission.

The binder characteristics become little by little predominant in concrete that supports increasingly high stresses and its behavior becomes less and less ductile.

On figure 2, it can be noticed that cylinders manufactured using shiv HS n°2 and, to a lesser extent, specimens based on shiv HS n°3 are more ductile than concretes based on shiv HS n°1. These differences in compressive strength may very likely be correlated with the shiv morphological characteristics (amount of fibers, size of hemp particles, etc.).

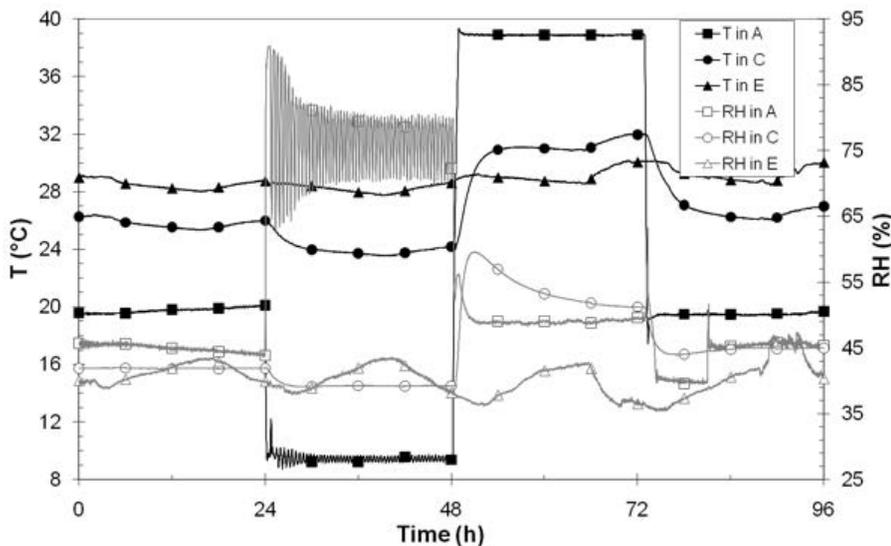


Figure 3 Evolution of temperature and relative humidity in points A, C and E for the wall covered with a tight cellophane film (i.e. without convective flow).

The hemp concretes based on binder A have very good mechanical properties taking into consideration the limits of compressive strength (0.2 MPa) and Young's modulus (15 MPa) specified in (RP2C, 2006). In contrast, the specimens manufactured using binders B and C present very low mechanical properties, which is characteristic of a partial setting of the binder. This result is not surprising for the cylinders based on binder B since the specimens were preserved in an environment with low relative humidity (50% RH). These conditions slows down very sharply the setting of hydraulic binders. Nevertheless, the partial setting of the Portland cement clinker binder is unexpected: it seems that a physico-chemical interaction between the binder and the hemp shiv disrupts the mechanical setting of hemp concrete. Works in hand aim at studying the influence of shiv solubility on binder setting.

### Hygrothermal transfers

A hemp concrete sample was subjected to temperature and relative humidity gradients. Several phenomena are superimposed: heat conduction, convection, diffusion of water vapor and liquid water within the material. In order to identify the role played by convective flows, a wall manufactured using binder C and hemp shiv HS n°.1 has been covered with a fine tight layer of cellophane: thus, only the heat transfers by conduction take place through the material. Measurements are then compared with those performed on this same wall without the tight plastic film.

In the climatic chamber, the temperature and the relative humidity are constant during stages of 24 hours. External conditions of temperature and relative humidity usually measured in spring in France are considered (Stages 1 and 4: 20°C, RH 50%), then in winter (Stage 2: 10°C, RH 80%) and finally, in summer (Stage 3: 40°C, RH 45%). The changes in temperature and relative humidity in the climatic chamber (sensor A), in the middle of the specimen (sensor C) and in the laboratory (sensor E) are compared during tests on figures 3 and 4.

Figure 3 shows during the second stage that the relative humidity decreases in C: this can be explained by the condensation of water vapour inside the wall. At the beginning of the third stage, the relative humidity in C rises sharply before decreasing and then stabilizing. The noticeable temperature rise in A involves a vaporization of water within the specimen:

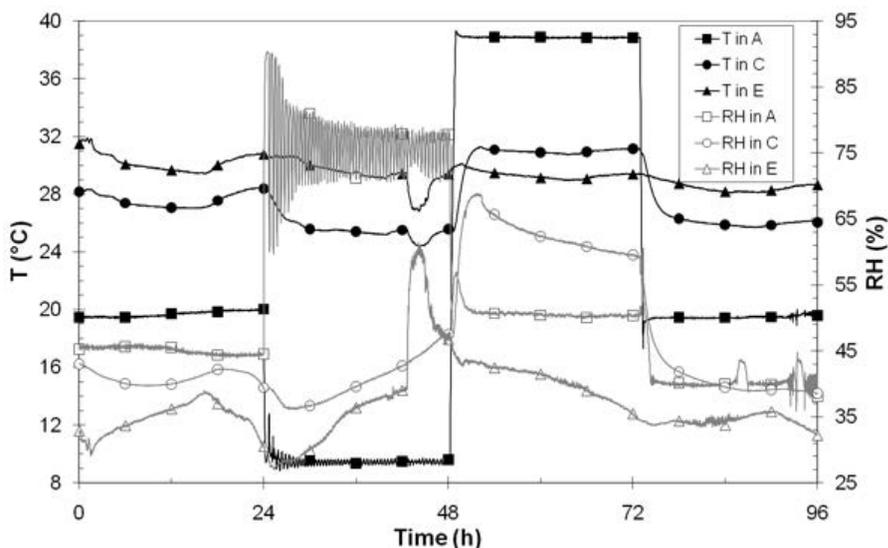


Figure 4 Evolution of the temperature and the relative humidity in points A, C and E for the wall not covered with a tight layer.

the relative humidity in the middle of the wall then increases suddenly. Within the wall, a relative humidity gradient is created between the “hot” zone of the specimen where the water vaporizes and the “cold” zone where there is no phase change: the water vapour then migrates towards the “cold” zone, which explains the decrease in relative humidity measured in the middle of the wall. Finally, during the fourth stage, the relative humidity in C decreases strongly before rising slightly and then stabilizing. The temperature drop in A is responsible for the vapour condensation which implies a relative humidity decrease in C: it then creates a relative humidity gradient within the wall and the water vapour migrates within the specimen, thus explaining the relative humidity increase measured in the middle of the wall.

By comparing graphs in figures 3 and 4, it can be noticed that the amplitude of the temperature variation measured in the middle of the wall without convective effects between the second and the third stage, is about 7°C. It is larger than that measured in the middle of this wall without the tight plastic film (approximately 5.5°C). The cellophane prevents indeed the water vapor interchange between wall and outside. During the second stage, a part of the water vapour contained in the specimen condenses: the energy release induced by this phase change then makes it possible to slow down the drop in temperature in the wall. For the sample without cellophane, the RH decrease within the specimen induced by the condensation is offset by a water vapor stream coming from the outside, which promotes the phenomenon of condensation and the cushioning of the drop in temperature. It thus follows that the temperature drop in the middle of the wall during the second stage is less damped when the specimen is covered with cellophane. During the third stage, a part of the liquid water vaporizes: the energy absorption induced by this phase change allows cushioning the increase in temperature in the wall. During the second stage, thanks to the water vapor stream coming from the outside and because of the phase changes which occur within the material, the wall without cellophane was able to build up a larger reserve of liquid water: during the third stage, the phenomenon of vaporization is thus more significant in this wall, which enables a better cushioning of the rise in temperature in C. Finally, the increase in temperature in the middle of the specimen during the third stage is less attenuated when the wall is covered with the cellophane.

<b>Hemp concrete</b>	<b>A-1</b>	<b>A-2</b>	<b>A-3</b>	<b>B-1</b>	<b>B-2</b>	<b>B-3</b>	<b>C-1</b>	<b>C-2</b>	<b>C-3</b>
$\lambda_{dry}$ ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )	0.099	0.102	0.107	0.079	0.080	0.101	0.073	0.083	0.084
$E_{dry}$ ( $W.s^{1/2}.K^{-1}.m^{-2}$ )	153	155	161	128	123	153	123	126	128

Table 5 Dry thermal conductivity and effusivity of each hemp concrete fabricated

In conclusion, it that hemp concrete behaves as natural **Material with Phase Changes**. Works in hand aim at studying the impact of different hemp shiv and several kinds of binders on the hygrothermal transfers within the material.

### Dry thermal conductivity and effusivity

The dry thermal conductivities and effusivities measured are shown in table 5. The hemp concretes based on binder A have higher dry thermal properties than the other concretes: this result can be related to the high dry thermal properties of the pure binder paste. These measured quantities will be implemented in a numerical model of coupled heat and mass transfers in order to model the hygrothermal transfers inside a hemp concrete wall (Samri, 2005).

## CONCLUSIONS

Hemp concrete made up of vegetable particles (hemp shiv) and a binder meets a strong need for building materials which are both environmentally and technically efficient. It allows storing CO<sup>2</sup> by recovering a by-product of hemp farming which is thus renewable and easily recyclable. The impacts of three kinds of binders and three shiv on the mechanical and thermal properties of concrete are assessed in this paper.

The specimens manufactured using an air lime-based binder have very good mechanical properties whereas the hemp concretes based on a Portland cement clinker and a hydraulic lime-based binder present very low mechanical properties, which is characteristic of a partial setting: a physico-chemical interaction between binder and shiv disrupts the mechanical setting of the hemp concrete. Moreover, the compressive strength of the material depends on the hemp shiv used: this may be correlated with the morphological characteristics of shiv (amount of fibers, size of hemp particles, etc.).

Finally, the hygrothermal transfers measurements carried out helped to highlight the important role played by the convective flows in the thermal control of a hemp concrete wall: the water vapor transfer coming from the outside promotes phase changes (condensation and vaporization) within the material and enables therefore to cushion significantly the temperature changes inside the wall. Due to these transfers, hemp concrete behaves as natural Material with Phase Changes.

## REFERENCES

- Arnaud, L., Cerezo, V. and Samri, D. (2006), Global approach for the design of building material containing lime and vegetable particles, in: The 6th International Symposium on Cement and Concrete, Xi'an, China, 1261-1265.
- Boutin, M.P., Flamin, C., Quinton, S. and Gosse, G. (2005) Analyse du cycle de vie de : Compounds thermoplastiques chargés fibres de chanvre et Mur en béton de chanvre banché sur ossature en bois, Technical Report (in French), INRA Lille.
- Cerezo, V. (2005) Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique, Ph.D. thesis (in French), MEGA INSA de Lyon.
- Collet, F., Bart, M., Serres, L. and Miriel, J. (2008) Porous structure and water vapour sorption of hemp-based materials, *Construction and Building Materials*, 22(6): 1271-1280.
- Elfordy, S., Lucas, F., Tancret, F., Scudeller, Y. and Goudet, L. (2008) Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete ("hempcrete") manufactured by a projection process, *Construction and Building Materials*, 22(10): 2116-2123.
- Glé, P., Gourdon, E. and Arnaud, L. (2011), Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity, *Applied Acoustics*, 72(5): 249-259.
- Gourlay, E. (2009), De la chènevotte au béton de chanvre, optimisation des propriétés mécaniques et hygrothermiques, Master's thesis (in French), MEGA ENTPE.
- Hustache, Y. and Arnaud, L. (2008), Synthèse des connaissances sur les bétons et mortiers de chanvre, *Construire en Chanvre* (in French).
- RP2C Commission. (2006), Règles professionnelles d'exécution d'ouvrages en béton de chanvre, Technical Report (in French), Commission "Règles Professionnelles Construction Chanvre" RP2C.
- Samri, D. (2008), Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction : approche expérimentale et modélisation numérique, Ph.D. thesis (in French), MEGA ENTPE.



**MATIÈRE  
ET DONNÉES**

—

**MATERIAL  
AND DATA**



# ÉTUDE HYGROTHERMIQUE DES PAROIS ANCIENNES ASSOCIÉES À DES MATÉRIAUX CONTEMPORAINS ISOLANTS

BURGHOLZER JULIEN<sup>1</sup>, DJAHANBANI KEIVAN<sup>1</sup>, FLOISSAC LUC<sup>2</sup>,  
HÉBERLÉ ÉLODIE<sup>1</sup>, PERRIN BERNARD<sup>3</sup>, VALKHOFF HANS<sup>2</sup>, VERVISCH-FORTUNÉ ISABELLE<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centre d'Études Techniques de l'Équipement (CETE-Est), Strasbourg - France

<sup>2</sup>Laboratoire de Recherche en Architecture (LRA), Toulouse - France

<sup>3</sup>Laboratoire des matériaux et durabilité des constructions (LMDC), Toulouse - France

## ABSTRACT

Building norms for thermal insulation have become much stricter, for newly built houses as well as for renovation. However, thermal insulation which does not take into account the hygrothermal qualities of the walls can have a negative effect on the vernacular building and defy the aims of sustainability. To address these problems the Hygroba research project, initiated by the French Ministry of Environment, assesses the hygrothermal impact of different insulation techniques applied to the walls of 'old' buildings, built before 1948. First a selection of 'old' wall types was made and the materials were examined in a laboratory to obtain their hygrothermal characteristics. Furthermore, for each wall type a set of insulation solutions was defined together with a number of climatic and hygrothermal parameters. These were tested with the WUFI 2D simulation software which allows the dynamic coupling of thermal and humidity flows and simulates the hygrothermal performance of a wall section. The main indicator is the evolution of the overall water content in different parts of the wall, especially at the interfaces of different layers of material in the wall build-up. The simulation results permit an assessment of the insulation techniques and materials which are best suited for 'old' walls, both from a hygrothermal and conservation point of view.

Keywords: Materials; sustainability; hygrothermal performance; rehabilitation; insulation.

## INTRODUCTION

Avec la mise en place du Grenelle de l'environnement, l'objectif de réduction de la consommation énergétique vise tout particulièrement le bâti existant, très consommateur en énergie primaire et notamment en chauffage. La réglementation thermique devient de plus en plus exigeante pour limiter les consommations d'énergie dans les bâtiments neufs

et permet désormais d'imposer des exigences pour la rénovation de l'existant achevé après 1948. La question se pose pour la réhabilitation des bâtiments réalisés avant cette date, appelés communément « bâti ancien » qui représentent près du tiers du parc de logements en France. Ce bâti se distingue des constructions plus contemporaines de part ses diversités et singularités constructives traditionnelles et vernaculaires et de ses qualités patrimoniales. Les travaux de rénovations thermiques du bâti ancien nécessitent donc la plus grande précaution ainsi qu'une bonne connaissance du fonctionnement hygrothermique de la paroi.

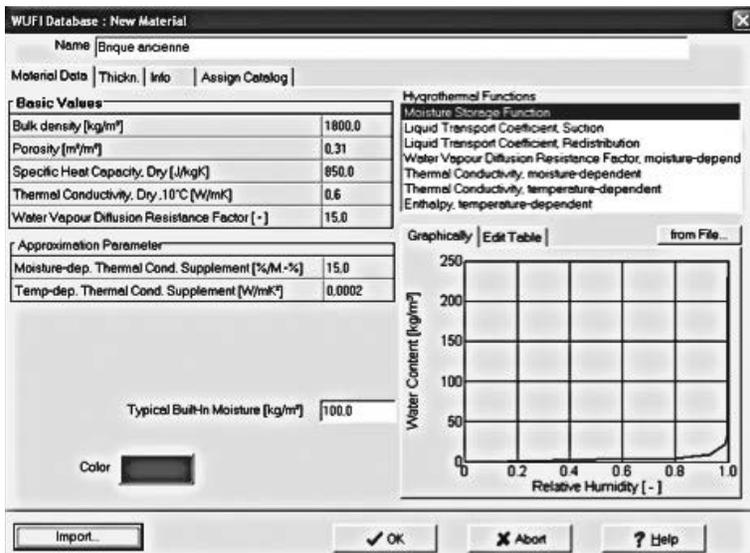
D'un point de vue réglementaire, les bâtiments anciens sont soumis à la « RT élément par élément », imposant entre autres, des performances thermiques minimales (isolation minimale) pour chaque élément de l'enveloppe faisant l'objet de travaux [RTB, 2012]. Mais l'approche actuelle qui consiste à isoler le bâti, en ne prenant en compte que le facteur thermique, risque d'altérer ces édifices à l'encontre de la durabilité recherchée. L'utilisation d'isolant ou de revêtement étanche provoque l'apparition d'humidité dans l'enveloppe des bâtiments. Cela est généralement attribué aux phénomènes de diffusion et de condensation de l'air humide intérieur [KUN, 2003]. Il y a cependant d'autres sources d'humidité, comme la pluie battante, les remontées capillaires, l'humidité de construction qui peuvent aussi affecter l'ensemble du bâti, qu'il soit existant ou neuf. Il en est de même pour d'autres phénomènes comme la condensation en été, les cycles humidification-séchage, le gel-dégel, le stockage transitoire d'humidité et la perte de chaleur par évaporation, qui peuvent soit entraîner des dommages, soit augmenter la consommation d'énergie.

Au contraire, en s'appuyant sur la spécificité des différents modes constructifs, du caractère vernaculaire du bâti ancien [MPF, 2007], du comportement des parois dans son ensemble, l'amélioration énergétique peut s'adapter à chaque configuration sans dégrader l'ensemble du bâti d'un point de vue constructif.

De récentes études ont démontré les problèmes d'humidité liés à l'isolation par l'intérieur de bâtiments anciens en brique, en utilisant des matériaux contemporains [EVR, 2010]. De même, le comportement hygrothermique de certains matériaux comme le chaux-chaivre [EVR, 2008] et [COL, 2004] ont fait l'objet d'étude en prenant en compte l'environnement. D'autres études comme BATAN, ont montré la complexité du comportement hygrothermique des parois dans leur globalité et démontré que pour faire évoluer les performances énergétiques du bâti ancien, il faudra tenir compte de leurs qualités hygrothermiques (inertie, hygroscopie, effusivité). Cette complexité empêche les modèles de calculs réglementaires de rendre compte pleinement des qualités thermiques des parois du bâti ancien. Cela nécessite de prendre en compte des précautions très particulières lors de la rénovation [BAT, 2010]. En effet, les parois anciennes sont composées généralement de matériaux dits « respirants », c'est-à-dire perméables à l'air et à la vapeur d'eau. Une modification du comportement hygrothermique des parois anciennes par l'emploi de matériaux contemporains étanches, suite à une rénovation, peut engendrer des désordres importants.

L'étude présentée ici constitue un travail préliminaire au projet HYGROBA (Hygrométrie du bâtiment ancien), projet ayant pour objectif de mieux comprendre le comportement thermique des matériaux du bâti ancien et qui étudie la compatibilité de différentes solutions d'isolation sur des parois anciennes. L'étude est réalisée au moyen de simulations hygrothermiques dynamiques réalisées avec le logiciel WUFI 2D de l'IBP-Fraunhofer. Il s'agit de mettre en avant, à travers un exemple de simulation sur une paroi en brique, les premiers résultats que peuvent donner les simulations dynamiques [HEB, 2011-1]. Cette étude relève également les contraintes que présentent de telles simulations et pose les bases de la réflexion menée tout au long du projet HYGROBA.

Figure 1  
Données WUFI  
relatives à la  
brique ancienne



1

## MÉTHODE

Pour pouvoir parvenir à l'objectif souhaité qui est de déterminer les solutions pérennes et efficaces d'un point de vue hygrothermique de différents types de parois réhabilitées, une méthodologie d'étude a été instaurée. L'étude s'est déroulée en plusieurs étapes, appelées tâches, en commençant par un état des lieux du parc existant et des différentes typologies constructives. Il a été retenu de travailler sur différents matériaux et différentes régions prenant en compte des mises en œuvre, des matériaux et des conditions climatiques très variés afin de déterminer les phénomènes physiques des transferts hygrothermiques.

Les premières tâches ont consisté en l'étude des différents éléments constituant une paroi « sandwich » dite isolée : les isolants manufacturés (laine de verre, polystyrène...), les isolants bio-sourcés (fibre de bois, ouate de cellulose...), les revêtements étanches ou respirants et les matériaux constitutifs de parois anciennes comme la brique pleine ou « foraine », le moellon, le pisé, le torchis et la pierre dure calcaire. Il n'a été retenu comme paramètres d'étude que ceux nécessaires à l'utilisation des logiciels comme WUFI 2D. Puis un protocole a été mis en œuvre afin de réaliser les simulations nécessaires à l'étude.

### Logiciel WUFI 2D :

Le logiciel WUFI 2D permet de simuler le comportement dynamique de la migration de la vapeur d'eau dans une paroi composée de plusieurs matériaux.

Pour pouvoir interpréter les résultats, il est nécessaire de bien déterminer les paramètres à utiliser afin de comparer des grandeurs semblables et de connaître les limites de chaque matériau. C'est pourquoi, afin de pouvoir utiliser dans les meilleures conditions WUFI2D et d'être au plus près de la réalité, tous les matériaux, relevés sur le bâti existant, ont été analysés en laboratoire et les paramètres ont été intégrés dans la base de données du logiciel (figure 1).

Il a été retenu plusieurs paramètres pour l'étude hygrométrique des parois dont les valeurs sont utilisées par Wufi, la chaleur spécifique, le facteur de diffusion de vapeur des matériaux (Figure 1), la teneur en eau réelle pour chaque valeur d'humidité relative, la porosité totale, la chaleur massique (valeur donnée pour un matériau sec) et la conduction

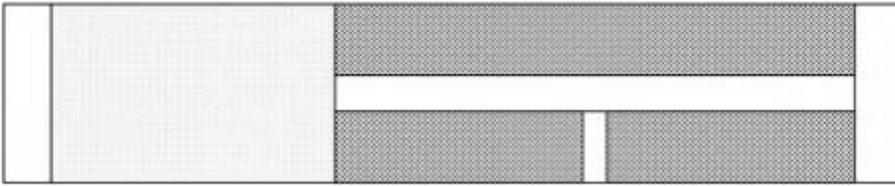


Figure 2  
Modélisation de la paroi ancienne constituée du matériau brique de terre cuite isolée dans WUFI 2D

2

thermique (valeur pour une teneur en eau nulle ( $\lambda$  sec)). D'autres caractéristiques ont été déterminées telles que la résistance à la vapeur d'eau :  $\mu_{sec}$  et  $\mu_{humide}$  ( $T^\circ=20^\circ\text{C}$  et  $HR=50\%$ ), la teneur en eau pour 80% d'humidité relative  $W_{80}$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) et  $W_f$  calculé à partir de  $W_{80}$  pour une humidité relative à saturation.

Le coefficient d'absorption  $A$  ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ ) est calculé à partir des courbes de diffusion de la vapeur d'eau selon la formule donnée par Wufi [KUN, 1994] : avec  $D_{ws}$  ( $\text{m}^2/\text{S}$ ) : coefficient de transport de liquide

En plus des matériaux in situ, analysés en laboratoire, les autres données apparaissant dans la bibliothèque de base de WUFI, ont été validées par des études complémentaires. Il a été retenu pour cette étude d'utiliser de manière préférentielle des matériaux issus de nos propres résultats plutôt que ceux d'une base de données de WUFI dont les données sont incertaines.

### Fiches caractéristiques des matériaux :

Une des tâches importante de ce travail a été l'étude des caractéristiques des matériaux nécessaire à l'utilisation du logiciel WUFI 2D et à l'élaboration de fiches recensant un maximum de matériaux relatifs aux modes constructifs dans le bâti ancien à notre disposition dans différentes régions de France ainsi qu'un grand nombre de matériaux nécessaires à la réhabilitation comme les revêtements, les pare-vapeurs et les isolants manufacturés et bio-sourcés.

### Protocole pour les simulations de l'étude préliminaire au projet HYGROBA :

#### Détermination de l'arborescence des cas

Il serait possible de modéliser un nombre presque infini de parois différentes mais certaines sont soit similaires soit inacceptables. Le but de l'arborescence est donc de déterminer un nombre limité de parois à étudier, les plus significatives possibles en prenant en compte les limites temporelles du projet.

Pour cette étude préliminaire au projet HYGROBA, nous avons retenu 16 cas d'isolation, 4 en isolation par l'extérieur et 12 en isolation par l'intérieur fonction du revêtement extérieur pour une paroi ancienne donnée et un type de climat.

#### Géométrie / Modélisation

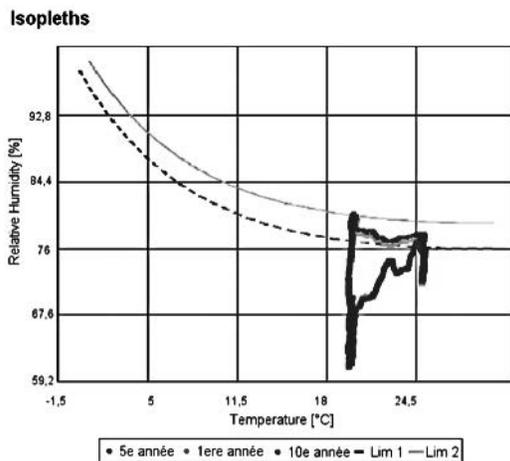
Pour réaliser les simulations, WUFI utilise des parois en 2 dimensions. Il faut donc pour chaque type de paroi définir une géométrie de modèle qui soit la plus réaliste, et la plus utilisée possible dans les constructions anciennes.

Cette paroi ancienne réhabilitée reçoit un revêtement intérieur et extérieur ainsi qu'une isolation. Elle est modélisée sous WUFI (figure 2). De gauche à droite : enduit extérieur, isolant, paroi ancienne et enduit intérieur.

#### Grille

Dans un second temps, on dessine une grille qui découpera des carrés élémentaires pour les simulations. La définition de cette grille influe sur la précision des résultats, et sur le temps de calcul. A chaque interface, le pas de la grille est réduit afin d'obtenir une étude plus affinée.

Figure 3  
Courbe isoplèthe  
WUFI



3

### Matériaux composants la paroi

Il est ensuite nécessaire de choisir les matériaux composant la paroi dans les différentes bases de données de WUFI, ou en ajoutant des matériaux dont on a étudié toutes les propriétés hygrothermiques.

### Conditions initiales et ambiantes

Les conditions initiales de la paroi sont fixées à 80% d'humidité dans tous les matériaux, et une teneur en eau correspondante selon les courbes de sorption.

Les conditions ambiantes comme les climats intérieurs et extérieurs sont aussi définis.

Pour l'extérieur, il a été choisi d'utiliser les climats de Nancy, les deux premiers étant plutôt humides et le troisième chaud et sec. Les climats intérieurs ont été calculés par rapport à chaque climat extérieur avec un ratio  $W/n$  ( $W$  est la quantité de vapeur produite dans le local en une heure (g/h) et  $n$  le taux horaire de renouvellement d'air ( $m^3/h$ )) égal à 5 (climat intérieur humide) et avec un  $W/n$  de 2,5 (climat intérieur sec).

### Ajout de sources

Les sources modélisent ici un défaut d'étanchéité de la paroi ancienne rénovée et permettent l'étude de la condensation par convection. Ce sont ces défauts qui permettent à l'air chargé d'humidité de pénétrer dans la paroi rénovée et de créer des dommages. Ces défauts d'étanchéité sont les plus regrettables dans les cas d'isolation par l'intérieur. Ils sont la conséquence de la non-continuité de la membrane gérant l'apport de vapeur ou de son percement et favorisent la formation de condensation interne entre l'isolant et la paroi ancienne [KUN, 2003], [DUG, 2003]. Il a été ajouté, dans les cas d'isolation par l'intérieur, une source d'humidité, arbitrairement fixée à 2% de la quantité de pluie battante impactant la surface extérieure (mesurée en  $L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ ), entre la paroi ancienne et l'isolant. L'objectif de l'ajout de sources d'eau simulant des défauts d'étanchéité doit permettre d'obtenir une plus grande dispersion dans les résultats des simulations isolées par l'intérieur.

### Détermination des grandeurs de sortie et développement d'un outil de traitement des données

Les paramètres de simulations étant fixés, des grandeurs de sortie ont été déterminées, c'est-à-dire des grandeurs physiques révélatrices du comportement des parois, faciles à analyser par la suite. Ils se présentent sous la forme de courbes, sur les 10 années de simulation avec un pas de temps d'une heure (soit 87 600 pas).

Les sorties classiques du logiciel WUFI 2D sont les teneurs en eau et l'humidité relative des différents matériaux entiers ou par couches, mais on peut aussi s'intéresser à d'autres grandeurs, comme les flux d'humidité ou les isoplèthes (figure 3). Développés par l'IBP-F, les isoplèthes sont des courbes d'humidité relative en fonction de la température, ils mettent en évidence les conditions de prolifération de moisissure sur les couches superficielles des parois [KUN, 1994]. Les limites sont des seuils de développement de moisissures élaborées par l'IBP-F.

Les sorties privilégiées pour l'analyse sont des courbes de température, de teneurs en eau, d'humidité relative, de flux à différents endroits de la paroi. Les résultats de toutes les simulations étant de même nature, il était nécessaire d'élaborer une feuille de calculs permettant de tracer directement toutes les courbes pour chaque cas étudié. Cet outil a ensuite permis de finaliser le protocole avec l'étude des cas « sans sources », avant de servir pour les simulations finales.

### **Réalisation des simulations :**

La réalisation d'une simulation se décompose en 5 étapes avec la préparation de la simulation sur WUFI 2D en accord avec le protocole, le calcul sous WUFI 2D, l'extraction des résultats sur WUFI Graphics, l'exportation de ces résultats sur Excel, et une première analyse du comportement de la paroi et de la véracité des résultats obtenus. Une fois toutes les simulations réalisées, ces résultats doivent être analysés et interprétés. Cette interprétation n'a de validité que lorsqu'on compare les différents cas entre eux, car le calcul est basé sur trop d'hypothèses pour être absolu.

## **RÉSULTATS DE L'ÉTUDE PRÉLIMINAIRE AU PROJET HYGROBA ET INTERPRÉTATIONS**

Dans un premier temps, le travail a consisté à rendre compatibles les valeurs caractéristiques des matériaux du bâti ancien testés au laboratoire, avec ceux de la base de données de WUFI, sous un format accessible à tous. Chaque matériau a ses propres caractéristiques permettant son identification et l'on ne peut accepter de manière scientifique des données non significatives. Le plus difficile était de pouvoir récolter toutes les caractéristiques d'un même matériau par l'analyse, ce qui n'a pas pu être toujours le cas, les matériaux étant quelquefois détériorés.

Il a finalement été décidé que les résultats des mesures faites au laboratoire ne serviraient qu'à titre indicatif dans le cas où une donnée manquerait, pour nous aider à choisir des matériaux correspondants dans la base de données de WUFI lorsque celle-ci était suffisamment bien référencée. Les différentes données issues d'essais sur les matériaux à notre disposition et confrontées aux données trouvées dans la littérature [COL, 2004] comme Masea, sont mises sous forme de tableau. Les données nécessaires à l'exploitation des résultats étant validées, les teneurs en eau globales de la paroi peuvent passer au crible de l'algorithme en vue d'en tirer des conclusions sur la rénovation hygrothermique d'une paroi isolée.

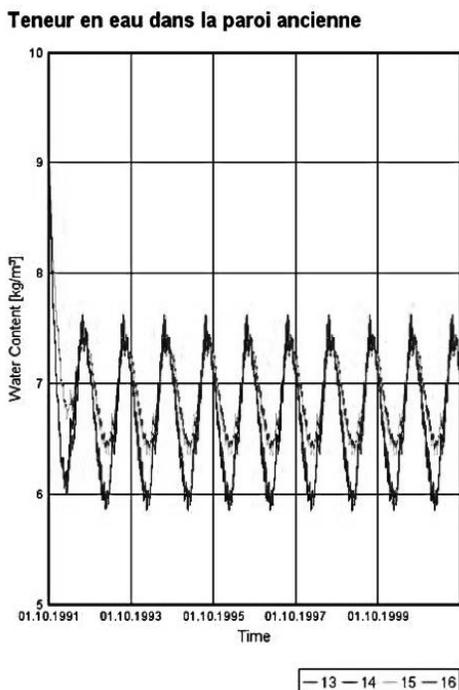
Afin de ne pas compliquer encore plus l'étude de la performance hygrothermique de la paroi en brique rénovée par exemple, il a été pris le parti d'étudier l'influence des solutions d'isolation sur la teneur en eau uniquement dans la paroi ancienne pour s'assurer de sa pérennité et à l'interface entre l'isolant et la membrane gérant l'apport de vapeur, pour une période de 10 ans. La qualité d'une solution d'isolation est jugée dans un premier temps sur un seul critère : celui de l'accumulation d'eau dans le matériau étudié.

L'analyse des résultats devrait nous permettre de répondre aux questions suivantes:

La teneur en eau de la solution étudiée atteint-elle le régime permanent au bout de 10 ans ?

Si oui, l'atteint-elle pour une valeur moyenne inférieure ou supérieure à la teneur en eau moyenne de la paroi avant isolation ? Et la solution est-elle acceptable ?

Figure 4  
 Comparaison  
 des teneurs en  
 eau de la paroi  
 ancienne pour  
 les différentes  
 solutions  
 d'isolation.



4

#### - Cas de l'isolation par l'extérieur

Prenons le cas d'une paroi en brique avec isolation par l'extérieur dans la région de Nancy, un climat intérieur humide  $R_h=80\%$  avec une isolation soit en fibre de bois (courbes 13,14), soit en polystyrène (courbes 15,16). L'enduit extérieur est respirant pour les cas 13 et 15 et étanches pour les 14 et 16. Voici un exemple de comparaison et d'analyse des résultats de différentes simulations (figure 4) :

Deux comportements sont observés :

Les courbes de teneur en eau dans la paroi ancienne (13, 14) présentent une amplitude d'environ  $1,5 \text{ kg/m}^3$  avec une valeur moyenne de  $6,75 \text{ kg/m}^3$ .

Les courbes de teneur en eau dans la paroi ancienne (15, 16) présentent une amplitude de  $1 \text{ kg/m}^3$  avec une valeur moyenne de  $6,80 \text{ kg/m}^3$ .

De façon générale l'isolation par l'extérieur conduit à une diminution globale de la teneur en eau dans la paroi ancienne quelle que soit la solution d'isolation choisie.

De plus, le régime permanent est très rapidement atteint et pour une teneur en eau inférieure à la teneur en eau de départ.

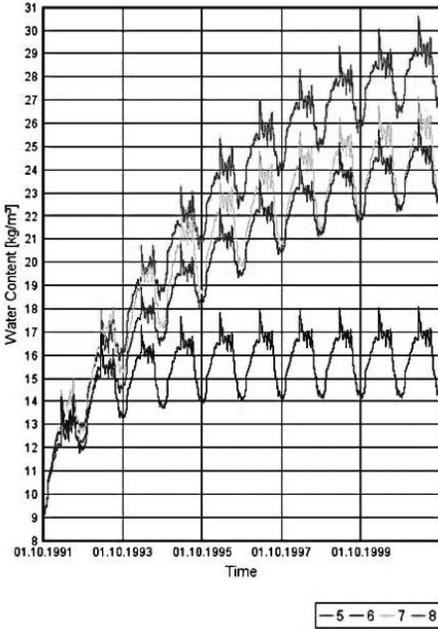
#### - Cas de l'isolation par l'intérieur

Les parois étudiées ici sont composées de briques recouvertes soit d'un enduit respirant (5, 6, 7 et 8), soit d'un enduit étanche (9, 10, 11 et 12). L'isolation intérieure est soit une laine minérale (7,8,9 et 10) soit une cellulose (5,6, 11 et 12). Des pare-vapeurs (5, 8, 9, 12) ou frein-vapeurs (6, 7, 10 et 11) sont mis en œuvre présentant des défauts.

Nous considérons qu'une membrane gérant l'apport de vapeur est toujours mise en œuvre lorsqu'il s'agit d'une isolation par l'intérieur avec une laine semi-rigide.

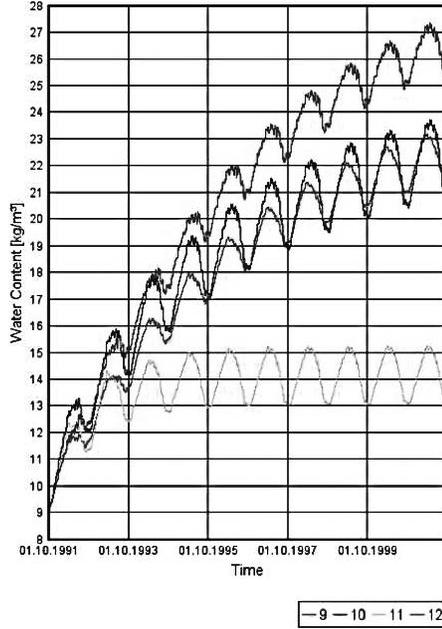
On constate que l'isolation par l'intérieur conduit à une augmentation globale de la teneur en eau dans la paroi ancienne (figures 5 et 6). Pour une solution d'isolation en ouate de cellulose et un frein vapeur-intelligent (6 et 11), quelque soit le revêtement extérieur, le régime permanent s'établit plus vite, avant la fin de la simulation et pour une teneur en eau moins élevée que pour d'autres de l'ordre de  $15 \text{ kg/m}^3$  en moyenne.

Teneur en eau dans la paroi ancienne



5

Teneur en eau dans la paroi ancienne



6

Figure 5 et 6  
Teneur en eau  
dans la brique  
vs temps pour  
différentes parois

Les courbes de teneur en eau pour la paroi ancienne présentent toutes une amplitude d'environ  $4 \text{ kg/m}^3$  pour les solutions dont l'enduit extérieur est un enduit de chaux et de  $2 \text{ kg/m}^3$  pour les solutions dont l'enduit extérieur est un enduit de ciment. La forme des périodes est également différente selon la nature de l'enduit extérieur (chaux : 5, 6, 7 et 8) est irrégulière et présente des pics de teneur en eau d'environ  $1 \text{ kg/m}^3$ . Par contre, les courbes (9, 10, 11 et 12) relatives à l'enduit ciment ont des formes plus régulières.

Les solutions 6 et 11, qui correspondent à la mise en œuvre de ouate de cellulose et d'un frein-vapeur intelligent sont à privilégier. Viennent ensuite les solutions 5 et 12, qui correspondent à la mise en œuvre de ouate de cellulose et d'un pare-vapeur présentant des défauts d'étanchéité, puis les solutions 7 et 10, qui correspondent à la mise en œuvre de laine minérale et d'un frein-vapeur intelligent présentant des défauts d'étanchéité et enfin les solutions 8 et 9, qui correspondent à la mise en œuvre de laine minérale et d'un pare-vapeur présentant des défauts d'étanchéité.

Si l'on regarde à présent l'évolution de la teneur en eau à l'interface entre la membrane et l'isolant (figures 7 et 8), on constate que la teneur en eau dans le cas de l'isolation en ouate de cellulose avec pare-vapeur classique (courbes 5 et 12) est plus importante avec des variations d'amplitude de  $12 \text{ kg/m}^3$  ne cessant de s'amplifier.

Les solutions en ouate de cellulose avec frein vapeur (courbes 6 et 11) sont toutefois acceptables, la teneur en eau se stabilisant dans le temps sans dépasser  $5 \text{ kg/m}^3$ .

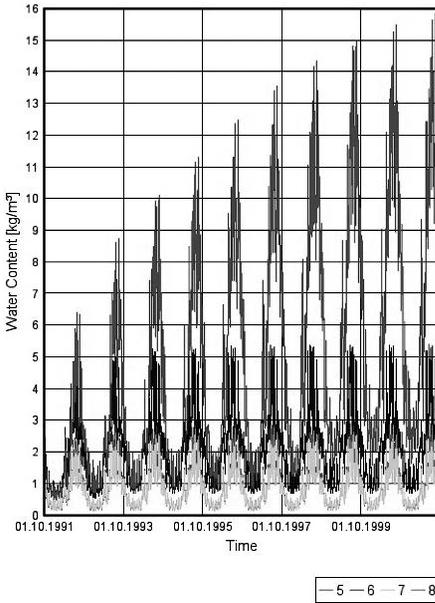
Les solutions 7 et 10 correspondant à la laine minérale avec frein-vapeur intelligent sont à privilégier, quel que soit l'enduit extérieur.

## ANALYSE ET DISCUSSION

Dans le cas d'une isolation par l'extérieur, le séchage de la paroi ancienne est facilité par sa proximité avec la surface intérieure. De plus, l'isolant empêche l'humidité provenant de

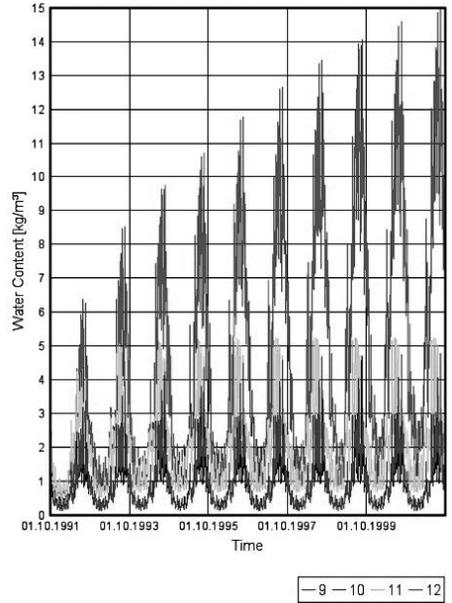
Figure 7 et 8  
Teneur en eau  
à l'interface  
vs temps pour  
différents parois

Teneur en eau à l'interface entre la membrane  
gérant l'apport de vapeur et l'isolant



7

Teneur en eau à l'interface entre la membrane  
gérant l'apport de vapeur et l'isolant



8

la pluie de pénétrer jusqu'à la paroi. C'est pourquoi l'isolation par l'extérieur ne provoque aucune augmentation de la teneur en eau dans la paroi ancienne, quel que soit le cas envisagé.

Par contre, l'isolation par l'intérieur a tendance à empêcher le séchage de la paroi ancienne vers l'intérieur et à la soumettre à une charge accrue d'humidité, conséquence de sa proximité avec la surface extérieure, elle-même soumise à la pluie battante. L'objectif étant de préserver au maximum la paroi ancienne (brique foraine) de l'humidité, la ouate de cellulose combinée à un frein-vapeur intelligent (6 et 11) est à privilégier. La paroi ancienne étant le matériau porteur de la paroi, il est primordial de ne pas trop perturber son équilibre hygrothermique, sous peine de voir se dégrader ses propriétés mécaniques et à terme, la stabilité de la structure toute entière. La teneur en eau dans la paroi ancienne s'en trouve augmentée d'au plus 80%, tandis que pour les autres solutions, elle s'en trouve augmentée d'au moins 150%.

La combinaison d'un isolant hygroscopique et capillaire et d'un pare-vapeur (5 et 12) n'est pas satisfaisante car l'humidité de la paroi n'a plus la possibilité de sécher vers l'intérieur, ce qui conduit inexorablement à l'augmentation de la teneur en eau dans la paroi ancienne. De même, la combinaison d'un isolant non hygroscopique et non capillaire et d'un frein-vapeur intelligent (7 et 10), en plus d'être inutile, conduit aux mêmes conclusions. En effet, l'humidité contenue dans la paroi ancienne n'a pas la possibilité de migrer dans l'isolant, ni, a fortiori, d'atteindre la surface du frein-vapeur où elle pourrait éventuellement sécher.

Enfin, la combinaison d'un isolant non hygroscopique et non capillaire et d'un pare-vapeur est à proscrire pour l'ensemble des raisons présentées précédemment.

Si l'on s'en réfère au seul critère d'étude envisagé dans un premier temps, les solutions d'isolation par l'intérieur ne posent pas de problème d'accumulation d'eau à l'interface membrane / isolant. En effet, la teneur en eau augmente significativement à un moment de l'année à l'interface entre l'isolant hygroscopique et le pare-vapeur présentant des défauts

d'étanchéité, mais diminue pour revenir à un taux initial chaque année. Cela signifie donc que le pare-vapeur n'empêche pas le séchage de la portion d'isolant en contact avec celui-ci. Pourtant, il avait été déduit de l'étude de la teneur en eau globale dans l'isolant (non présentée ici) que dans cette configuration, l'isolant ne pourrait sécher vers l'intérieur. Il avait été également émis l'hypothèse que dans les conditions de mise en œuvre d'un isolant non hygroscopique combiné à un pare-vapeur présentant des défauts d'étanchéité, l'eau devait s'accumuler à l'interface entre l'isolant et le pare-vapeur. Or il apparaît clairement sur les graphiques que les solutions 8 et 9 ne présentent pas de signes d'accumulation d'eau à cette interface.

Ainsi, l'étude de cette interface jette le doute sur ce qui a été dit précédemment. Deux raisons peuvent expliquer cela. Tout d'abord, seule la portion d'isolant en contact avec le pare-vapeur peut sécher vers l'intérieur contrairement aux portions plus en amont, expliquant l'accumulation d'eau globale dans celui-ci. De plus, il n'était peut-être pas raisonnable d'envisager qu'une portion de matériau pouvait constituer une interface aussi petite soit-elle, en contact avec un autre matériau. En effet, une interface entre deux matériaux est censée n'appartenir à aucun de ces deux matériaux. Ceci expliquerait le fait que nous n'observons pas d'accumulation d'eau le long du pare-vapeur. Malgré des résultats corroborant des prévisions théoriques et des constats, quelques points restent en suspens.

Un des points importants est que les simulations n'ont pas permis de différencier la mise en œuvre du polystyrène de celle des panneaux de fibre de bois (ni d'ailleurs celle de l'enduit extérieur au ciment de celle de l'enduit extérieur à la chaux). Pourtant, le polystyrène, non hygroscopique, non capillaire et imperméable à la vapeur d'eau, devrait, tout comme l'enduit de ciment, empêcher le séchage de la paroi ancienne vers l'extérieur. Sachant que l'intégrité des données de la base de données du logiciel WUFI 2D concernant le polystyrène ne peut difficilement être remise en cause, nous pouvons ici envisager deux possibilités : soit, l'augmentation de la teneur en eau induite par la mise en œuvre du polystyrène s'observe à l'interface entre la paroi ancienne et l'isolant et ne saurait donc être décelée à l'échelle globale de la paroi ancienne (dont la teneur en eau est moyennée sur toute la surface de cette dernière). Soit, les phénomènes à l'origine de l'accumulation d'eau à l'interface entre l'isolant et la paroi ancienne ne sont pas correctement identifiés.

De même, l'analyse des courbes n'a pas permis de différencier la mise en œuvre d'un enduit à la chaux de celle d'un enduit ciment. Le fait qu'un enduit extérieur au ciment est incompatible avec la nature du bâti ancien est pourtant un fait communément admis par la plupart des professionnels du bâtiment. La raison avancée est qu'il empêche le séchage de la paroi ancienne vers l'extérieur, ce qui provoque à terme l'éclatement de l'enduit. Cela peut s'expliquer par le fait que l'augmentation de la teneur en eau induite par la mise en œuvre d'un enduit au ciment s'observe à l'interface entre la paroi ancienne et l'enduit extérieur et ne saurait donc être décelée à l'échelle globale de la paroi ancienne (dont la teneur en eau est moyennée sur toute la surface de cette dernière). De même, les enduits au ciment et à la chaux de la base de données de WUFI 2D ne reflètent pas la réalité et leurs propriétés devraient être plus contrastées.

L'utilisation de sources d'eau dans les simulations, jugées trop peu réalistes (rappel : la source d'humidité entre la paroi ancienne et l'isolant a été arbitrairement fixée à 2% de la quantité de pluie battante impactant la surface extérieure), a dû être justifiée de manière très précise pour être validée et vérifier les limites de Wufi 2D.

La manière dont cette source d'humidité a été définie est en effet discutable pour deux raisons :

- La vapeur d'eau qui condense éventuellement à l'interface entre la paroi ancienne et l'isolant et qui transite par les défauts d'étanchéité provient de l'intérieur : elle n'est donc pas liée aux conditions climatiques extérieures.
- La quantité d'eau présente à cet endroit est fonction de l'humidité relative régnant dans l'ambiance intérieure mais aussi de la gravité des défauts d'étanchéité de la paroi intérieure : elle n'est donc pas fonction de la quantité de pluie battante impactant la surface extérieure de la paroi.

Un modèle simplifié de sources d'eau de condensation avait déjà été utilisé par l'IBF mais avec le logiciel WUFI PRO [KUN, 1994]. Cependant, on peut penser que l'air qui traverse la paroi entraîne avec elle de l'eau qui viendra ensuite se condenser à la sortie de l'isolant à l'interface de la paroi ancienne dans les zones plus froides du mur. Il a donc été mis en place une méthode de calcul des flux d'air traversant une paroi comprenant des défauts d'étanchéité, en prenant en compte les humidités relatives et pressions atmosphériques intérieures et extérieures, la vitesse du vent, la taille du trou dans la paroi [HEB, 2011-2]. Il a donc été retenu de considérer la source d'humidité qui est située à l'interface entre l'isolant et la paroi ancienne, calculée à partir du modèle développé à l'occasion du projet HYGROBA. Tous ces points seront intégrés au projet final HYGROBA.

## CONCLUSION

Pour la paroi ancienne en brique que nous avons choisi de présenter ici, l'étude a montré que l'isolation par l'extérieur est dans tous les cas préférable à l'isolation par l'intérieur car elle n'entraîne pas d'augmentation de la teneur en eau dans la paroi ancienne. Cependant, du fait des contraintes patrimoniales ou techniques fortes régnant sur ce genre de construction, il n'est souvent pas possible d'isoler par l'extérieur. Dans ce cas, il est impératif de privilégier la mise en œuvre d'un isolant hygroscopique et capillaire, tel que les panneaux de fibre de cellulose, combiné à celle d'un frein-vapeur intelligent, sous peine de voir la teneur en eau s'accumuler à l'intérieur de la paroi ancienne. D'autre part, dans le cas d'une isolation par l'intérieur, si la parfaite étanchéité du pare-vapeur ne peut pas être garantie (lors de la phase de chantier), alors l'intégrité d'un isolant hygroscopique et capillaire et du pare-vapeur est menacée et il est alors préférable d'opter pour un frein-vapeur intelligent. L'étude des interfaces entre les différents matériaux a été très délicate et demande une prospection supplémentaire car la plupart des dommages sont observés à ces endroits tels que l'éclatement des enduits extérieurs ou le développement des moisissures le long du pare-vapeur. En plus de ces conclusions propres aux parois en briques, cette étude a permis de bâtir un protocole de simulation complet, intégrant la question des sources d'humidité, qui sera appliqué à un ensemble de parois anciennes dans le cadre du projet HYGROBA.

## REFERENCES

- Bourru L. (2010), Quel comportement thermique du bâti ancien ? Rencontres de la rénovation thermique ; 19 mars 2010, Grenoble
- Collet F. (2004), Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux, Thèse INSA 2004
- Dugué A., Betbeder F. (2010), Evaluation des risques liés à l'humidité dans le cas d'une isolation thermique par l'intérieur de murs anciens : étude de cas
- Evrard A. (2010), Isolation Thermique par l'intérieur des murs existants en briques pleines
- Evrard A. (2008), Transient hygrothermal behaviour of lime-hemp materials, thèse EPL
- Héberlé E. (2011), Etude des transferts hygrothermiques dans les parois de bâtiments anciens : modélisation, solutions de réhabilitation, TFE ENTPE
- Héberlé E. (2011), Prise en compte des infiltrations d'air dans l'étude de la performance hygrothermique de l'isolation par l'intérieur, Master MEGA-INSA de Lyon
- Kumaran M.K. (1996), IEA : International Energy Agency, ANNEX 24, Final Report Vol.3, TASK 3 : Material Properties, Canada
- Künzle H., Holm A. (1994), WUFI : Simulation des transferts de chaleur et d'humidité dans l'enveloppe de bâtiment, (IBF) Fraunhofer-Institut Bauphysik
- Künzle H. (2003), Pare-vapeurs pour la protection de l'enveloppe des bâtiments contre un excès d'humidité, Fraunhofer-Institut Bauphysik, Holzkirchen
- MPF (2007), Connaissances des bâtiments anciens et économies d'énergie, DGHUC/CETE DE L'EST /DGCB-LASH/MPF
- RTB (2012), Réglementation thermique des bâtiments existants : articles L. 111-10 et R.131-25 à R.131-28 du Code de la construction et de l'habitation ainsi que sur leurs arrêtés d'application



# DECISION AIDING & MULTI CRITERIA GENETIC OPTIMIZATION FOR EXISTING BUILDINGS HOLISTIC ENERGY RETROFIT

THE DESIGN OF EFFICIENT RETROFIT STRATEGIES  
FOR ENERGY CONSERVATION AND ENVIRONMENTAL  
IMPACTS MITIGATION

BAVEREL OLIVIER<sup>2</sup>, PEUPORTIER BRUNO<sup>3</sup>, RIVALLAIN MATHIEU<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université Paris-Est, Laboratoire Navier (UMR 8205), CNRS, ENPC, IFSTTAR - France

<sup>2</sup>Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble - France

<sup>3</sup>Centre Énergétique et Procédés, MINES ParisTech - France

## ABSTRACT

Building design is multi criteria. In view of the increasing environmental burdens related to the development of our modern societies, buildings environmental impacts have to be considered, at early design stage. Moreover, the existing stock replacement rate is inferior to 1% annually, in most of developed countries. Consequently, existing building stocks energy retrofit represents a major lever towards energy consumptions mitigation, under our latitudes. Yet, the identification of optimal sustainable retrofit strategies, including actions planning over time, is still a difficult task for professionals. The present paper is a contribution to decision aiding through multi criteria optimization of energy retrofit programs. A multi criteria genetic algorithm (NSGA-II) is used to optimize retrofit programs on both their content and planning. The retrofit measures address building envelopes and the replacement of equipment. The objective functions target environmental impacts, financial indicators and occupants' well-being, on building life cycle. This approach contributes to decision aiding by identifying efficient energy retrofit strategies, at a building scale, on a multi criteria basis, over life cycle.

Keywords: multi-criteria, optimization, building retrofit, sustainability

## INTRODUCTION

From the initial and fundamental objective of protecting human beings and their activities from exterior climate conditions, buildings expected performances have significantly evolved and increased over time. Today, buildings have to fulfil numerous objectives involving both regulations compliance and client expectations: architectural quality, structural and fire safety; durability; thermal, visual and acoustic comfort; interior air quality; energy consumptions mitigation, etc.

In the context of increasing environmental burdens related to the development of our modern societies, the search for building quality in use has also to take into account the environmental impacts, at early design stage. Indeed, the preservation of energy and the improvement of indoor environmental quality have been set as clear orientations by the European energy policy (EC, 2003) (CEN, 2006).

Under our latitudes, existing buildings energy consumptions -related to the use phase: heating, cooling, ventilation, domestic hot water production (DHW), and lighting - are responsible for significant environmental burdens. Moreover, the replacement rate of existing buildings is inferior to 1 % per year, in most developed countries.

Consequently, existing stock retrofit represents a major lever to reach national and international commitments on climate change and non renewable energy consumption mitigation (IEA, 2008).

However, the identification of optimal sustainable retrofit programs, including actions planning over a time period, is still a difficult task for professional sector. Alanne (2004) argues that most operational approaches are based on iterative building simulations guided by professionals experience (Alanne, 2004) (Tanimoto et al., 2001).

This paper is a contribution to decision support for building energy retrofit design. An approach for the identification of efficient strategies and description of trade-off solutions, through genetic multi criteria optimization, is presented.

## MULTI CRITERIA OPTIMIZATION FOR BUILDING RETROFIT DECISION SUPPORT

### Search space

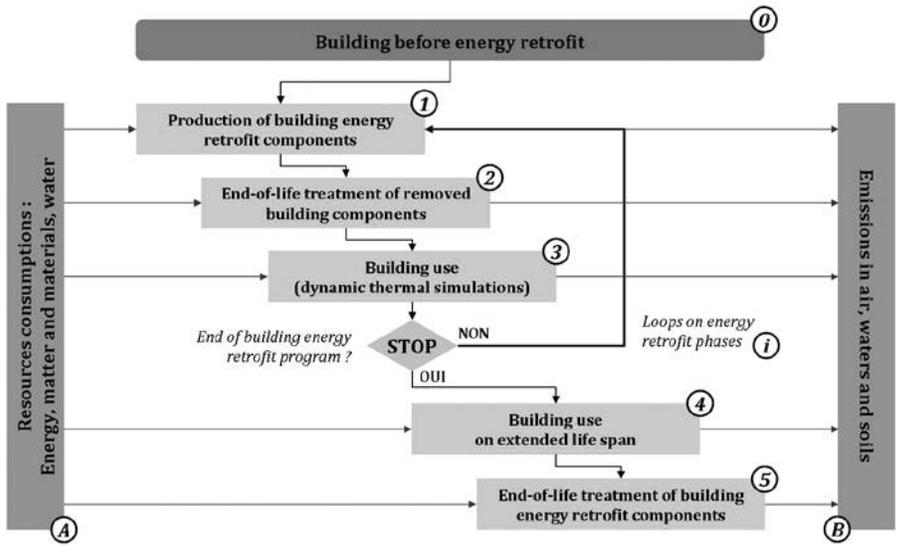
The search space is defined as a set of building energy retrofit programs, characterized by both their content and planning. The content refers to the combination of energy retrofit measures implemented, addressing holistically building envelopes (thermal insulation on façades, bottom floor and roof; windows replacement; windows to wall ratios), and the replacement of equipments for ventilation, heating and DHW production. For each of these retrofit measures, various alternatives are studied. They are considered to be discrete variables because of industrial constraints related to production. The planning refers to the permutation of these measures, defining the time sequence for implementation. From a mathematical standpoint, the solutions are permutations of discrete variables. The problem is combinatorial.

### Decision criteria

The potential solutions -building energy retrofit programs - are evaluated on a multi criteria and lifecycle basis.

The objective functions considered target environmental impacts (i.e. primary energy consumption, climate change potential, abiotic resources depletion, etc.), financial indicators (i.e. investment cost, global cost), and occupants' well-being (adaptive summer thermal comfort indicator), over life cycle. Global cost is the sum of investments in retrofit actions and energy consumptions cost, over the building extended life cycle. Summer thermal comfort is evaluated thanks to the definition of a comfort temperature depending on outside climate conditions evolution over a few days. Some objectives are obviously conflicting (investment cost and primary energy mitigation), trade-offs have to be identified.

Figure 1  
LCA and LCC  
models, over  
retrofitted building  
extended life  
cycle.



1

Figure 1 represents the life cycle assessment (LCA) and life cycle cost (LCC) models implemented to assess solutions performances. Over the lifecycle steps ((1) to (5)), materials and energy consumptions (A) and emissions (B) are related to environmental and economic impacts through LCA (Ecoinvent 2007 database) and LCC databases. The use phase is modelled by a consumption of energy related to heating, cooling, ventilation and DHW production. Heating loads and thermal comfort are evaluated through building dynamic thermal simulation. The present LCA model doesn't account for materials transportation (from factory to construction site), operations on site and maintenance over lifecycle.

### Multi criteria approaches for energy retrofit decision support

The present decision problem is multi criteria, the decision space is finite. All the solutions are identified both by their content and planning, yet their performances are not known a priori. In this case, various methodologies can support multi criteria decision making. There are roughly two types of methods: preference based approaches and generative approaches (Deb, 2002).

Preference based methods include classical transformations from a multi criteria to a mono criterion optimization problem: weighting, goal programming, E-constraints, etc. These procedures generally require some knowledge of the solutions, to set weights, constraints or goals. They lead to the identification of a single solution. Moreover, weighting procedures are sensible to problem convexity properties. If the problem is non convex, some solutions may not be accessible to decision (Deb, 2002).

Generative approaches aim at providing the decision makers with a set of good trade-off solutions, describing the various compromises that can be considered. These ones are often represented by the Pareto frontier, being the set of non-dominated solutions among the considered alternatives. By definition, a given solution is said to be non-dominated if there is no other solution, from the set of considered alternatives, being no worse in all objectives and strictly better in at least one objective (Deb, 2002). Figure 2 represents the Pareto frontier and the dominated solutions for a two objectives minimization problem.

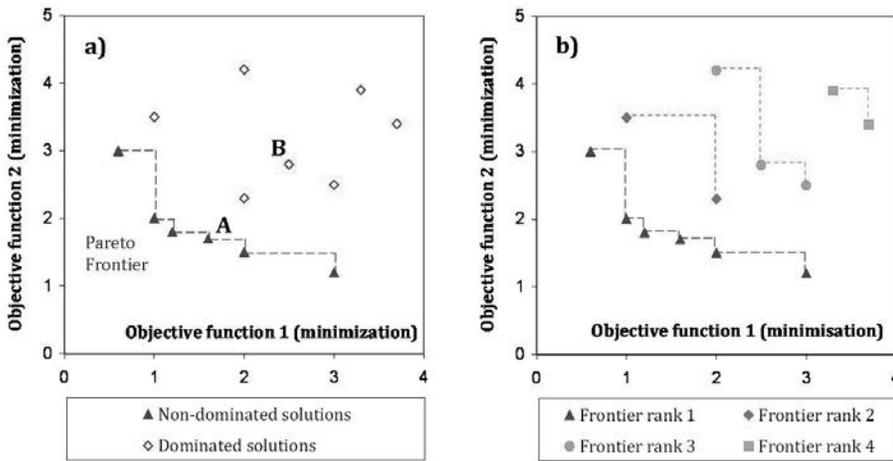


Figure 2  
Example of dominated solutions and Pareto frontier

2

The present contribution addresses decision aiding based on generative approaches. The search for the Pareto frontier can be supported by multi criteria optimization. The considered problem is combinatorial, the variables are discrete, and the objective functions are implicit (involving dynamic thermal simulations). Thus, the optimization methods classification set by Collette & Siarry (2002) suggests using metaheuristics. These stochastic approximate methods are adapted to the search for optimal solutions on rather large search spaces. Facing a given problem, the practical relevance of a metaheuristic in comparison to the others is still an open question (Dréo et al., 2003). We decided to implement a genetic algorithm considering previous successful applications on building design problems (Pernodet Chanterelle, 2010).

## MULTI CRITERIA GENETIC OPTIMIZATION FOR BUILDING SEQUENTIAL ENERGY RETROFIT

Genetic algorithms (GA) are stochastic optimization methods inspired from the Evolution theory mechanisms. Solutions are represented by chromosomes, which are sets of genes. The alleles coded on genes account for the values taken by specific describing parameter, for a given solution. Regarding building energy retrofit, the solutions are energy retrofit programs. They are represented by two chromosomes: one coding the content, the other for the planning. Each gene of the content chromosome represents a specific retrofit measure. The allele is the alternative considered for the given retrofit measure. Each gene of the planning chromosome stands for the position of a given retrofit measure in the time sequence.

GAs base the exploration of the search space on the evolution of a population of solutions, over generations. At each generation, the performances of population's solutions are assessed. Then, best solutions are selected for reproduction. The offspring is generated by crossover and mutation operations from parents' chromosomes. Finally, a selection procedure is applied to build the population of the next generation, from the current parents' population and the generated offspring. The evolution of the random initial population over generations improves solutions quality and the description of accessible trade-offs.

Multi criteria genetic optimization includes a broad variety of algorithms. The Non Dominated sorted algorithms (NSGA-II) implemented in this work has demonstrated

**Table 1**

Barre Grimaud, envelope and systems features, before energy retrofit.

<b>External walls</b>	Coating (20) + solid concrete blocks (150) + air layer (10) + plaster (50)
<b>Bottom floor</b>	Concrete slab (150) above cellars + mortar (50) + tiles (10)
<b>Intermediate floors</b>	Concrete slab (150) + mortar (50) + tiles (10)
<b>Terrace roof</b>	Gravels (30) + bitumen (4) + Concrete slab (150)
<b>Windows</b>	Single glazing with PVC frames
<b>Ventilation</b>	Non modulated mechanical ventilation
<b>Heating system</b>	Collective gas boiler, installed before 1988
<b>DHW production</b>	Individual gas boiler

good performances over various test problems (Zitzler et al., 2000).

This algorithm implements a differentiated operator for selection. Solutions are first sorted into Pareto frontiers. Non dominated solutions are assigned to the Pareto frontier ranked 1. The remaining solutions are iteratively attributed to Pareto frontiers of increasing ranks. Then, solutions are assigned a “crowding distance”. This indicator represents the relative distance separating a given solution from its closest neighbours, on the Pareto frontier they belong to. Solutions are then selected according to: first, the rank; and second, the crowding distance they have been assigned. This approach targets both solutions quality and dispersion on the compromise surface they describe.

## BUILDING RETROFIT CASE STUDY

The multi criteria genetic algorithm (NSGA II) presented has been implemented to study sequential energy retrofit programs. The construction considered for this case study is a multi family building, referred to as “barre Grimaud” in the following developments. Barre Grimaud is a five-storey multi family building, located in Paris suburban area. The construction was completed in 1974, before the introduction of the first building energy regulation in France (1975). The 10 enclosed apartments represent a floor area of 792m<sup>2</sup>.

### Barre Grimaud description, before energy retrofit

Table 1 details the building envelope and the systems used for heating, ventilation and domestic hot water production (DHW), at present state, before energy retrofit. Thicknesses are given in mm. The envelope composition is detailed from exterior to interior. Before the retrofit actions, the building envelope is not thermally insulated. The set point temperature is 19°C from early October to late April. During the summer, solar protections (louvers) are used to improve thermal comfort. Occupation scenarios do not depend on the retrofit program assessed. A three zone thermal model has been associated to the building: ground floor, intermediate floors, and top floor.

### Retrofit programs content and sequence

For each energy retrofit program, the content is defined as a combination of options chosen from the 8 retrofit measures classes presented on Table 2.

Thermal insulation, window type and ratio can be differentiated according to the façades. For a given retrofit program, the design (nominal power) of the condensing gas boiler is adapted to the building heating demand, at the retrofit step considered for boiler replacement.

From the sequence standpoint, each of the retrofit measures classes is considered for a different step of the retrofit program, except windows resizing. Windows replacement and resizing get necessarily involved at the same retrofit step, considering economic

**Table 2**  
Energy retrofit options considered for Barre Grimaud (thicknesses given in mm)

<b>External walls</b>	Mineral wool exterior insulation (100, 150, 200 or 250)
<b>Bottom floor</b>	Polystyrene exterior insulation (100, 150, 200 or 250)
<b>Terrace roof</b>	Polyurethane exterior insulation (100, 150, 200, 250, 300)
<b>Windows type</b>	Low-e double glazing or triple glazing, with wood frames
<b>Windows size</b>	North increasing ratio options : 0.8, 1 or 1.5 West, South, East increasing ratio options : 0.8, 1, 1.25 or 1.5
<b>Ventilation</b>	Heat recovery or humidity controlled
<b>Heating system</b>	Low temperature condensing gas boiler
<b>DHW production</b>	Solar thermal fraction of DHW needs : 35%, 55% or 75%

constraints. The external walls and the windows of all façades are respectively retrofitted at the same step. In this simulation, the different retrofit steps are separated arbitrarily by one year, which makes sense regarding potential investment plan.

Based on the previous hypothesis, more than  $4.75E11$  different retrofit programs can be generated. Genetic algorithms, as NSGA-II, are adapted to large search space exploration.

### Objective functions

7 objective functions have been considered to assess retrofit programs performances over the building extended life span (assumed to be 50 years): cumulated primary energy consumption [MJ]; climate change potential [kg CO<sup>2</sup> eq.]; abiotic resources depletion potential [kg Sb eq.]; acidification potential [kg SO<sup>2</sup> eq.]; investment cost [k€]; global cost on life cycle (involving investments and energy consumptions over use) [k€]; adaptive summer thermal comfort indicator [degree.hours].

### Results and interpretation

The retrofit programs are optimized through the NGA-II procedure. As in genetics, the random initial population evolves over generations (up to generation 100 for this simulation). On the following graphs, the sets of points are the non-dominated solutions for different generations. The results are presented as Pareto frontiers describing the admissible trade-offs for decision makers. Three retrofit programs named "A, B and C" are systematically identified on the following figures.

Figure 4 highlights the trade-off between investment cost and primary energy consumption over building extended life cycle. The most efficient solutions in terms of primary energy consumption mitigation are also the most expensive ones (ex: solution A). These involve envelope thermal transmittance minimization, associated with equipments efficiency and integration of renewable energy use. In terms of content and planning, solution A involves sequentially: boiler replacement, exterior wall thermal insulation ( $R = 6,25 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ), terrace roof insulation ( $R = 8,3 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ), solar DHW production (75%), bottom floor insulation ( $R = 5 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ), windows replacement (triple glazing) and ventilation (heat recovery).

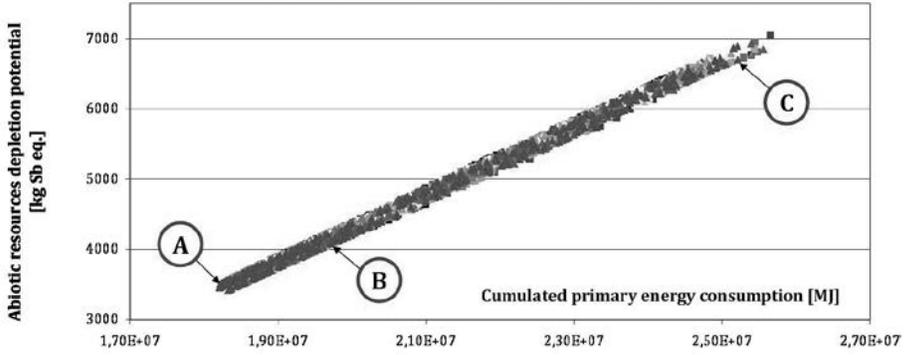
On the same Pareto frontier, solution B offers a significant reduction of investment cost for a relatively limited decrease in energy efficiency. This solution implies a different planning and content, being sequentially: external walls thermal resistance ( $R = 2,5 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ), roof thermal resistance ( $R = 3,3 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ), bottom floor thermal resistance ( $R = 2,5 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ), solar DHW production (75%), double glazing windows, ventilation system and boiler replacement.

The most energy efficient solutions are not the most cost effective ones over fifty years, as underlined on figure 5. For example, solution A is the identified energy retrofit program minimizing the global cost on the extended life cycle.

Figure 3 tends to demonstrate a relative correlation between cumulated primary energy consumption and abiotic resources depletion potential. On this case study, the results also

Figure 3

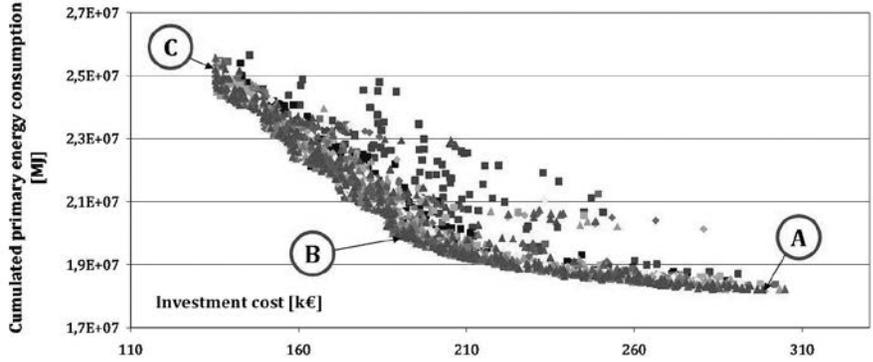
Pareto frontiers on cumulated primary energy consumption and abiotic resources depletion potential



3

Figure 4

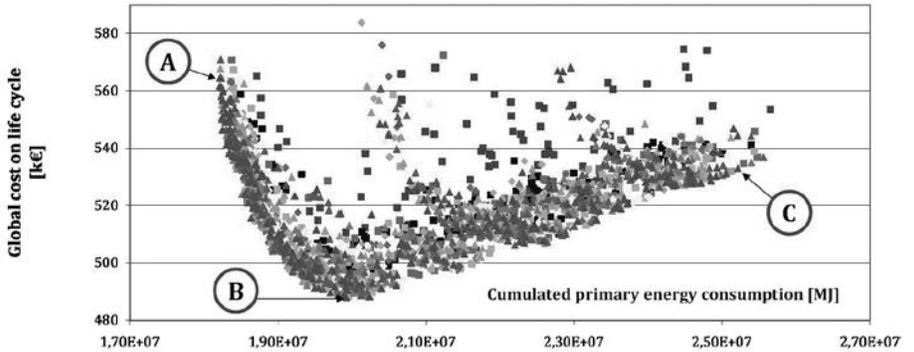
Pareto frontiers on investment cost and cumulated primary energy (PE) consumption, over generations



4

Figure 5

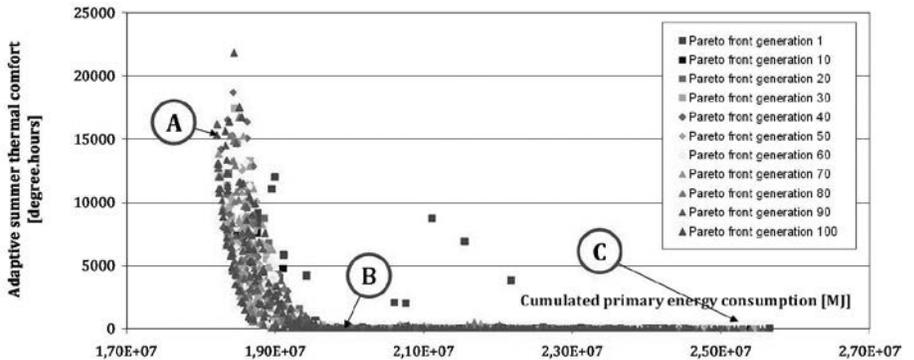
Pareto frontiers on investment cost and global cost on life cycle, over generations



5

Figure 6

Pareto frontiers on cumulated primary energy consumption and summer thermal comfort, over generations



6

underline strong correlations in between cumulated primary energy consumptions, climate change, abiotic resources depletion and air acidification. These correlations allow here to reduce the complexity of multi criteria decision making. They are related to the reduction of energy consumptions during the use phase. In this case study, gas is used as the heating energy before and after retrofit operations. The observed correlations have to be questioned in the case of a change in the type of energy for the heating system. The retrofit programs minimizing investment cost, as solution C, imply a retrofit program content very similar to solution B. On the content, the only differences concern the ventilation system (humidity controlled) and the solar fraction of the DHW production (35%). The resulting significant heating energy consumptions, over the first steps of the retrofit program, affect the results on most environmental indicators (Figure 3).

Even if the most energy efficient solutions lead to higher levels of thermal discomfort (Figure 6), all the energy retrofit programs identified as Pareto guaranty high summer thermal comfort. The number of hours with interior zone temperature superior to 28°C is inferior to 600 hours over the 50 years of the extended life cycle, for all solutions. This remark is valid with respect to average Paris climate conditions, and in the case of adapted occupant behaviour (use of solar protections in summer, night ventilation). Solutions A, B and C are all local optima, on one or more criteria. They are different in content, planning and performances, and represent different trade-off priorities.

## **CONCLUSIONS**

Multi criteria genetic optimization can support decision making for existing buildings energy retrofit through the identification of efficient retrofit strategies and the description of accessible trade-offs, on a multi criteria basis, over life cycle. The case study revealed that the most cost-effective retrofit programs, over the extended life cycle, are not necessarily the most energy efficient or capital-intensive solutions. Some correlations, observed here in-between the considered environmental criteria, help simplify decision making. These few remarks have still to be challenged on different case studies, testing parameters sensitivity, involving other LCA indicators, including additional lifecycle steps (transport, construction, maintenance) in the considered building lifecycle model. Contributing to frame an answer to the upcoming energy and environmental challenges, these approaches and tools help identify efficient building designs and are likely to influence the choices of components, materials and systems. Yet, the present contribution is not to be considered as a substitution of decision making and architectural activities. Architecture and building design could integrate such approaches to gradually improve construction performances. Some additional quantitative and qualitative objectives have to be incorporated into the analysis to ensure a sustainable integration of construction projects in the existing urban, socio-economical and cultural environments.

## **ACKNOWLEDGEMENT**

This study results from a collaboration between Navier and CEP institutes organized in the Chair ParisTech-VINCI “Ecodesign of buildings and infrastructure”.

## REFERENCES

- Alanne K. (2004), Selection of renovation actions using multi-criteria "knapsack" model, in *Automation in Construction*, 13 (3), pp. 377 - 391
- CEN EN15251:2006 (2006), Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings – Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics, Comité Européen de Normalisation.
- Collette Y., Siarry P. (2002), *Optimisation multiobjectif*, Paris, Eyrolles
- Deb K. (2002), *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*, New York, John Wiley & Sons Ltd.
- Dréo J. et al. (2003), *Métaheuristiques pour l'optimisation difficile*, Paris, Eyrolles
- EC (European Community) (2003), Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the Energy Performance of Buildings, L1/65, Official Journal of the European Communities
- IEA (International Energy Agency) (2008), *Towards a Sustainable Energy Future*, IEA programme of work on climate change, clean energy and sustainable development
- Pernodet Chanterelle F. (2010), *Méthode d'optimisation multicritère de scénarios de réhabilitation de bâtiments tertiaires. Application à l'évaluation de dispositifs de rafraîchissement hybride*, PhD thesis, CSTB, ENTPE
- Tanimoto J., Chirkhai P., Balcomb D., Andresen I., Aggerholm S. (2001), Multi-criteria Decision-making MCDM-23, a method for specifying and prioritising criteria and goals in design (Draft), International Energy Agency Solar Heating and Cooling, pp. 4 - 11
- Zitzler E., Deb K., Thiele L. (2000), Comparison of multiobjective evolutionary algorithms : empirical results, *Evolutionary Computation Journal*, 8 (2), pp. 173 - 195



# EMERGENCE OF SPATIAL FORMATIONS THROUGH AGENTS' DYNAMIC INTERACTION

KERKIDOU MARIA, PECHLIVANIDOU-LIAKATA ANASTASIA

National Technical University of Athens - Greece

## ABSTRACT

This research acquires from literature as a premise the fact that some characteristics of space comply with those of a complex adaptive system which produces its own organization. It is being examined how the architectural space can derive from the structural coupling of two agent-groups. Structural coupling reflects the relation between a unity with either its environment or another unity, as it is illustrated in biology. This implementation brings into play one swarm of agents that represents the building components of an open-air space, either mobile or fixed, and another one that represents the users along with their activities. There is interplay between the two swarms; that is, one group responds dynamically in every modification of the other's state. The goal of the experimentation is to create a generic platform in which several criteria and parameters could be embedded in order to serve as a complementary method to design process.

Keywords: Emergence, complex adaptive system, structural coupling, agents

## INTRODUCTION

The innovative characteristic that is incorporated in contemporary architectural design is the aptitude of continual and dynamic transformation. New design tools have facilitated the elaboration of architectural proposals and their representation. The technological evolution offers powerful machines that produce virtual/physical models in a glimpse; therefore reaching the point of testing before constructing. As a result, architects are inclined to revise the design logic and explore the architectural object, while trying not to use programs but to program architecture per se. The shift towards an algorithmic expression of the architectural problem derives from the designer's need to codify the problem through a series of finite steps (Terzidis, 2006). This is achieved through the computation of interrelated parameters (which characterize buildings) and dynamic organizations which lead to architectural forms that surpass the static norms deriving from conventional processes. This endeavour involves the designation of algorithms to generate form from the rule-based logic inherent in architectural briefs, typologies, even behavioural patterns that affect the organization of space.

The research acquires from literature as a premise the fact that some characteristics of space comply with those of a complex adaptive system which produces its own organization.

Furthermore, the use of agents is related to self-organization and incorporates concepts that attempt to decipher natural and social complex phenomena which determine their own form and processes. It is being examined how the architectural space can derive from the structural coupling of two agent-groups. Structural coupling reflects the relation between a unity with either its environment or another unity, as it is illustrated in biology.

This work elaborates on such an approach, while placing the implementation of algorithmic design in public open-air spaces. The fact that this constitutes the experimentation field, leads to the choice of a method able to provide for the demands of diverse users; hence, the selection of agent-based modeling is validated from an additional aspect.

This method brings into play one swarm of agents that represents the building components of an open-air space, either mobile or fixed, and another one that represents the users along with their activities. There is interplay between the two swarms; that is, one group responds dynamically in every modification of the other's state.

The organization of such a system incorporates a mechanism of interaction which is based on a set of relations that exist between its components. The implementation algorithm is based on the model developed by M. Resnick (1997), in which agents behave like ants, whose goal is, while navigating, to trace other nests, which they achieve by leaving trails of chemicals behind for someone else to find before the chemical evaporates.

The ants' nests constitute the conceptual metaphor of a space's structural components, representing the environment. On the other hand, the ants signify the users; namely, the unities that exist within the environment, whose behaviour differentiates according to their activities. The two swarms act in parallel and several snapshots of their system's operation offer a different spatial configuration. Setting as a basic element the agents' movement, the users' as well as the contextual components', one discerns that in accordance with the parameters and their interrelations as these have initially been defined, prevailing trails appear, spots of repose are formed and empty areas which can accommodate activities without obstructing the users' navigation are revealed.

The system includes nests which except from generating ants, incorporate repelling/attracting forces. The agents' behavior is configured either by their repulse/attraction to the trail network or in the case of detecting no pheromone, by the random wandering of their search mode. The implementation results into diverse route formations and states of the overall system whose attributes are being discussed.

## **SPATIAL ARTICULATION**

The model presented deals with the notion of space not with regard to its characteristics of geometry and topology, but primarily with reference to its substantiation through its use as this is imprinted by the user's behaviour. This behavioural pattern constitutes a spatial expression and therefore, during the generation of spatial configurations, the main design axis should comprise the user-defined activity which will be incorporated into space (Hillier & Hanson, 1984). Behavioural patterns are the ones that define functional space and this interrelation renders the attributes of spatial organisation dynamic (Ireland, 2010). Thus, there is an indissoluble connection of reciprocal influence between space and social behaviour entailing activities (Hillier & Hanson, 1984).

While reflecting on space from this point of view, one discerns the importance of its aptitude to constantly transform, not being perceived as the object space but as the spatial formulation articulated through the movement, activity, habitation and interaction (Ireland, 2008). The aforementioned describe a state of fluidity and perpetual readjustment.

Acknowledging the magnitude of social interaction's influence on the spatial plasticity, space can be ascribed as a complex system of spatial relations among its building components. Moreover, from the aspect of the design process, the parameters that

compose the design problem of space, in spite of the conventions and abstractions of representation, acquires the properties of space, and thus, inherits its complexity. Thereupon, the articulation of the functions that outline the architectural program is also complex. It is corroborated that space being defined through the -soon to be assigned- utility and hence, activity, shows evidence of organisational dynamic characteristics. Although, the functions attained by the architectural product are predominantly considered fixed, they exhibit transformability and flexibility in their coherence and their way of connection. Consequently, it is observed that built environment, in experience as well as in design terms, embodies differentiated autonomous entities interacting and creating systems and subsystems within a network, presenting from a macroscopic level, complex behaviour (Theodoraki, 2010).

## **COMPLEXITY IN TERMS OF SYSTEMS AND ARCHITECTURAL SPACE**

It is stressed out that a social unity in its context, performing regular activities, is spatially inscribed as a dynamic process characterized by self-organisation; thus, creating a spatial pattern between the environment and its inhabitant (Lefebvre, 1991; Hillier, 1998). Accordingly, combining the demands and traits of the user along with the geometrically unquantifiable aspect of space, it is suggested to meet the needs of the design problem via the computational mechanism of a complex adaptive system (CAS). Such an approach would provide the designer with the framework for managing large numbers of elements and their inter-relationships.

In terms of algorithms, CASs include Cellular Automata, Lindenmayer Systems, Turing Machines and Flocking Algorithms. According to Anzalone and Clarke (2003), CASs have broadly been applied in architectural design process as: tools for automated design of large-scale buildings and urban projects, techniques for context-sensitive buildings in serialized deployment, platforms for buildings of auto-assembly and auto-configuration by means of robotics, methods for the design of adaptive structures enabled to endure catastrophic events.

CASs' main attributes are summarized by Johnson (2002) to the following: simple initial rules; numerous interactions in local level; random organisation; decentralised control. Different initial states lead to different overall behaviours and patterns. This is an ability to reach results from a complex matrix of inputs. Respectively, the design process entails the incorporation of the complex matrix of user demands, location restrictions, structure limitations as well as their translation into an architectural aggregation (Anzalone & Clarke, 2003).

The attributes of CASs that can broaden the scope of the design process include:

- discrete composition; independent entities in parallel action composing of a consistent superstructure
- algorithmic relationships; conditions that rule the system and define the correlation among the constituent elements, evaluating and readjusting it continuously
- exogenous control; ability of the system to respond to exogenous stimulus
- scalability; equivalent behaviour of a system comprising few elements to a system with numerous elements.

Even though the results derive from simple local stimuli, they induce complexity to the global ensemble. The notion of complexity deals with the original state of the system, focusing on the interaction among the composing parts which gives rise to unpredictable outcome. Through computational models, minor changes of the initial conditions lead to variation of results which have emergent properties. This can facilitate the segregation and revision of an individual element of the system whose impact can be traced.

The emergent features of such a system can be attributed to its ability to form unexpected and complex spatial configurations, simply by following a set of rules of local range. Concurrently, these rules present asymmetric difference as far as complexity is concerned, being compared to the emergent outcome.

## COLLECTIVE BEHAVIOUR AND SWARM INTELLIGENCE

Assembling the characteristics of space which are influenced and formed according to social activity, and on the other hand, those that render space a CAS, one can discern the reasons for which the agent based approach is chosen for this implementation. Agent based modeling (ABM) comprises a theoretical basis along with practical instruments which combined can offer an interesting aspect of natural and urban phenomena as a collective dynamics of interacting components. Agents facilitate the investigation of the individual's behaviour in micro-level associated to the patterns that emerge through the interplay of numerous individuals in macro-level (Popov, 2009).

This approach exhibits several methodological and practical advantages compared to other analytical methods and theoretical frameworks. Principally, it can manage dynamic and emergent complex spatial systems reaching the individual's level through a bottom-up procedure. ABM has been used in architectural design simulating systems of urban circulation, crowd dynamics, land uses, dynamics of habitation etc. Specifically, this research implements a simulation using swarm intelligence (SI). The definition of SI would describe the attempt to design algorithms or distributed problem-solving mechanisms that collect information from the collective behaviour of social insects, offering an alternative way of creating intelligent systems (Bonabeau et al., 1999). SI is based on two fundamental concepts: self-organisation and stigmergy. Self-organisation constitutes a process during which the global tuning of the system rises through local interactions among its components. Theories regarding self-organisation have initially been developed through the fields of physics and chemistry in order to describe the emergence of macroscopic patterns deriving from procedures and interactions located in microscopic level. Extending those theories to social insects projected how complex collective behaviour may emerge through interactions of individuals with simple behaviour. Stigmergy complements self-organisation, describing the way of communication and interaction between the components of the system. It comprises an indirect way of interaction while an individual alters the environment and a second one responds to the new environment in a different time-step. Even though stigmergy does not explain thoroughly the mechanisms based on which the individuals coordinate their actions, it provides the correlation of the individual's behaviour with the respective ant-colony's behaviour. As Bonabeau et al. (1999) point out, the individual behaviour alters the environment, which on its turn, modifies the behaviour of other individuals. Stigmergy along with self-organisation, are linked to flexibility since as the environment changes because of an external perturbation, insects respond to it properly, as if it was triggered by the colony's activities. Therefore, the colony can handle the perturbation in a collective manner having individuals exhibiting the same behaviour. Extending this to artificial intelligence entails that agents can respond to disturbances without being programmed to manage the specific disturbance (Bonabeau et al., 1999). Furthermore, SI exhibits flexibility as it can respond to internal and external changes; robustness as tasks are fulfilled even if individuals cannot cope with the demands; decentralization as there is no central control over the system and self-organisation as solutions emerge without any predefinition (Ireland, 2008).

Based on these principles, the architectural model presented in this paper is implemented through the user's perspective and not through a form-seeking procedure. Moreover, the application has no intent to simulate human behaviour; on the contrary, it aims at the modeling of autonomous agents in order to articulate problems that demonstrate complexity and dynamism in an alternative way.

## STRUCTURAL COUPLING AND DESIGN PROBLEM

Having identified through swarm intelligence a motivating approach of elaborating on space, what remains is to transcribe the reciprocal influence of behaviour towards context and context towards behaviour (Hillier, 1998). This activity exhibited by the individuals as well as by the environment finds an analogy in autopoietic theory, especially in structural coupling. Autopoiesis constitutes the theory of self-organisation deriving from the biologists Maturana and Varela (1998) and it is being employed in order to characterise phenomena that determine their form, organisation and maintenance. One of the basic concepts of autopoiesis is structural coupling which describes the relationship of a unity and its environment or another unity. The merged effect of the environment's structure and the agent's structure delineate the agent's actions. Every time a change takes place in each of these structures, it triggers change to the other. The components of each autopoietic device are to reconstruct the network of the processes that create them and to compose this device as a solid unit in space through interactions and transformations of their own components (Taylor, 2003).

Each autopoietic device is a system which co-evolves with its environment on the basis of three principles:

- the system and the environment do not constitute contrasted poles of an evolutionary process
- on the contrary, the system and the environment relate through the framework of a broader system of relations, whose dynamics originates from their co-evolution
- the external distress that is caused by the environment triggers but does not define the structural alterations of the systems.

The metaphor of this notion to the design problem of space includes the inhabitants as well as the context, co-evolving in order to develop an inhabited configuration that meets the needs of their common activities (Turner et al., 2004).

Particularly, this work's model conveys the aforementioned by means of two discrete groups of agents which are structurally coupled. The one group composes the context, while the other represents the inhabitants forming a dynamic system in constant flux.

The design problem which is addressed by the implementation refers to the design of open-air space square. The programmatic demands deal with the fact that this kind of space addresses a broad spectrum of users from diverse backgrounds as well as a large number of users. Concurrently, it is designated to accept many visitors/users in different time phases. In addition, primary goal is to create a transformative aspect of the square as a response to the continuously changing conditions that affect open-air spaces (e.g. weather conditions modulate differently its use), as well as to the diverse and possibly opposing demands of the users. Among the objects of research is to investigate if an architectural solution can include the behavioural idiosyncrasies of the individuals; this is a point where the agent-based approach provides the possibility to assign distinct behavioural patterns to agents.

Essentially, the model uses ant-colonies demonstrating food foraging behaviour in an abstract version. Based on the model 'Ant' (Resnick, 1997), the method is enhanced with 'attractor' and 'repeller' properties, as well as with 'nodes' designating the prevailing spots of the trails. The nests signify the 'gateways' to the square and several activities that surround this type of areas (e.g. metro station exits, crossing passages through traffic etc.). The food-sources represent the activities, some of which comply or not with the travellers' preferences. The distinction of preferences offers differentiation to the agents and facilitates a classification of some sort (e.g. age groups of different interests, travellers' groups with purpose or simple leisure etc).



Figure 1  
Discrete agents:  
ant, patch and  
node

1

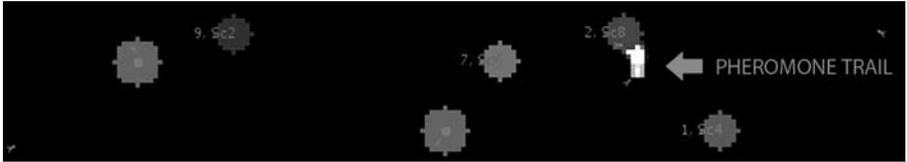
## METHOD

The model incorporates two groups of agents that act in parallel. The one group represents the users of space/pedestrians (ants) while the second one the environment (patches). The platform used for this implementation is NetLogo which constitutes a multi-agent programmable modeling environment (Willensky, 1999). It offers the ability to model complex systems unfolding through time easily and effectively, along with the use of numerous agents that act independently, enabling the study of micro-behaviour of individuals as well as the macro-patterns emerging from their interaction. NetLogo's 'world' is a two dimensional grid made of small squares called 'patches'. Patches constitute a type of agent that can store values, change state, without, however, being able to move. Choosing NetLogo underpins the intention of re-evaluating the relation between environment and user, considering that the environment is not a passive entity but, on the contrary, consists of components (patches) that interact with the creatures (turtles/ants etc.) that the world accommodates. Therefore, the environment acquires a more abstract and less static aspect than the one offered by other methods. The model is composed of agents in the form of ants and small surface-units of NetLogo's world (patches) (fig.1).

The agents leave a trail which is being stored in patches' memory log. This trail is borrowed from biology and refers, through the ants' paradigm, to the chemical substance (pheromone) that is released during their movement while in search of food. This substance is diffused in the environment and can be traced by the other agents until it evaporates completely in time (fig.2).

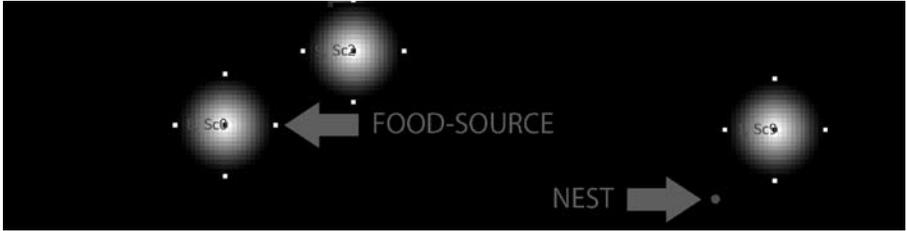
Agents' communication is achieved indirectly, being based on the interaction among the patches and the agents who are located in short range. The agents have as a starting-point their birth-nest, which they leave behind in order to seek for food. Each nest is the origin of an ant-tribe. The tribe-members are always returning to their birth-nest once they have succeeded at their mission (to trace and bring food). In this case, birth-nests as well as food-sources represent activities that engage the agents and therefore, cause their movement or lingering around the reason of attraction. At the initiation of the program, the location of food-sources and nests is set on random coordinates of the 'world', with the restriction not to approximate each other more than a certain number of patches. Nests release their 'scent' from their centre to all the patches of the world (a scent which is weakening as the radius of diffusion increases), in order to enable agents to locate their birth-nest (collecting information from the patches and checking from which direction the scent of the birth-nest is stronger). Food-sources just after 'Setup' and only until 'Go' procedure is executed, reveal their influence range, in the form of a disc surrounding the actual food-source, showing how the intensity of their scent is proportional to the distance from their centre in a gradient color (fig.3).

Figure 2  
Agent fulfilling task: bringing food back to the nest, leaving a pheromone trail for the rest of the tribe to find



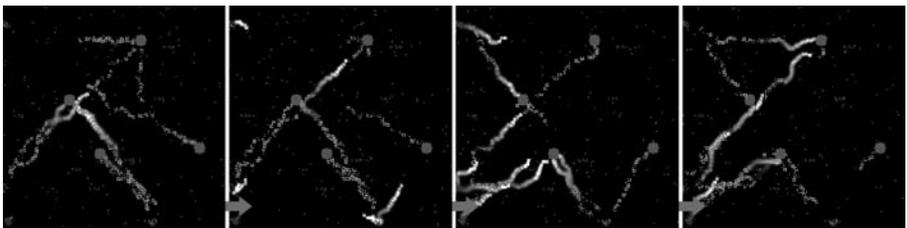
2

Figure 3  
Caption after 'setup': food sources revealing their influence range and nests indicating location of the centre



3

Figure 3  
Caption after 'setup': food sources revealing their influence range and nests indicating location of the centre



4

Moreover, food-sources have labels that indicate their identity, which is consistent to their 'scent'. This scent belongs either to a list of the food-sources that attract an agent (Attract List), or to the list of those that repel him (Repel List). The lists are filled randomly with scents satisfying the condition that there is no duplicate between them, in order to make sure that an agent cannot be simultaneously attracted and repelled by the same scent. The random selection might leave out of selection a food-source; nonetheless, the population outweighs the number of food-sources, and therefore, the system is expected to present no exclusions of food-sources and result in time to the unloading of all stacks of food (fig.4).

In order to determine their direction, each agent relies on the immediate context of the patch that he is occupying in terms of scent and chemical. Scents originate from nests and food-sources, while chemicals derive from trails of other agents, all of the above stored in discrete values by the patches of the environment.

Food is dispersed randomly in the 'world' and the agents do not have any related a priori knowledge of the environment than the information collected from the patches that they run across during their navigation. Their movement starts with a random heading until they meet i) a trail or ii) some food-source. Upon such an event, the agents determine whether these traces i) are consistent with their food preference and if so they follow the detected trail, if not they continue their journey, or ii) check if the scents pertain to their Attract List or Repel List.

Each agent consumes one of the numerous types of food that exist in food-sources, according to the preference that has been predefined for each agent in his Attract/Repel List. In the case that an agent locates an interesting patch<sup>1</sup> (not a food-patch and not a nest-patch), apart from examining thoroughly whether there are scents that belong or not to his list of preferences, he also calculates whether a scent's intensity outweighs the rest.

<sup>1</sup> As the agent is in search of food the nests' scents are of no particular interest to him. Therefore, what would interest him would be a food-source's scent or a trail containing information about a food-source.

The agent retrieves the variables that quantify the attractor's/repeller's strength and according to these numbers there are four cases for which the agent acquires a different direction.

repeller > attractor: the agent ignores the source of stimulus<sup>2</sup>

repeller < attractor: the agent follows the scent pointing towards the attracting source

only repeller traces: the agent ignores the source of stimulus

only attractor: the agent follows the scent that directs towards the attracting source

The same procedure will take place for the agent's surrounding patches left, right and

ahead in order to grasp where exactly the alert comes from and whether it is valid.

As soon as an agent traces food, he subtracts a food-unit from the source's stock and

starts to release pheromone from the food-source location until he reaches the birth-nest.

Eventually, this process leads to the obliteration of food-sources which, as a metaphor

incorporated to the model, reflects the activities (represented by food-sources) of a

specific duration<sup>3</sup> which in due course, cease to exist.

Trails emerge as a result of the agents' released chemical substance, which spreads out

to the neighboring patches and evaporates. The diffusion as well as the evaporation is

analogous to a percentage based on the substance emitted and this percentage is defined

by the program-user. During the program's application, nodes appear in the form of orange

patches. This is a function of those patches that do not belong to a nest or food-source

and the percentage of 'scent' that they contain constitute them as much frequented;

hence, they are signified as a junction of movements. Each node covers a single patch and

has a predefined age that restrains its prolongation in the world.

Agents signify the pedestrians, navigating through space, which constitutes the object of

design. Their preference of food, facilitates a differentiation of the swarm (e.g. as in age

groups addressing different places of suitable activities) enriching at the same time the

environment's components (such as food-sources) with attributes that lead to interaction

with the pedestrians. As far as design process is concerned, this feature of the model

constitutes a communicational and metaphorical medium through which the model is

being introduced to restrictions imposed by the design problem per se (e.g. fixed elements

obstructing the movement or urban equipment like seats that can attract the pedestrian on

pause). Respectively, the nodes mark the places of the world that receive dense traffic and

therefore, indicate the prevailing routes. Concurrently, the empty areas remaining suggest

the accommodation of activities without obstructing the users' navigation, allocation of

fixed components, spots of repose etc.

The feedback relationship between pheromone, evaporation, diffusion and agents

produces an emergent network of trails. As one agent releases pheromone, the others are

attracted to this trail and if their preferences are consistent then, the initial trail is being

reinforced. Through diffusion, more agents become interested to certain paths, resulting

to a route formation among food-sources and nests. Linking those activity-imbued spaces,

puts on the map their location and establishes, as time passes, stronger connections which

surpass the predefined threshold of intensity being indicated by nodes.

The result is a dynamic model, giving rise to emergence which stems from agent

interaction with the environment. The affinity with the behavior of biological systems is

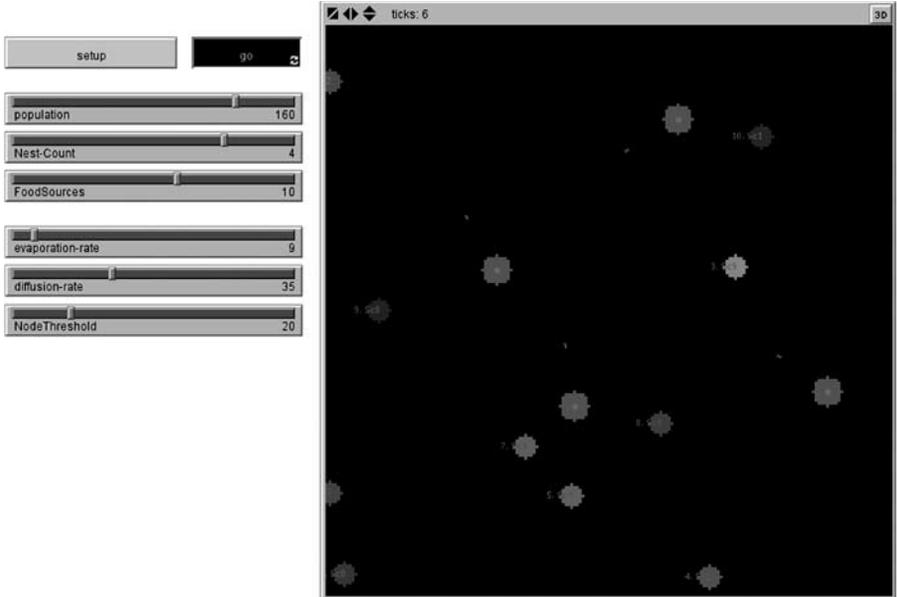
reflected on the oscillating behavior based on the self-organization of the agents along

**2** In this case, one might have expected the repeller's trace to direct the agent towards the opposite direction from the one he already had. The reader should bear in mind that the agent nonetheless, is coming from his nest and he is looking for food-sources of his liking; hence, changing his heading to the opposite direction would induce the following unwanted results: i) the agent would miss the attracting source which he has already located along with the repelling one, ii) the agent should not be obstructed in his search just because a trace does not comply with his preferences, iii) the agent could possibly get trapped in a loop between his nest (from which he is coming) and the territory where the repeller's traces are stronger (not the repeller itself, but the traces of another agent returning from the repeller)

**3** For instance, activities which take place during the peak of the day (e.g. working hours) and no longer exist after a while.

Figure 5

Caption after 'setup' and 'go': interface, user defined features: important variables of the program



5

with the emergence exhibited on an aggregate base. The results demonstrate a dynamic methodology towards the creation of route configurations whose network expands in several directions surpassing the grid of the 'world' and thus, from an architectural point exhibits interesting formations.

The principle variables of the model manage the tuning of the system and its responsiveness according to: number of agents which is defined by the population of ants; number of nests (Nest-Count); diffusion-rate which specifies the amount of pheromone which is distributed from one patch to its neighboring ones; evaporation-rate which defines the amount of pheromone that patches drop at each time step; node threshold which defines the amount of pheromone that one patch must in order to become a node (fig.5).

## CONCLUSIONS

This is a brief presentation of a research in its schematic phase. The abstract model represents a method under development whose structure allows for additional features to be included in the future. As far as the current stage is concerned, the object of the work focuses on the application of the introduced theoretical framework testing the dynamics of the system implemented. To this point, the set of entities presupposed by theory is conveyed through interacting agents who represent the users and the environment. Interaction comes into play as the user-agents circulate and trigger several changes to environment-agents. The system's state changes as the local parameters, affected by movement, alter the environment's configuration, forming paths among the several activities that endure or not in time. Successively, the stimulated environment causes modifications on other agents, who also respond at a subsequent time changing their movement; forming altogether a system in constant flux. This indirect interplay between agents and their environment constitutes an indication of the existence of stigmergy in the model, allowing us to draw the conclusions that stigmergy can also occur among interactions incorporating the human analogy. The recurrence of the interchange among the agents and the environment alludes to the structural coupling of these unities. Hence, each time an alteration takes place in each agent group, as an expression of its own

structural dynamics, it generates alterations to the other agent group. The results thus far entail that it is feasible for the agent-based system to evolve structural coupling; nonetheless, the geometry of the model remains abstract as it emerges from movement's traces, empty areas and spaces of activities. The system's expression needs to be translated in terms of geometry in architectural forms in order to elaborate on features that cannot be predicted or preconfigured in detail from the start. This enhancement, apart from the representation aspect, could also include a closer examination of the interconnections among the system's components as to how this structure can be ascribed into spatial organization. In order to achieve the aforementioned, a different platform should be employed, in which the experimentation on a more representational level could be facilitated and both geometries and relations would be conspicuous. Advancing the model towards that direction would render the method as a more efficient approach of a tool sketching architectural configurations.

In order to enhance the model towards a useful sketching tool several features should be included. So far, this remains a conceptual approach for the generation of spatial formations which aims at the amplification and acceleration of the design process in terms of creativity.

#### ACKNOWLEDGMENTS

This research has been co-financed by the European Union (European Social Fund - ESF) and Greek national funds through the Operational Program «Education and Lifelong Learning» of the National Strategic Reference Framework (NSRF) – Research Funding Program: Heracleitus II. Investing in knowledge society through the European Social Fund.

#### REFERENCES

- Anzalone P. and Clarke C. (2003), Architectural Applications of Complex Adaptive Systems, Proceedings of the 2003 Annual Conference of the Association for Computer Aided Design In Architecture (ACADIA), Indianapolis
- Bonabeau E., Dorigo M. and Theraulaz G. (1999), Swarm Intelligence, Oxford University Press
- Hillier B. and Hanson J. (1984), The Social Logic of Space, Cambridge, Cambridge University Press
- Hillier, B. (1998), Space is the Machine, Cambridge, Cambridge University Press
- Ireland T. (2008), Sniffing space, Proceedings 11th Generative Art Conference GA2008, Milan, Italy
- Ireland T. (2010), Stigmergic Planning, Proceedings of the 30th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA), New York
- Johnson S. (2002), Emergence: The Connected Lives of Ants, Brains, Cities and Software, London, Penguin Books
- Lefebvre H. (1991), The Production of Space, Oxford, Blackwell
- Maturana H. And Varela F. (1998), The tree of knowledge, Boston, Shambhala
- Popov N. (2009), Utilising Agent Based Models for Simulating Landscape Dynamics, Proceedings of Cumulus 38°South: Hemispheric shifts across learning, teaching and research, Melbourne
- Resnick M. (1997), Turtles, Termites and Traffic Jams: Explorations in Massively Parallel Microworlds. Complex Adaptive Systems, Cambridge, MA, MIT Press
- Taylor C. M. (2003), The moment of complexity. Emerging network culture, London, The University of Chicago Press
- Terzidis K. (2006), Algorithmic Architecture, Burlington, Architectural Press
- Theodoraki M. (2010), Flows of movement: intensities, singularities and attractors as event generators, Proceedings 13th Generative Art Conference GA2010, Milan, Italy
- Turner A., Mottram C., and Penn A. (2004), An ecological approach to generative design, Design Computing and Cognition '04, Dordrecht, NL
- Willensky U. (1999), Netlogo, <http://ccl.northwestern.edu/netlogo>, Evanston, IL, Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University

# I-MATTERS: IN\_FORMING MATERIALITY

VOYATZAKI MARIA

Aristotle University of Thessaloniki, School of Architecture - Greece

## ABSTRACT

The focus of this essay is to follow the recent developments of the new role of materials in contemporary experimentations on computational design, architectural form and its materiality. In the large spectrum of approaches to this relationship, the essay expands on the materiality as agent of form generation that is associated with computational design. Four types of materiality are discussed: plugged-in materiality, digitally fabricated materiality, the materiality that emerges from custom-made fabrication machines, and the materiality resulting from materials with designed properties. The essay describes the content, the mechanics, representative examples and the implications of these approaches for architecture as a whole.

It provides insights into the role of materiality for the reconsideration of the creative action as a bottom up process, which pursues and attributes value to the non-standard and conceives complexity as a manageable source of inspiration. Through this new role of materiality a significant shift can be detected according to which fabrication, which was up till now distant and clearly distinguished from the creative process, becomes part of this process or even the process itself.

## INTRODUCTION

In the last fifteen years, contemporary computational design has reflected a new conception of the design practice. The fundamental characteristic of this conception is that the architect, till now the master of the design process and the dominant figure in manipulations and decisions in the creative action, has delegated and empowered computers to assume part of his or her responsibilities related to form generation. The gravitas and the extent of the responsibilities computers have been charged with vary significantly spanning across a broad spectrum: On the one extreme there are the experimentations on artificial intelligence, where computation seeks to replace the ultimate part of human contribution in the design process. On the other extreme lie the demands made on the computer to produce innovative associations of the parameters of a design question in order to enrich designer's decision-making intuition by expanding the number of reliable alternatives.

In this large spectrum of approaches we can, however distinguish two different attitudes of digital design towards materiality. As we will see later on, in the first, the main focal point of computation lies in the formal aspects of architectural form.

Computers are used to generate forms that could never be conceived by the architect due to the difficulty of conventional tools to simulate formal complexity emerging from the unstable dynamics of multiple variables. All these approaches conceive materiality as passive, mute and inert, formed by any kind of 'forces' imposed beyond its proper nature as a form of hierarchical command from above. According to the second attitude computation is used in order to deliberate, reveal and incorporate in the creative action the dynamic nature of the matter as a morphogenetic factor, not imposed but emerging from its inherent morphogenetic potentials conceived as a creative force. The core issue of this conception is that it empowers matter<sup>1</sup> as the substance of materiality, to acquire a new role in the design processes that generate architecture.

## FORM AND MATERIALITY IN COMPUTATIONAL ARCHITECTURAL DESIGN

A significant shift has been observed in the digitally enabled architectural design in the last fifteen years when the term 'Digital' or 'Algorithmic' Architecture appeared to be coined with a new generation of software and the necessary technical infrastructure as well as with architectural expressions and stylistic idioms related to non-standard, non-euclidian, non-orthogonal creations. The common characteristic of all these digital environments is their parametric nature through which a fourth dimension, controlling the change of variables, plays a fundamental role, namely time. Viewed as a development of Computerised design, Algorithmic or Computational design<sup>2</sup> is based on the evolution of scripts that enhance the capacities of existing software to inform a generative process for architectural creations through the introduction of contextual relationships. While analogue design processes use software as a representation tool to define form and later on its detailing, computational design is a written logic where computation runs across all stages that define relational matrices that replace the lines of the analogue while coordinates and vectors replace points.

By borrowing know-how from other disciplines such as cybernetics for iterating loops, conditional statements and procedural thinking, fluid dynamics and finite elements analysis as these are used in the automobile industry and aeronautics, film and computer graphics, computational design creates dynamically-controlled active models that engage with information and compute relationships. Computational design is known for its capacity to process information and to develop generative rules/algorithms from which a specific result is brought about. Through computation the designer finds relationships in a deterministic system, not as to how it will eventually develop but how it will determine the interaction of the various agents. We are experiencing a revolutionary shift from thinking of architecture as spatial relationships defined through geometry to the thinking of architecture as defined by a written logic, or in other words a shift from geometry to mathematics<sup>3</sup>. This is the new platform on which computational architectural design lies that, in order for it to be operational and effective, it requires the translation (through mathematics) of the main agents of architectural creations and their parametric relations, into computer algorithmic languages understandable by the form generating software as well as by hardware fabrication machines.

We can distinguish two different directions in the way computational design experimentations and research approach the generation of form. The one focuses on the formal aspects of architectural forms and the other focuses on its material aspects.

---

<sup>1</sup> Antoine Picon defines as materiality the sensory experience offered by buildings, or our connection to the physical world. Picon, A. (2010) *Digital Culture in Architecture*. Birkhäuser, Berlin, p. 212.

<sup>2</sup> According to Terzidis, computational design is synonymous to algorithmic design and is opposed to Computerized design. Cf. Terzidis, In Terzidis, K. (2006) *Algotecture*. Elsevier, UK

<sup>3</sup> Burry, J. and Burry M. (2010). *The New Mathematics of Architecture*. Thames and Hudson, London

## Formal Computation Experimentation

The one direction focuses on interrogation related to the formal aspects of architecture and uses computation in order to generate complex forms that could be never conceived by the architect due to the difficulty of conventional tools to support the conception and to assure simulation and representation of non conventional complex forms. If we had a look at the possibilities of the available software we could distinguish four of them that are extensively used in contemporary digital design: Maya, Rhino, 3D Studio Max, CATIA and Generative Components. Maya started as an animation software based on dynamics, able to simulate distortions without necessarily intervening with scripting. Rhino, on the other hand, is more mathematically based, helps create dynamic flows of data and with its Grasshopper extension alongside its various plug-ins investigates localised issues. 3D Studio Max is a morphogenetic tool used extensively for simulation towards form-finding. CATIA which mainly produces digital surface models despite the fact that it does not generate form algorithmically is very compatible with fabrication and assembly. Generative Components, according to its authors, is used to inform decisions. 'It is integrated with Building Information Modeling (BIM), analysis, and simulation software, providing feedback on building materials, assemblies, systems performance, and environmental conditions. This integration also ensures that intent becomes reality by enabling designs to accurately and efficiently flow through to detailed production and fabrication'<sup>4</sup>.

This inclination towards the expressivity of form appears consciously opposite to the inclusion of the materiality between the agents in computational design as it is considered that by encompassing material qualities and constraints in the investigation of the formal aspects the imagination of the designer is hindered.

From this view point, the expressiveness is about personality, individuality, and idiosyncrasy<sup>5</sup>. The expressive signifies a special moment in time when an event is about to happen and above all it embodies some of the most intrinsic, existential, and unique qualities of form. Computation can in this way direct the designer towards these specific qualities of the form and, for this reason, it appears to be a valid field for investigation and experimentation. The lack of concern about materiality introduces designers' behaviors closer to intuition rather than to perception. This approach is more or less a further development of the attitude against form of computerised design, which by using new computational tools is moving towards a digital formalism. This attitude brings to the forefront the notion of style, a vital objective of architecture neglected by the rationality of modernism and the socio-cultural locality of the post modern, as a contemporary request of architectural experimentations<sup>6</sup>.

The materiality in this approach is introduced, to a great extent, after the completion of the form generation process to the digital fabrication process. With the development of digital fabrication techniques after the form simulation and modelling even physically with rapid prototyping, its materiality can be investigated through the use of various materials that digital fabricating machines (laser cutters, CNC machines, 3d printers etc.) can manage. From the above mentioned software, Maya has no direct connection with fabrication. RhinoCam an extension of Rhino software is a way to connect design and fabrication but to a great extent is used till now for making jewellery. 3D Studio Max has limited use to architecture when it comes to fabrication as it is mostly used in product design. From the digital surfaces models that CATIA produces, tool paths for computer-controlled milling machines can be defined. Various mute materials can be tested towards formulating the materiality of a form already designed.

<sup>4</sup> <http://www.bentley.com/en-US/Promo/Generative+Components/default.htm>

<sup>5</sup> Terzidis, K. (2003) *Expressive Form: A Conceptual Approach to Computational Design*. Spon Press, London

<sup>6</sup> <http://www.patrikschumacher.com/Texts/Parametricism%20as%20Style.htm>, Parametricism as Style-Parametricist Manifesto, Schumacher, P. (2008). Presented and discussed at the Dark Side Club1, 11th Architecture Biennale, Venice 2008

## The Materiality as Agent of Form Generation

The second tendency seems to consider materiality as one of the fundamental agents of architectural creation, the dynamic interaction of which with other agents can have a decisive contribution to the generation of form. This approach is based upon a specific conception of the material as a dynamic system. In this conception of materiality broadly inspired by the Deleuzian philosophy, formed or formable matter is conceived as an entire energetic materiality in movement, carrying singularities that are already like implicit forms that are topological<sup>7</sup>, rather than geometrical and combine processes with deformation. Any material has endogenous tendencies and capacities. If the material is homogeneous and closed to intense flows of energy, its singularities and affects will be so simple as to seem reducible to a linear law. In other words, using homogeneous materials to fabricate computational design intents its full potential will be reduced as 'these materials hide from view the full repertoire of self-organising capabilities of matter and energy'<sup>8</sup>. If material is far from equilibrium or if it is complex and heterogeneous the full set of singularities will be revealed and complex materiality will be allowed to manifest itself. The emphasis is not on the spontaneous generation of form, but on the fact that this morphogenetic potential is best expressed not by the simple and uniform behavior of materials but by their complex and variable behavior. According to Manuel Delanda<sup>9</sup> a material as yet another complex, dynamic system actively organises itself into new structures and forms. Material performativity comes from the complex dynamic behaviour of the components of a material that attribute to it emergent properties. He also talks about the expressivity of material, a «capacity of matter to express itself in many ways, from the simple emission of information to the deliberate use of melody and rhythm»<sup>10</sup>. This way, expressivity as a capacity not only of form, as this has been suggested in the previous approach to computational design, but also of matter, appears as a legitimising mechanism that shifts the focus of interest into the materiality of form as a morphogenetic agent. Thus, computation can allow the designer to have low access to the properties of the material by changing parameters through simulations in order to appreciate the affordances of a system.

It is interesting to note that dealing with materiality in computational design is adherent to the development of digital fabrication. An essential trait of digital fabrication is that it has changed the perception of building production which has been traditionally autonomous with implications in labor division and specialist role attributions. Digital fabrication attempts a dynamic involvement in the process of generating form. Not only in the form of a rectifying feedback in the manufacturing process which, either as correcting a mistake, or an obligation to reassess some parameters that have been over or underestimated or even omitted in the form generation process, or finally as new emergent ideas that came out of the manufacturing process, reactivates a new loop in the design process. On the contrary digital fabrication attempts to delve into the design process undertaking, to a greater or lesser extent, a small or a larger part of it. Digital fabrication is not an a posteriori indication of a transformation, but the active participation in the morphogenetic process.

In order for this to be possible, there is a demand for a continuum in a seamless process from design to manufacturing. In the history of contemporary architecture the discontinuity between form generation and its materiality was bridged through representations (drawings, mock ups) which would refine an idea towards the final choices towards its

**7** Topology can follow surfaces and their deformation in time with vectors as opposed to the Cartesian approach that defines a point through its coordinates.

**8** Delanda M. (2004) Material Complexity. In: Leach, N. Turnbull, D. and Williams, C. (eds) Digital Tectonics, Wiley Academy, London, pp. 14-21

**9** <http://lebbeuswoods.wordpress.com/2009/01/05/manuel-delanda-matters-4/> Delanda, M. (2009). Material Expressivity.

**10** Ibid, <http://lebbeuswoods.wordpress.com/2009/01/05/manuel-delanda-matters-4/> Delanda, M. (2009). Material Expressivity.

building. In this logic, representations acted as connecting tools of these two processes as well as legitimizations of this division. Through this division, the shift of the responsibility for the materiality of a building was legitimised to the construction phase allowing design to be dominated by formal inquiries exclusively.

Taking matter as a dynamic system in computational design the same way other parameters are taken towards form generation, renders digital fabrication the ultimate platform for managing materiality in the form generating process. Four different approaches could be observed according to the way in which digital fabrication is involved in the design process.

### **Plugged-in materiality in computational architecture**

This approach can integrate material through intervening and 'customising' some of its properties. Still at experimental stage, some of the material properties can act as another parameter in a software. Grasshopper plug-ins such as Kangaroo which is more form-finding, structural-design biased can introduce the variable density of a material depending on its location and role in the structure. D'Arcy Thomson's<sup>11</sup> work analyses the variable composition of bone structures dependent on their role to undergo certain loads and distortions. More recently the work of Achim Menges<sup>12</sup> focuses to a great extent, on the correlation between structural performance and materials.

### **Digitally fabricated materiality**

This approach works on the emergent properties of certain materials that derive from experimenting with fabrication machines that manipulate them. Mette Ramsgaard Thomsen's<sup>13</sup> work is about transcending the formal properties of materials through using fabrication techniques and through customising the machines to offer materials with new capacities. Similarly Iwamoto<sup>14</sup> in her recent book on 'Digital Fabrications' classifies the formal explorations of digital architecture in five generic formal categories and connects the way such forms are generated and then fabricated with the respective computer applications. More specifically she distinguishes five typologies: sectioning<sup>15</sup>, tessellating<sup>16</sup>, folding<sup>17</sup>, contouring<sup>18</sup> and forming<sup>19</sup>. Iwamoto<sup>20</sup> suggests that the architects must know how the tools work and what their possibilities and their limitations are. Materials, hence a relatively limited palette, have to be known by their suitability for a certain purpose. Iwamoto defines punching, laser cutting, water-jet cutting, CNC routing and cutting as the possibilities of digital fabrication in the tooling process that architects have to be familiar with. The transformations of materials that have been elaborated through digital fabrication offer new perspectives in their use as revised, emergent and afresh.

**11** Thompson, D. (1961) *On Growth and Form*, Cambridge University Press, Cambridge

**12** <http://www.achimmenges.net/?cat=236>

**13** Ramsgaard Thomsen, M. (2011) *Computing the Real: Time, Scale and Material*. Dreyers Foundation, Copenhagen

**14** Iwamoto. 'the alignment between 3D model and constructed end is one of the great advantages of digital fabrication and its expanded application, called building information modeling BIM. In: Iwamoto, L. (2009) *Digital Fabrications Architectural and Material Techniques*. Princeton Architectural Press, New York

**15** (cartesian coordinates to topological surfaces defined by u and V vector coordinates relate to multi-axis cutting tools, CNC routers)

**16** The modeled 3D formed with NURBS or polygonal meshes using Generative Components or Catia, instruct robots or CNC machines for drilling operations as with a vertical five-axis CNC router. In: Iwamoto, L. (2009) *Digital Fabrications Architectural and Material Techniques*. Princeton Architectural Press, New York

**17** 3D surfaces unrolled or unfolded make 2D templates for cutting. Work on CATIA or Rhino or use RhinoNest (a nesting programme that maximises material use) send to a CNC router to cut, locate bending angle, bolt holes. In: Iwamoto, L. (2009) *Digital Fabrications Architectural and Material Techniques*. Princeton Architectural Press, New York

**18** CNC mills 'carve' irregular patterns. Any digital model is translated into a language computer-controlled router can understand such as Mastercam, RhinoCAM and SURFCAM. In: Iwamoto, L. (2009) *Digital Fabrications Architectural and Material Techniques*. Princeton Architectural Press, New York

**19** Forming is a non-standardised mold making with CNC routers. In: Iwamoto, L. (2009) *Digital Fabrications Architectural and Material Techniques*. Princeton Architectural Press, New York

**20** *ibid*

Despite the contribution this classification makes in the overall understanding of the relationship between form, material and fabrication and despite Iwamoto's suggestion for this approaches to design and fabrication techniques to be combined to offer new opportunities there seems to be a fundamental paradox. Research focuses on the development of interfaces to connect the various relational descriptions between material capacities and the paths of fabrication machines using active models and working on vector-based maths. Work is also undertaken on the development of command languages of detailed instruction for fabrication operations of defining tool paths. However the fabrication machines adhere to their capacities and material is, in some cases, introduced-coded through its thickness or density and in some more elaborate cases through its structural capacity<sup>21</sup>. Moreover most machines subscribe to a limited palette of materials they can work with.

Harnessing and 'stretching' materials' known properties with new processes of pleating, weaving and folding offer new possibilities and not only systematically control variation but fundamentally change the performative understanding of materials. Here work focuses on algorithms that will describe and calculate materials with regard to their employment.

### **Creating machines to fabricate materiality**

Research focuses on developing tools, improving machine time and speed of tooling towards more tool efficiency. That would still not necessarily involve matter in the evolutionary process of generating form. However, Robert Aish<sup>22</sup>, given his bias as software developer, suggests that the creativity and experimentation of the designer should go as far as to interact and develop the machine in order to define the relationship between the computational abstraction and the design intent. He argues that tools have to be creative, intelligent and customisable. Tools have to embody conceptual knowledge and challenge the designers as much as the designer challenges them.

In their fairly recent essay 'Factory @ Home: The Emerging Economy of Personal Fabrication', Hod Lipson and Melba Kurman supported by Andrew Dermont<sup>23</sup> suggest that owning a personal fabricator is the way forward towards cheaper while at the same time customised, personalised objects. This concept is based on hacking and programming small-scale machines known as fabbers. Matthias Kohler and Fabio Gramazio<sup>24</sup> have been pioneers in developing a unique digital craft through the systematic use of medium-sized robots. Designing the construction trajectory, brick laying acquires new non-standard formations.

Along the lines of interacting, developing and ultimately devising a tool Marta Malé-Alemany's work is experimental, based on trial and error. Small scale robots are designing the trajectory introducing parameters that can affect and be affected by the fabricated structure that will emerge. Namely, the design of a robot trajectory, to drop acid on a polyurethane panel offers different degrees of porosity, transparency and tactile qualities of material. Marta Malé-Alemany<sup>25</sup> also experiments with phase changing materials such as wax used as a 3D printing material, that is injected through a nozzle, as another example of active fabrication. The wax solidifies in cold water. The formal proposition of these experiments are assessed and the composition of the material changes through reinforcement to offer new formal possibilities with different structural capacity. Work develops not only on changing the composition of material that gives away its emergent properties but on hacking a CNC milling machine by replacing its drill with a

**21** Picon, A. (2010) *Digital Culture in Architecture*. Birkhäuser, Berlin

**22** Aish, R. (2011) Foreword, In: Glynn, R. and Sheil, B. (eds) *Fabricate*, Riverside Architectural Press, London

**23** <http://web.mae.cornell.edu/lipson/FactoryAtHome.pdf>

**24** Gramazio, F. and Kohler, M. (2008), *Digital Materiality in Architecture*, Lars Mueller Publishers, Zurich

**25** Malé-Alemany, M. (2010) *Machinic Control. Design Experiments with Customised CNC Machines*, In: Voyatzaki, M. (ed.) *The Design and Fabrication of Innovative Forms in a Continuum*, Charis Ltd, Thessaloniki

home-made deposition nozzle. Matthias Kohler and Fabio Gramazio similarly experiment with robots that through designing algorithmically their paths they can 'arrange' active foam to create acoustic panels. Finally, Italian engineer, Enrico Dini's<sup>26</sup> works on large scale (6 meters stroke of the printing head) colossal stereolithography from CAD (-CAE-CAM) drawings to 3D objects Z-Corp 3D printing machine sandstone buildings with no human intervention in the construction and offers new perspectives in the construction industry.

### **Creating materials with designed properties**

Creating materials that are bespoke and site specific is a relatively new concept according to which cellular defined matrices inform complex materials. Emergence, self-organisation and intelligence in a bottom-up process could inform form and fabrication. It is a new definition of materiality which could be active, respond to and perform with the environment, its context and to various loading conditions. Strength, density and elasticity can be devised. But how is material introduced and simulated algorithmically? How can we design codes that can transform and contain information about matter? How can we invent a material deterministic approach where the designer challenges the passive mode of material deployment? Neri Oxman's work<sup>27</sup> developed the theory and practice of material-based design computation. In this approach, the shaping of material structure is conceived as a novel form of computation. Some of the work involves creating entities synthetically by the incorporation of physical parameters into digital form-generation protocols. Projects combine structural, environmental, and corporeal performance by adapting thickness, pattern density, stiffness, flexibility, and translucency to load, curvature, and skin-pressured areas.

## **FORM, MATTER, CREATION**

The broad spectrum of ongoing experimentations on architectural design of the last fifteen years reveals a strong tendency to move towards a new conception of the act/art of creating space. According to this conception, the materiality of form appears to gain a significant position and to play a new role in contemporary creative thinking and making. From the cases presented above some significant traits of this new conception can be detected, which shape the milestones of contemporary creative thinking and making and circumscribe the new profile of the creator.

The first trait is the shift from a creative thinking dominated by the so-called 'formulated idea', driving the creative action to a creative thinking oriented towards the domination of parameters, factors, variables affecting the emergence of form. This shift from a top-down creative logic to a bottom-up origination, places materials at the core of the creator's preoccupation. They are now conceived as expressions of the dynamics, the capacities and tendencies of matter and, as such, decisive morphogenetic factors, contributing or even assuring the emergence of forms as opposed to the obedient and mute materialisation of the formal expressions of transcendent concepts.

A second trait, resulting from the first one, is that the request for formal emergence goes in pair with the deliberation from the guidance of the standards imposed by the building industry that dominated the formal and material mass-production of the 20th century. The pursue of the non standard, as inclusive of the standard, deliberates creativity from the constraints of standardization while redirecting it to the intuitive redefinition of a spectrum of new limitations the combination of which will be capable to assure the emergence of non predictable innovative forms. In this project towards the investigation of the non standard, materials appear to be part of the form-generating process becoming one,

**26** [http://www.d-shape.com/d\\_shape\\_presentation.pdf](http://www.d-shape.com/d_shape_presentation.pdf). D-Shape

**27** <http://web.media.mit.edu/~neri/site/publications/publications.html>

and in many cases the most significant, reference of the experimentation on new terms and limitations of the creative process.

A third trait has to do with complexity. By conceiving the complexity as a condition of reality and not as a situation to be simplified by breaking into and isolating its structural elements, the creative process, as an intervention to change the reality, enters a new mood. Supported by the high performance digital means able to correlate multiple parameters, the creation is now based upon an understanding of the complexity as a complex set of variables governed by simple rules. The task of the creator is to (re)define these rules and to nominate the variables in the mathematical expression of scripting. The more intuitive and unpredictable the involvement of a variety of variables in the creative morphogenetic process the stronger the quest for open source software. In this environment, matter has a dynamic presence in the claim to appear as a (or a set of) variable(s) affecting the form generating process. Ongoing experimentations are investing in the creative power of these variables in the creative process.

The last significant trait of the new conception of the creative process is in the involvement of the fabrication. As materiality becomes a decisive aspect of the morphogenetic process, the fabrication, (rapid) prototyping and modeling become the crucial simulation means for the creative action. The involvement of materiality in the creative process is accompanied by the simulation means appropriate to its very substance. This shift of the nature of the fabrication process from the post-materialisation of a designed form to the materialisation of an emergent form constitutes an extremely significant change in the contemporary creative process.

**EXPÉRIMENTATIONS  
PROTOTYPES**

**-**

**EXPERIMENTS  
PROTOTYPES**

**1**



# DEW ARCHITECTURES

“DEW ANNOUNCES THE GOOD WEATHER”

BEYSENS DANIEL<sup>1</sup>, BROGGINI FILIPPO<sup>2</sup>,  
MILIMOUK-MELNYTCHOUK IRYNA & OUAZZANI JALIL<sup>3</sup> TIXIER NICOLAS<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ESPCI-PMMH, CEA-Grenoble et OPUR - France

<sup>2</sup>Agence BlueOfficeArchitecture - Bellinzona - Suisse

<sup>3</sup>ARCOFLUID - France

<sup>4</sup>ENSA Grenoble & ESAA Annecy

Laboratoire CRESSON - UMR CNRS n°1563

## ABSTRACT

Dew is a natural phenomenon that occurs under particular weather conditions (clear nocturnal sky, humid air, low wind) and on a surface specially designed for this purpose (high radiative cooling properties, special architectural design). Depending on the weather conditions and the surface characteristics, the water yield can give up to 0.7 litres per square meter and per night.

Although the collection of rain water on roof turns out to be relatively simple, dew harvesting needs a more sophisticated architectural design to be efficient. Then this project aims at testing roof designs that improve dew water recovery by modulating two major parameters related to its recovery: (i) surface quality (strong emissivity, wetting character, low heat capacity), (ii) the shape of the roof (slopes, orientations with respect to dominant wind, gravity-induced water flow, etc.).

A first step was the exploration of urban structures/sculptures, which was carried out by numerical works and small scale modelling (workshop held on December, 2008). In a second time (April, 2008), three roof prototypes on scale 1:1 of approximately 4 m<sup>2</sup> each are constructed and tested. These prototypes are designed with metals (sets of oriented plane surfaces), resins (modular plays of crooked surfaces) and textile (stretched structures).

These multi-disciplinary researches on dew water harvesting aims at a synergy between partners of different disciplines and statutes: physicists, architect-designers, industrialists and teachers. They can apply to all the scales of the habitat, from garden cabins to roofs of building, car parks or supermarkets. It finds its interest in many regions of the world, in arid or semi arid environment and also European countries. (It is worth noting that the surface coating used to improve dew collection also provides natural cooling during the day.). We propose on conclusion of this paper, a pavilion project with on of this system.

Keywords: water, dew condenser, radiative cooling, architecture, geometry

## INTRODUCTION

Passive dew collection refers to the condensation of atmosphere vapour by radiative exchange cooling and without external energy. It is known to provide good quality water and can provide a useful supplementary source of drinking water. Although the maximum expected available yield is in the order of  $0.8 \text{ Lm}^{-2}\text{night}^{-1}$ , such an amount has yet to be reported. The highest dew collection amount we are aware of is just over  $0.6 \text{ Lm}^{-2}\text{night}^{-1}$  for Jerusalem (S. Berkowicz, Hebrew University, personal communication July 2012). In contrast to meteorological conditions, which cannot be modified, the shape of the condenser can increase or lower the dew yield by a large factor. In order to increase the dew yield, we here propose and test new collector shapes different than the planar geometry used to date.

## SIMULATION

Dew formation involves radiative cooling below the atmosphere dew point temperature. What matters is the difference between the condenser outgoing radiative power,  $P_r$ , and the sky incoming radiative power,  $P_s$ . The local radiative power,  $P$ , emitted by a source depends on the local temperature,  $T$ , through the Stephan-Boltzmann law,

$$P = \varepsilon\sigma(T + 273)^4, \quad (1)$$

where  $\sigma$  is the Stephan-Boltzmann constant and  $\varepsilon$  is the emissivity of the surface. When considering a complicated surface, such as the cone in fig. 1, the radiative power emitted by each surface element over a given sky solid angle element must be integrated over the total condenser structure and visible sky solid angle. This necessitates considering both the surface directional emissivity (that varies as the cosine of the angle with the normal to the surface element) and the sky directional emissivity  $\varepsilon_s, \theta$ . Due to this specific  $\theta$  dependence, the lowest atmospheric layer contained in the first  $15^\circ$  solid angle emits a significant amount (25%) of the total IR sky radiation. In [1] numerical simulations of substrates - horizontal,  $30^\circ$  inclined planar substrate, conical and ridge shapes - were performed and compared to experiments outdoors.

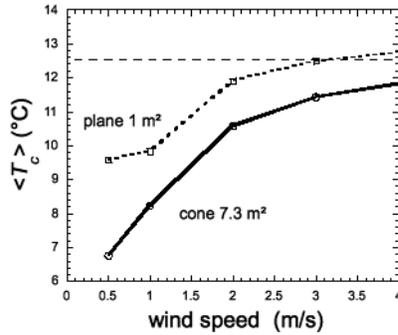
Numerical calculations were made for a condenser taken as a "grey" body with emissivity  $\varepsilon_c = 0.94$  and a sky radiation corresponding to common night weather conditions in a temperate climate (e.g. Europe): clear sky,  $T_a = 288 \text{ K}$  ( $15^\circ\text{C}$ ) ambient temperature and  $\text{RH} = 85\%$  relative humidity, corresponding to the dew point temperature  $T_d = 285.5 \text{ K}$  ( $12.5^\circ\text{C}$ ). The integrations of the radiative budget are computed for various radiator temperatures  $T_c$ . Among the collection surface forms already investigated (planes, ridge, cone [1]), the latter conical or funnel shapes gave the best results. Fig. 2 compares surface mean temperature with respect to wind speed for a conical geometry and a  $1 \text{ m}^2$  condenser inclined  $30^\circ$  from horizontal, with wind blowing towards the hollow part of the condenser. As expected, cooling decreases when wind speed increases.

## SHAPES

A good condenser design will reduce the heat exchange of the condenser surface with air flow (free convection, forced convection with wind). Hollow forms, such as the funnel shape, are preferred as they also reduce free convection along the surface by blocking the heavier cold air at the bottom. In addition, because of the cone symmetry with respect to the vertical axis, the effects are the same whatever the wind direction. Assuming a symmetric temperature distribution with respect to the vertical axis over the internal funnel surface, a portion of the surface is in radiative equilibrium with the remaining parts of the surface, such that the internal radiative budget is null. In addition, in masking the lower



**Figure 1** Integration scheme for the funnel shape ( $0 < \theta < \theta_L$ ,  $0 < \phi < 360^\circ$  and  $0 < r < R$ ). (b) Photo of the funnel-shaped condenser ( $7.3 \text{ m}^2$  surface area with  $60^\circ$  cone angle,  $30^\circ$  from horizontal). The internal surface of the experimental condenser is coated with OPUR ([www.opur.fr](http://www.opur.fr)) low density polyethylene film insulated from below with 3cm styrofoam.



**Figure 2** Averaged condenser surface temperatures  $\langle T_c \rangle$  as obtained by numerical simulation with respect to wind speed at 10m elevation. No condensation occurs above the broken line  $\langle T_c \rangle > T_d = 285.5 \text{ K}$  ( $12.5^\circ \text{C}$ ), corresponding to  $T_a = 288 \text{ K}$  ( $15^\circ \text{C}$ ) and  $\text{RH} = 85\%$ .

(and most IR emissive) atmospheric layer to most of the surface, the funnel shape lowers the intensity of downward long wave sky radiation and thus enhances the radiative cooling power. Cooling is thus expected to increase and condensation enhanced with respect to the inclined planar condenser.

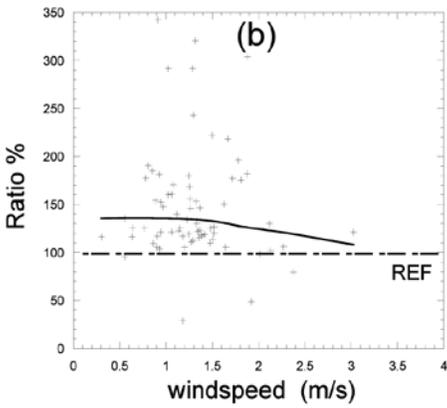
When dealing with a cone, choosing a smaller cone angle (larger  $\alpha$ ) reduces convection heating but also reduces radiative cooling because the radiation solid angle of the sky is lower. The optimal cone angle was deduced from several simulations with different wind speeds and for different cone angles while keeping the cone radius constant at 1.5 m (i.e. the condenser area projected on the ground). The mean condenser surface temperature  $\langle T_c \rangle$  was obtained by averaging the local surface temperature over the condenser area. From simulations at angles  $\alpha = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$  and  $50^\circ$ , the  $\alpha \approx 30^\circ$  angle (cone angle  $\approx 60^\circ$ ) give the best cooling efficiency.

### CHOICE OF DESIGN

Hollow shapes are preferred, as discussed above, with a particular interest for slopes around  $30^\circ$ . This hollow configuration (i) prevents the lower layers of the atmosphere to radiate inside the cone and thus improve cooling, (ii) lowers the influence of wind forced convection, whatever the wind direction, and (iii) confines cold air inside the cone by buoyancy. Incidentally, this angle is also the optimal angle for plane condensers [2].

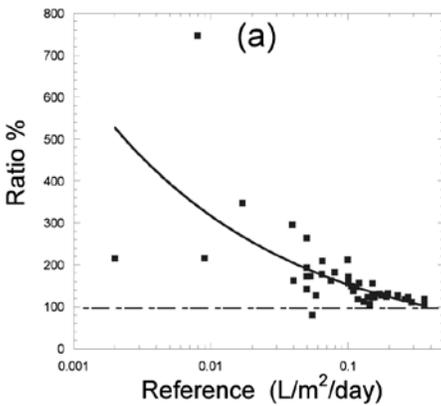
In addition, this particular angle allows water to easily flow by gravity as the gravity forces are only reduced by 50% with respect to vertical.

Such conical shapes have already been tested [1,3], or similar shapes such as a square hollow pyramid with angle  $30^\circ$  from horizontal [4]. The yields are compared to the  $1 \text{ m}^2$



3

Figure 3 Dew gain  $R$  of a  $7.3\text{ m}^2$  cone with respect to a  $1\text{ m}^2$  plane as measured in Ajaccio, France, from May 25, 2005 to November 11, 2005 (107 dew events, see [1]; black curve: 100% weighted fit of data).



4 a-b

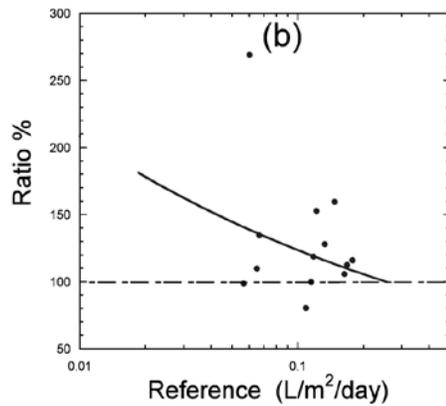


Figure 4 (a) Comparison of the mean daily collected dew amounts between the  $1\text{ m}^2$  planar and  $7.3\text{ m}^2$  conical collectors, from May 25, 2005 to Nov, 11 2005 in Ajaccio, France (semi-log plot; the line is an ad-hoc power law fit with exponent  $-0.3$ ; adapted from Ref. [1]). (b) Comparison of the mean daily collected dew amounts between the  $1\text{ m}^2$  planar and pyramid collectors, March 2004 to May 2005 in Wageningen (The Netherlands). (Semi-log plot; the line is an ad-hoc power law fit with exponent  $-0.23$ ; adapted from Ref. [4]).

planar reference condenser inclined  $30^\circ$  from horizontal through the ratio  $R$ :

$$R = \frac{h_c}{h_o}$$

where  $h_c, \theta$  is the volume of dew water collected per day and per unit projected area of condenser surface. The subscripts ( $c$ ) and ( $o$ ) stands for the collector and planar reference, respectively. When compared with a reference planar condenser inclined  $30^\circ$  from horizontal, the yield is increased. In [1] the improvement is 22% on average, ranging from 30% at windspeeds below 1.5 m/s to 0% above 3 m/s (fig. 3). The gain is larger for low dew yields, see Fig. 4a. The inverted pyramid with angles  $30^\circ$  from horizontal gives on average a 20% higher yield [4], with also a tendency to higher yields for low dew volumes (fig. 4b).

In this study, a pyramidal shape condenser (fig. 5) was assembled but it was not tested in the field because of the above studies. The interest of our design was the use of an industrial flexible texture. The thermal insulation was made according to the principle of a double-skin filled with rockwool.



5

Figure 5 Inverted pyramid with an angle  $30^\circ$  from horizontal and four condensation side. The section at the top is 1 m x 1 m.

6 a-b

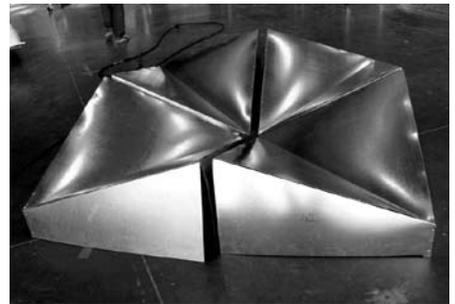
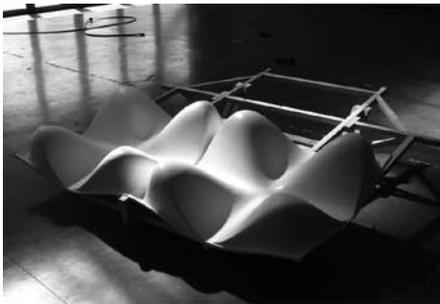


Figure 6 (a) Egg-box shape (2 m x 2 m). (b) Origami shape (1.8 m x 1.8 m).

When considering the construction of large scale collectors, the conical shape is technically difficult to envisage and is costly. In its place, we considered hollow shapes that can be made repetitive to eventually pave a planar or weakly curved surface (roof). We also looked for the aesthetics of the ensemble and the cost of construction. From the many shapes that were studied, we retained only two: the egg-box (EB) and origami (OR) types (fig. 6). Two roofing units were erected,  $4 \text{ m}^2$  projected on the ground (EB) and  $3.24 \text{ m}^2$  (OR). For improved performance, the external surface was coated with a paint containing an additive that makes it hydrophilic and gives it a high infra-red emissivity. Each condenser was coated below with styrofoam thermal isolation. The prototypes were fabricated in 2008 at « Les Grands Ateliers » (Villefontaine - France) during the "Chaleurs urbaines" project (ENSA de Grenoble - Métro).

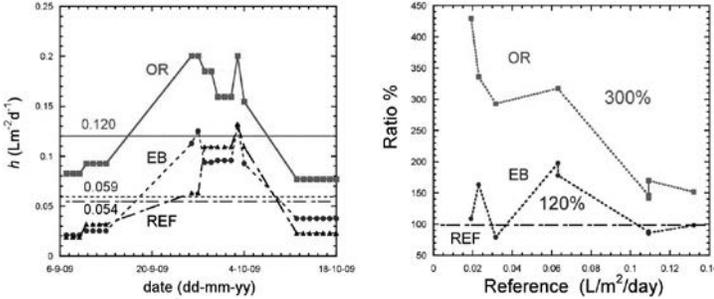
## STUDY SITE

The study site is located south of the Bordeaux urban area, in the town of Pessac at Le Bourghail ( $44^\circ 48'16'' \text{ N}$ ,  $0^\circ 41'34'' \text{ W}$ ), approximately 17 m a.s.l. The dominant wind direction during the night (21:00 - 06:00) is SW ( $240^\circ$ ). The distance from the Atlantic Ocean is about 50 km. The dew condenser has been described in [2]. It consists of a plane foil covering a 1 m x 1 m surface area, thermally isolated from below with a 20 mm thick sheet of polystyrene foam. The foil composition is from [5,6], is 0.39 mm thick and made of 5.0 vol% of  $\text{TiO}_2$  microspheres of 0.19  $\mu\text{m}$  diameter, and 2.0 vol% of  $\text{BaSO}_4$  of 0.8  $\mu\text{m}$



Figure 7 "Egg Box" (EB) and "Origami" (OR) type condensers with the planar reference condenser (R). (T is an additional planar condenser).

7



8 a-b

Figure 8 (a) Evolution of dew yields (Lm<sup>-2</sup>day<sup>-1</sup>) for the origami (OR, squares, full line), egg box (EB, short dashed line) and reference plane (REF, triangles, long dashed line) with mean values - horizontal lines). (b) Ratio  $R$  of the condenser to the reference plane with respect to dew yields (OR, squares, full line), (EB, dashed line). The thick lines are 100% weighting of the data.

diameter embedded in a matrix of low-density polyethylene (LDPE). It also contains approximately 1 vol % of a surfactant additive non-soluble in water. This material improves the mid-infrared emitting properties to provide radiative cooling at room temperature and efficiently reflects the visible (sun) light.

The planar condenser was set at an angle of 30° with respect to horizontal. A PVC gutter collects water into a polyethylene bottle. No scraping was performed and dew water was collected only by natural gravity flow.

The collectors are set above the ground and faced west. The EB collector was slightly inclined (about 10°) to collect water. For the OR structure, water was collected by a hole made in its centre.

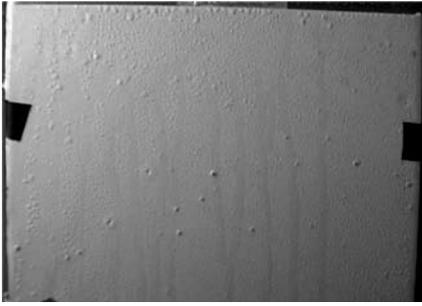
An automatic meteorological station (Oregon Scientific, USA) continuously recorded the following parameters: air relative humidity, air and dew point temperature, wind direction, and windspeed.

## MEASUREMENTS

The data were collected during 51 days, between 29/08/2009 to 18/10/2009; 23 dew events occurred (45% of the period) and 2 days of fog (4% of the period). The yields were compared to the 1 m<sup>2</sup> planar reference condenser through the ratio  $R$  (see Eq. 2).

The evolution of dew yields  $hc, \theta$  for the different structures are reported in fig. 8a.

The mean values (in Lm<sup>-2</sup>day<sup>-1</sup>) are  $\langle h \rangle = 0.054$  for the planar reference, 0.059 for the EB and 0.12 for the OR, corresponding to  $\langle R \rangle = 1.09$  and 2.22 for the EB and OR, respectively. This ratio should be dependent on wind speed (see above fig. 2,



**Figure 9** Edge effects on dew water collection. Drops are larger on the edge where they induce avalanches (rivulets) when sliding down. (Hydrophilic paint on a cooled vertical stainless steel foil. From Ref. [7]).

where a weak dependence is seen). However, other factors are important such as the efficiency of collection, which depends on the collected volume. This is why we report in fig. 8b the variation of  $R$  with respect to  $h\theta$ , the planar reference yield. There is a general tendency to increase dew yields for small yields, with a ratio that can reach about 400% for the OS and 150% for the EB.

## DISCUSSION

It is clear that the OR structure is more effective than the planar reference and than the EB structure, especially for light dew episodes. The lower performance of the EB type when compared to the OR structure is due to the flat top of the EB structure from where dew cannot flow easily, thus reducing the efficiency. In addition, one should note that for our test of the modules, construction irregularities can have a considerable effect on the flow. Without reaching the output of the origamic structure, a better output of the egg-box is possible without joints. The EB structure, however, always remains more effective than a simple plane.

This study shows that the geometry of collectors can have a considerable influence on dew yield. Hollow structures increase cooling by preventing wind influence and are preferred over planar surfaces. However, the efficiency of water collection also matters. When the angle with vertical becomes too low, as on the top of the egg-box bumps, water cannot flow and the yield is reduced.

There is also a positive effect of the edges (fig. 9) for water collection. The dew drops on the edges are forced to coalesce on a line instead of a plane. This enhanced coalescence process speeds up droplet growth such as they detach sooner than the other drops on the substrate. When flowing down, the edge droplets coalesce with other drops, grow in an avalanche-like process and form rivulets. Flowing down is later enhanced where rivulets have formed, which increases the collection of further condensed dew water.

This accelerating mechanism is absent from collectors without sharp edges, like the EB.

## CONCLUDING REMARKS

One of the difficulties of the plane surface to be used for dew collection is its employ as a roof. Classically, with houses having two sides roofing, water flow is difficult in the channels/gutters because their slope is generally not strong enough. One of the principles that has controlled the present research for new forms is then to propose a flexible system increasing the surface of collection (physical dimension), creating structures to be used as shelters (social dimension) while solving by different channels/gutters the problem of the flow for dew water recovery (constructive dimension).

Many forms can then be designed and tested for dew collection. However, they should

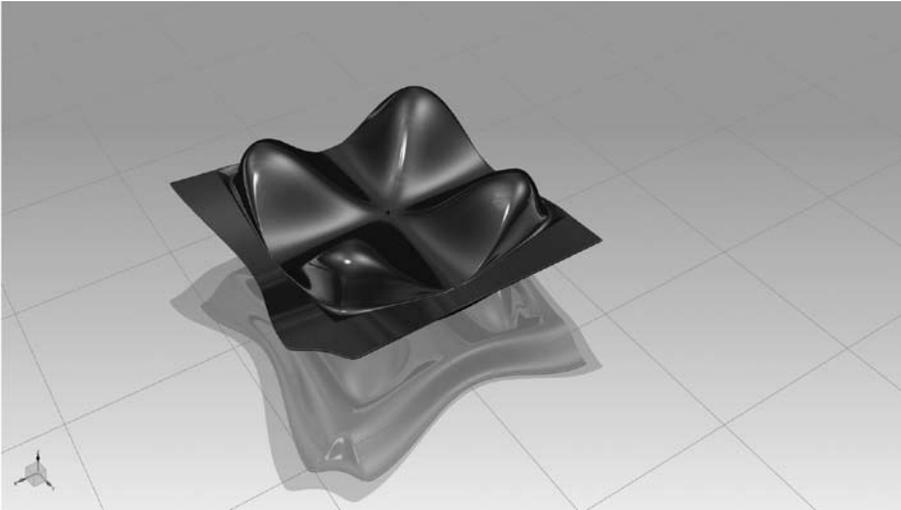


Figure 10 Three-dimensional modelling of the upper shell of the base module with edge and angle.

follow general rules in order to obtain good yields. Our goal in the suggested forms presented here is to increase the surface of collection without increasing the height of the module much. This characteristic associated with repetition and the assembly of the modules suggests that modular structure for dew collection can be used that can also serve as a roof to be used on homes, public use, industry, and other built structures.

## OPENING: A PAVILION PROJECT

Since 2010, as a continuation of the initial experiments, the pavilion project is under development. The goal is to design and build a roof device that combines the principles of dew formation and that of a static self-supporting system.

By combining two double-curved surfaces - one on top and one at the bottom - with an «intermediate mass», we get a statically very interesting sandwich.

Both surfaces are materialized by the lamination of a carbon glass fiber fabric impregnated with matrix polyester. These two layers are connected by polyurethane foam, which guarantees the transfer of the static efforts and gives the necessary resistance to the sharp effects.

The current research aims at optimizing three parameters of the form:

- The geometry of the top layer, following the principles of dew formation: optimizing the average slope, minimizing the routes of water harvest..
- The geometry of the bottom layer guarantees an optimal static behavior: inertia, efforts on the junction areas...
- The thickness (variable) of the «intermediate mass», which is not only proportional to the inertia, but also ensures an adequate thermal insulation by increasing the temperature difference between the upper and lower layers of the device.

By the idealization of a system of assembly among the various units (cables of compression, joints of assembly...) one can provide a roof that can be easily assembled and very light. It can be modulated in its plan dimensions and can thus be placed on pillars, gates, etc. The aerodynamic behavior of the device has also been studied. The elements of the edge should be able to deflect the airflow so as to minimize the effects of depression on the

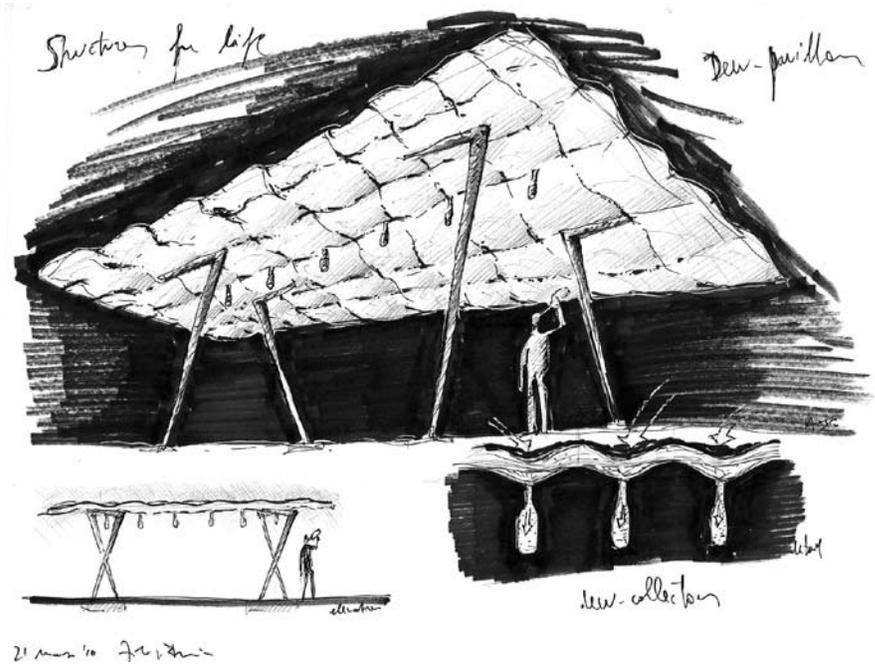


Figure 11 Preliminary sketch of the assemblage of the device

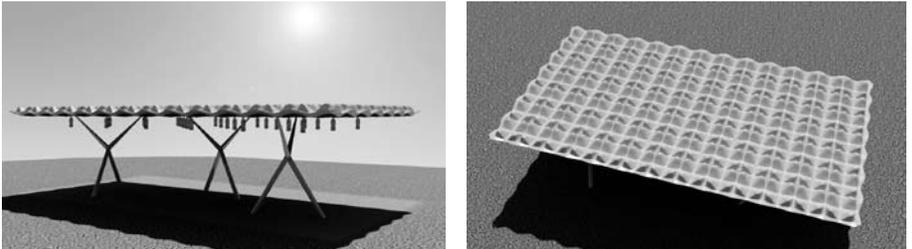


Figure 12 Perspective views of the pavilion: the roof and the pillars/roof in bird's eye view

roof. The positioning of a possible system of facade should also be taken account from the aerodynamic point of view.

The construction of a pavilion prototype will allow us to clearly define all the phases of production, construction, transport and assembly, just as its prices of production.

At the same time, the real effectiveness of the device in arid medium will be checked. Once these data are collected, the commercial phase for the distribution of the "product-house" could start on a broader scale.

#### ACKNOWLEDGMENTS

We gratefully thank Yi Duan, A. Kitromilides, A. Roche, K. Spanou and A. Ulisse for the prototype constructions (more documents at [www.grenoble.archi.fr/chaleursurbaines](http://www.grenoble.archi.fr/chaleursurbaines)). We are very grateful to S. Berkowicz, Hebrew University of Jerusalem, for his critical reading, helpful remarks and relevant suggestions.

## REFERENCES

- Awanou C.N., Hazoume R.P. (1997), Study of natural condensation of atmospheric humidity, in *Renewable Energy*, 10, pp. 19-34
- Beysens D., Milimouk I., Nikolayev V., Muselli M., Marcillat J. (2003), Using radiative cooling to condense atmospheric vapor: a study to improve water yield, in *Journal of Hydrology*, 276, pp. 1-11
- Bibi H., Medici M.G.M., Mongruel A., Beysens D. (2012), Collection of dew water droplets: the effect of substrate edges, PMMH Internal report
- Clus O., Ouazzani J., Muselli M., Nikolayev N., Sharan G., Beysens D. (2009), Comparison of various radiation-cooled dew condensers using computational fluid dynamics, in *Desalination*, 249, pp. 707-712
- Jacobs A.F.G., Heusinkveld B.G., Berkowicz S.M. (2008), Passive dew collection in a grassland area, The Netherlands, in *Atmospheric Research*, 87, pp. 377-385
- Nilsson T.M.J., Vargas W.E., Niklasson G.A., Grangvist C.G. (1994), Condensation of water by radiative cooling, in *Renewable Energy*, 5, pp. 310-317
- Nilsson T.M.J. (1996), Initial experiments on dew collection in Sweden and Tanzania, in *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 40, pp.23-32

# UTILISATION DE RESSOURCES NON-STANDARD POUR LA CONCEPTION DE STRUCTURES ARCHITECTURALES À FAIBLE IMPACT ENVIRONNEMENTAL PROPOSITION D'UN OUTIL NUMÉRIQUE DE CONCEPTION

**BESANÇON FRNCK, BIGNON JEAN-CLAUDE, MONIER VINCENT**

Modèles et simulation pour l'architecture, l'urbanisme et le paysage (MAP) UMR CNRS-MCC 3495  
Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy (ENSAN) - France

## ABSTRACT

This project deals with architecture and engineering involved in the process of architectural design. Based on native irregular components, it aims at developing an innovative approach in the conception and rationalization of non-standard structures. Contemporary architecture and its non-classical structures require the design of customized pieces. This process which is highly energy and resources consumptive does not always take into account the inherent material properties. This project develops a way of optimizing, in architectural structures, the use of native wood pieces that are not industrially transformed (e.g. boughs) or of reused pieces of carpentry. As a consequence, the ecological footprint of the structures would be reduced.

Keywords: Architecture, Structure, Native irregular resources, Environmental foot-print

## LE NON-STANDARD COMME RÉSULTAT DU CHOIX DU MATÉRIAU

Le « nouveau structuralisme » (Oxman 2010) repose aujourd'hui la question du rapport entre forme et structure et au delà entre morphologie et matérialité. Le développement des outils numériques de conception et de fabrication permet l'établissement d'un continuum propice à une pensée architecturale et constructive intégrée.

Cette pensée globalisante n'est pas nouvelle. Elle existait déjà dans l'histoire de l'architecture et de la construction. Ainsi, dans de nombreuses architectures vernaculaires à dominante de production artisanale, l'usage de matériaux locaux disponibles, la reproduction des savoir-faire patiemment acquis, la constitution de patrons architecturaux et techniques efficaces étaient des préalables forts dans la conception des espaces bâtis. Au contraire, et si l'on excepte quelques pratiques de conception comme celles d'Auguste Perret, de Luigi Nervi ou plus récemment de Santiago Calatrava, la plupart des pratiques modernes de l'architecture fondées sur une production industrielle sérialisée avaient rompu ce lien.

C'est probablement un des effets insoupçonnés du numérique que l'on craignait de devoir engendrer des mondes virtuels totalement abstraits que d'avoir favorisé ce retour de la matière structurale dans la conception architecturale contemporaine.

Pourtant derrière ce terme de « nouveau structuralisme » et celui de « non standard » qui lui est souvent associé se jouent des démarches très différentes quand au rapport entre la forme et la matière (Nilsson 2008).

La plupart des travaux actuels dans ce domaine sont fondés sur des processus de conception qui, à partir de la forme d'une enveloppe définie librement ou de manière paramétrique, aboutissent à la production de composants structuraux et d'enveloppe non-réguliers (Rolvink 2010). Ces travaux considèrent les composants de structure comme résultats provenant de l'intersection de plusieurs champs problématiques : la morphologie architecturale, la mécanique des structures, la résistance des matériaux, les technologies de fabrication (Oxman 2010). L'aspect non-standard de ces réalisations est donc pensé comme un *a priori* qui caractérisera l'ouvrage.

Pour notre part, nous souhaitons nous placer dans une démarche inverse où l'aspect non-standard de la structure est généré *a posteriori* par le choix de matériaux qui a lui été réalisé *a priori*. Au delà des aspects doctrinaux ou esthétiques liés à ce renversement de posture, nous fondons notre démarche sur l'idée que la valorisation des ressources peu ou pas transformées est de nature à améliorer l'économie environnementale des processus en question. Nous appuyons notre démarche sur l'idée que le numérique nous offre aujourd'hui la possibilité d'appliquer un raisonnement systématique à un stock d'éléments de ressource tous différents afin de les mettre en oeuvre de manière ingénieuse dans une structure. La matérialité d'un tel ouvrage tirerait pleinement bénéfice de l'emploi optimisé d'éléments spontanément tous différents. A notre connaissance, peu de travaux de recherche portant sur l'intégration de composants en amont du processus de conception d'une structure ont été présentés. Parmi ceux-ci, on mentionnera une recherche portant sur l'emploi de composants natifs irréguliers (Stanton 2010) et une autre sur l'emploi de composants standard en vue d'édifier des structures irrégulières (Ciblac 2010). Nous souhaitons questionner ici l'aller-retour envisagé entre le réel des ressources physiques disponibles, le virtuel du processus algorithmique de conception et la matérialité finale de la structure. Pour cela, nous avons choisi de travailler avec le modèleur 3D Rhinoceros associé au plugin de programmation paramétrique Grasshopper. Le modèleur 3D offre la possibilité de visualiser les résultats obtenus et Grasshopper permet d'élaborer des algorithmes susceptibles de produire rapidement plusieurs propositions de structures en faisant varier des paramètres.

## **L'EMPLOI ET LA MODÉLISATION DE RESSOURCES PHYSIQUEMENT DIFFÉRENCIÉES**

Cette partie vise à présenter la typologie choisie pour les éléments de ressource qui seront mis en oeuvre ainsi que la caractérisation et la modélisation qui est réalisée à partir des éléments.

### **Le choix des éléments de ressource**

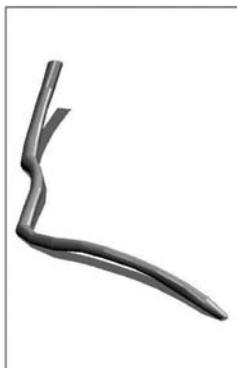
L'étude présentée ici porte sur l'usage d'éléments de bois natifs comme des branches auxquelles on applique peu ou pas de transformation industrielle.

Les courbures, ramifications et variations de sections éventuelles que peuvent présenter les éléments sont autant de caractéristiques qui permettront à terme de positionner de façon optimale l'élément dans la structure. Deux manières de modéliser les éléments de ressource sont envisagées ici : la première consiste à relever manuellement des paramètres sur chaque élément puis à implémenter un algorithme Grasshopper avec ces paramètres (Monier 2012), la seconde consiste à relever un nuage de point sur chaque élément au moyen d'un bras articulé.

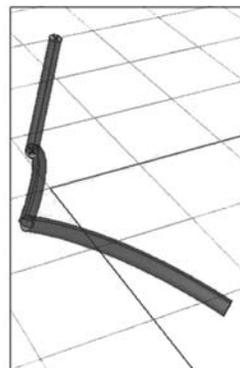
Figure 1  
Branche originale,  
modèle obtenu  
avec le bras  
articulé et modèle  
paramétrique  
simplifié



branche réelle



modèle Rhinocéros



modèle paramétrique

1

La première méthode aboutit à une modélisation plus approximative (du fait des difficultés rencontrées avec la métrologie dans l'espace) que la seconde mais fournit directement un modèle numérique paramétré exploitable par l'algorithme de génération de la structure. La méthode du bras articulé fournit un modèle plus précis dans l'environnement Rhinoceros qui doit ensuite être traité avant d'être utilisé par dans l'algorithme de positionnement. Finalement on se ramènera toujours à une modélisation tubulaire paramétrée comme celle présentée figure 1.

Le résultat obtenu pour la structure une fois tous les éléments positionnés sera d'autant plus judicieux que la modélisation des éléments de ressource aura été réalisée avec précision. Nous nous limitons toutefois à des modèles relativement simples afin de pouvoir développer la partie suivante qui consiste à positionner les éléments les uns par rapport aux autres afin d'édifier une structure mécaniquement cohérente.

### **L'identification des performances mécaniques des éléments de ressource**

Pour prendre en compte la variation de la section de l'élément de ressource ou toute particularité géométrique ayant une influence sur sa résistance mécanique, nous définissons un coefficient de résistance de l'élément. Ce coefficient traduit la résistance globale de l'élément en prenant en compte les faiblesses de celui-ci. Cela permet ensuite au niveau de l'algorithme de différencier des zones plus ou moins sollicitées dans la structure et ainsi de justifier le positionnement de l'élément dans celle-ci. Ce coefficient est établi à partir de la section et des caractéristiques mécaniques du matériau qui constitue l'élément.

## **LE TRAITEMENT DIGITAL ET ALGORITHMIQUE SYSTÉMATISÉ DE LA RESSOURCE**

### **La définition préalable des intentions architecturales**

L'outil informatique permet au moyen d'algorithmes de systématiser les opérations de positionnement qui se répètent pour chaque élément, même s'ils présentent des caractéristiques différenciées comme c'est le cas ici. Une intention formelle architecturale sous la forme d'une surface de référence est prise comme base pour générer la structure. C'est au concepteur de dessiner cette surface dans un premier temps puis d'y appliquer un « pattern » structural dans un second temps. L'algorithme de positionnement intervient ensuite pour agencer les ressources disponibles selon l'intention formulée par le concepteur.

Pour que l'algorithme prenne en compte des notions de résistance structurale, le « pattern » élaboré est soumis à un cas de charges sous certaines hypothèses de liaisons et d'appuis

afin d'observer les efforts générés dans la structure. On affecte à chaque segment du « pattern » destiné à recevoir un élément de ressource un coefficient de résistance mécanique déduit de cette analyse. L'étape suivante consiste à distribuer les éléments de ressource de manière optimisée sur le « pattern ».

### L'algorithme de positionnement

L'algorithme est écrit en VB.NET dans l'interface Grasshopper de Rhinoceros. Il est encapsulé dans un composant Grasshopper offrant la possibilité de définir soi-même les variables d'entrée et de sortie ainsi que le code intermédiaire régissant les actions à effectuer entre ces variables.

Les entrées définies sont les suivantes :

- liste des ressources disponibles et coefficients de résistance associés
- liste des segments du « pattern » et coefficients de résistance associés
- surface de référence
- pourcentage d'écart entre les coefficients de résistance
- distance maximale d'écart avec la surface de référence

En sortie, on récupère la liste des ressources positionnées sur la surface de référence.

Cette liste comprend pour chaque élément toutes les caractéristiques qui lui ont été associées à travers le modèle paramétrique ainsi que les informations relative à la position qui lui a été affectée sur la surface de référence.

L'algorithme commence par la création de deux tableaux :

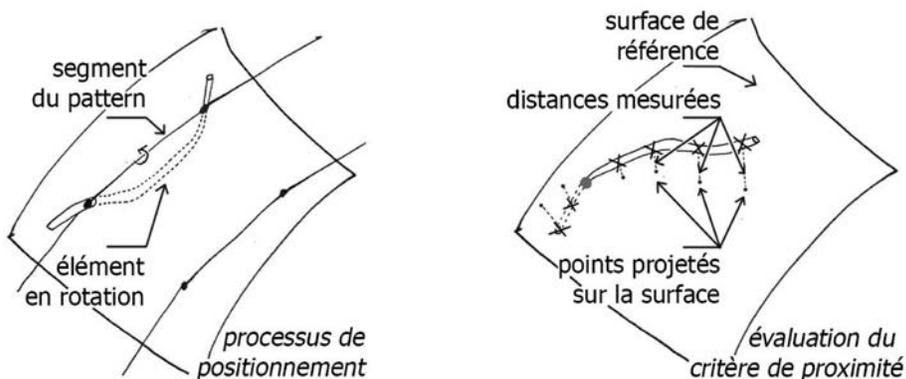
- le tableau des éléments de ressource comporte sur chaque ligne un élément de ressource, un booléen qui informe sur la disponibilité de l'élément et la valeur numérique du *coefficient de résistance* de l'élément. Lorsque l'élément est positionné, le booléen affiche 0.
- le tableau des segments du pattern est construit de la même façon que précédemment, il comporte sur chaque ligne un segment du pattern, un booléen qui informe sur l'occupation du segment par un élément et la valeur numérique du coefficient de résistance à atteindre dans le segment. Lorsqu'un élément de ressource occupe le segment, le booléen affiche 0.

Ensuite, des boucles *for* permettent de rechercher pour chaque élément de ressource une position satisfaisant le critère de proximité avec la surface de référence sur un des segments qui composent le pattern structural. L'algorithme ne retient, pour un élément donné, que les segments dont l'écart entre les coefficients de résistance du segment et de l'élément ne dépasse pas le pourcentage donné en entrée. L'élément est testé successivement dans différentes positions angulaires et sur chacun des segments retenus jusqu'à ce que l'algorithme rencontre une position qui satisfasse le critère de proximité. Dès lors qu'une position satisfait le critère, celle-ci est mémorisée et les booléens associés à l'élément et au segment correspondant sont désactivés. L'algorithme passe alors au positionnement de l'élément suivant.

Le critère de proximité avec la surface de référence est satisfait si un certain nombre de points répartis uniformément le long de l'élément de ressource sont à une distance de la surface de référence inférieure à la distance maximale donnée en entrée de l'algorithme. La figure 2 illustre ce processus.

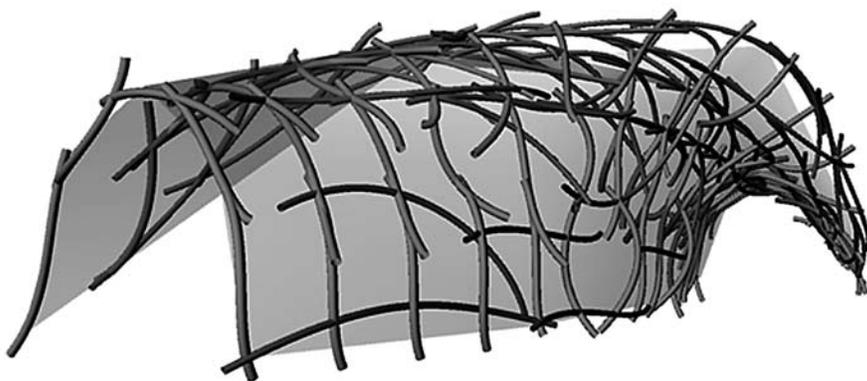
Ainsi, l'algorithme formule différentes propositions structurales selon le pourcentage d'écart entre les coefficients de résistance et l'exigence de proximité avec la surface de référence imposés. Dans le cas d'un pourcentage d'écart trop faible ou d'une exigence de proximité trop élevée, l'algorithme propose une structure incomplète, laissant vides les segments où plus aucune des ressources disponibles ne convient.

Figure 2  
Rotation d'un élément autour d'une portion de pattern et principe de l'évaluation du critère de proximité



2

Figure 3  
Exemple d'une structure obtenue



3

### La répartition optimisée selon un « pattern »

Une façon de positionner les éléments de ressource consiste à suivre un « pattern » constructif avec les ressources disponibles. Ce « pattern » peut s'apparenter à des techniques de construction traditionnelles (grille d'arcs, résille d'arête à trois noeuds...) ou adopter une configuration plus libre pour aboutir à des structures par entremêlement de type nid d'oiseau ou treillis irrégulier. Toutefois, le « pattern » sera toujours décomposé en segments susceptibles de recevoir un élément de ressource.

La figure 3 présente l'exemple d'une structure à deux voutes alternées réalisée en remplissant un pattern bidirectionnel orthogonal avec des éléments de ressource linéiques à plusieurs courbures.

## LA MISE EN OEUVRE PHYSIQUE

Une fois le modèle virtuel développé, l'enjeu majeur est d'assurer la faisabilité technique de la structure et de permettre la réalisation physique du projet numérique élaboré.

### Le repérage des éléments pour leur mise en oeuvre sur le chantier

L'étape intermédiaire de conception de la structure au moyen d'un algorithme implique que par la suite on puisse reconstituer sans mal la structure sur le chantier et pour cela

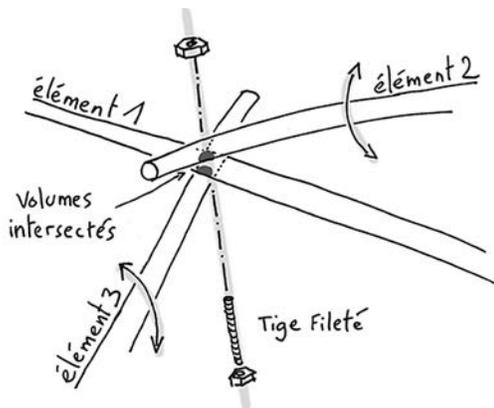


Figure 4  
Liaisonnement de deux éléments fils (éléments 2 et 3) à un élément parent (élément 1) selon un axe de liaison

4

identifier chaque élément correctement. Le repérage sur un élément des points de contacts avec les autres éléments est fait au moyen de l'abscisse curviligne mesurée sur la fibre médiane de l'élément. Dans un second temps, selon le mode de liaison choisi, les points de contacts peuvent nécessiter un usinage. La réalisation d'assemblage mi-bois ou le perçage préalable au passage d'une tige fileté impose un repérage angulaire au niveau du point de contact.

### Le liaisonnement des éléments entre eux

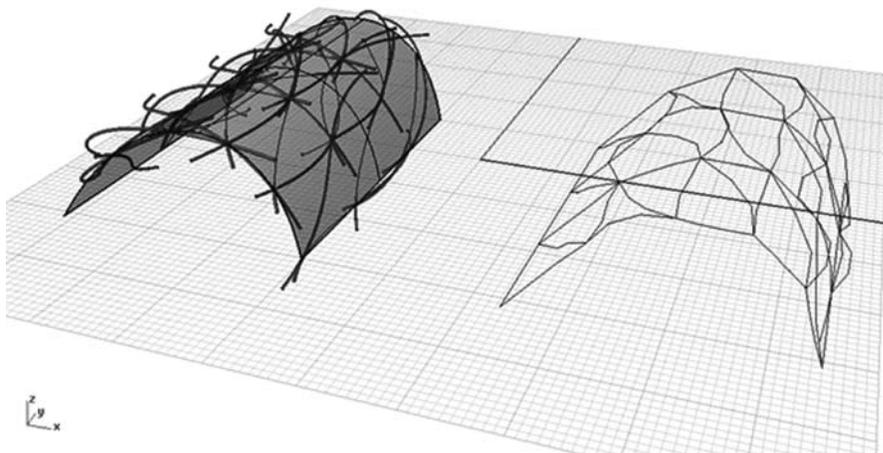
Une fois positionnés dans l'espace par l'algorithme, il s'agit de liaisonner les éléments les uns aux autres pour assurer stabilité, rigidité et résistance de la structure. Pour permettre cela, on met en place un nouveau traitement algorithmique qui ajuste les positions obtenues précédemment. L'optimisation de chacune des positions pour prendre en compte les contraintes de liaisons a lieu successivement et de manière répétée pour chaque élément. Chaque nouvelle opération de repositionnement prenant en compte les opérations précédentes. Cela permet de tendre progressivement vers une configuration satisfaisante pour chaque noeud tout en perturbant au minimum l'ensemble de la structure. L'algorithme de positionnement présenté précédemment dispose les éléments selon les segments du « pattern » tels que leurs fibres médianes passent par les points extrêmes des segments. Les noeuds obtenus sont donc jusqu'ici ponctuels et la manipulation suivante consiste à introduire l'entraxe généré par les sections des différents éléments se rencontrant au noeud. Le repositionnement est effectué par le déplacement d'éléments fils par rapport à un élément considéré comme parent. Le parent est choisi comme étant celui qui présente la section la plus importante ou bien celui dont le noeud ne se trouve pas à une extrémité.

Un axe de liaison est défini au niveau du noeud normalement à la surface de référence. Le déplacement des éléments fils est réalisé par rotation de l'élément par rapport à un autre noeud de ce même élément dans le plan formé par ce second noeud et l'axe de liaison du premier noeud. Ainsi les fibres médianes des différents éléments qui se rencontrent au noeud ont un point d'intersection avec l'axe de liaison. Cet axe de liaison peut être l'axe d'une tige fileté qui viendrait liaisonner les différents éléments comme le montre l'illustration suivante.

### La résistance mécanique de l'ensemble de la structure

Les propositions de structures formulées par l'algorithme intègrent des notions structurelles en raison des coefficients de résistance pris en compte dans la conception mais ne garantissent aucune performance mécanique. Le traitement en aval de l'algorithme consiste à évaluer au moyen d'un logiciel de calcul la résistance mécanique

Figure 5  
Maquette numérique de conception et maquette filaire destinée aux logiciels de calculs



5

de l'ensemble de la structure à partir des hypothèses faites sur les liaisons, les caractéristiques géométriques et mécaniques des composants ainsi que des charges appliquées.

L'intérêt de l'algorithme à ce moment de l'évaluation est de pouvoir proposer, moyennant une programmation préalable, directement une liste de données exploitables par le logiciel de calcul. Ainsi, le concepteur a tout intérêt à produire une population de structures qu'il évaluera par la suite et parmi lesquelles il sélectionnera celle répondant le mieux à ses critères. La figure 5 présente dans l'interface de visualisation de Rhinoceros une maquette numérique de conception et la simplification filaire qui peut être obtenue directement avec Grasshopper. Cette maquette filaire peut être transmise comme modèle géométrique à un logiciel de calcul aux éléments finis pour déterminer au moyen de la théorie des poutres les contraintes qui sont générées dans la structure.

### L'enveloppe

Encore une fois, la maquette numérique nous est d'une grande utilité pour élaborer l'enveloppe de la structure. En effet, nous disposons des coordonnées dans l'espace de chaque point de la structure et il est donc possible de procéder à la recherche de formes minimales pour définir la géométrie d'un textile structural qui vienne épouser la forme de la structure.

Ce type d'enveloppe impose toutefois certaines contraintes géométriques en termes de convexité à intégrer dès la définition de l'intention formelle. De plus, elle modifie le champ de forces appliquées à la structure. La toile répercutée sur la structure un chargement supplémentaire du fait de sa mise en tension et change le comportement de la structure lorsqu'elle est soumise au vent ou à la neige.

Différentes méthodes de recherche de forme peuvent être adoptées comme la discrétisation en réseaux de câbles où la méthode des Densités de Contraintes Surfâciques [Maurin 1988]. L'intégration de cette dernière partie de la réflexion à la démarche algorithmique présentée précédemment fera l'objet de développements futurs.

## CONCLUSION

Nos travaux visent à développer judicieusement des moyens de conception tirant profit des outils informatiques. Cet article présente une démarche qui intègre une dimension informatique forte tout en préservant le caractère, l'aspect, la forme, la géométrie du matériau de ressource employé et ainsi valorisant l'aspect final de la structure.

Il s'agit d'entretenir un lien permanent entre le matériau mis en œuvre, la technique de conception et la matérialité de la structure finalement conçue.

Les perspectives ouvertes ici en matière de conception digitale ancrée dans une démarche de valorisation des matériaux existant démontrent les potentialités qu'offre une intégration des questions de structure et d'impact environnemental dès les prémices du projet.

Dans le cadre de ce travail nous avons limité notre réflexion à l'usage d'une ressource de type branche, mais la démarche peut être étendue à d'autres ressources comme des bois de réemploi provenant du démontage de bâtiment et même l'usage de chutes d'industrie qui ne connaissent le plus souvent qu'une « valorisation » énergétique.

## REFERENCES

- Ciblac, T. (2010), Conception paramétrique en fonction d'éléments standard. Application à des systèmes d'éléments de longueur constante, SCAN'10, Marseille
- Maurin B. (1998), Morphogénèse des membranes textiles architecturale, thèse, Université de Montpellier 2, Montpellier
- Monier V., Duchanois G., Bignon J.-C. (2012), Génération de structures non-standard au moyen d'éléments natifs irréguliers en bois, Elaboration d'un outil numérique de conception architecturale, SCAN'12, Paris
- Nilsson, F. (2008) New technology, new tectonics? On architectural and structural expressions with digital tools. Tectonics Making Meaning
- Oxman R. & R. (2010) The New Structuralism: Design, Engineering and Architectural Technologies. Architectural Design. John Wiley & Sons Ltd. 2010
- Rolvink A., (2010) Parametric Structural Design and beyond, IJAC, sept. 2010
- Stanton, C. (2010). Digitally Mediated Use of Localized Material in Architecture. Sigradi 2010, Bogota.

# RECIPROCAL SYSTEMS BASED ON PLANAR ELEMENTS

## MORPHOLOGY, CLASSIFICATION AND DESIGN ISSUES

BAVEREL OLIVIER<sup>1</sup>, PUGNALE ALBERTO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ENSA Grenoble, AECC - France

<sup>2</sup>Faculty of Architecture, Building and Planning, University of Melbourne - Australia

### ABSTRACT

This paper deals with the design of reciprocal spatial configurations based on the use of planar elements, which are investigated and classified according to their morphological characteristics and potential.

Reciprocal structures are generally designed with the use of linear elements. Since their historical conception, at least in Western culture, they have been strictly related to the use of short timber beams to cover large spans. This structural principle is described for instance by Villard de Honnecourt, who drew in his sketchbooks reciprocal grillage assemblies for the construction of floors, between 1225 and 1250, followed by Sebastiano Serlio in 1566, John Wallis in 1695, and it can be still found in several treatises of carpentry, written during the XIX century.

From the morphological point of view, reciprocal structures have been generally used to develop bridges, slabs, domes and shells. We could conceptually refer to the first case linear developments. Examples are the so-called 'Rainbow Bridge' in Shandong or the Leonardo's concept for a bridge structure. In the second and third cases we could refer to a two-dimensional development, since they can be conceptually conceived and represented as surfaces. Several examples have been built by the architects Ishii, Kijima and Kan.

In architecture, reciprocal structures are rarely used due to a set of practical issues. Their simple technology allow a simple and rapid construction,. However, problems related to spatial complexity, structural calculations and cladding, generally encourage designers in exploring other structural typologies, making their use suitable just for temporary or experimental structures.

In this framework, the authors propose a first study of reciprocal systems based on the use of non-linear elements, i.e. 2D planar panels.

Such configurations are classified in this paper according to the shapes and properties of their composing elements. For example:

- most of the planar elements can generate the same configurations of beam elements;
- some planar elements can be disassembled in two or more linear elements forming a similar configuration;

- some planar elements can be composed in order to take advantage of their shape peculiarities, for structural or construction purposes. Configurations belonging to this category could be also refer to the previous ones.

The presented categories are supported by drawings and photographs of prototypes, also realized with the contribute of the students of the *École des Ponts in Paris* (developed during a workshop run by the authors in March 2012) and the *University of Melbourne*.

Keywords: reciprocal structures, nexorades, spatial structures

## INTRODUCTION

The principle of reciprocity in structural design and construction refers to the use of load bearing elements to compose a spatial configuration wherein they are mutually supported one another.

Reciprocal structures are generally designed with the use of linear elements. Since their historical conception, at least in Western culture, they have been strictly related to the use of short timber beams to cover large spans. Main applications are related to bridges, slabs domes and shells [1] [2] and [4].

In this framework, the authors propose a first study of reciprocal systems based on the use of planar elements. The paper first recalls the concept and characteristics of reciprocal structures based on linear beams. Thus, different types of reciprocal configurations based on planar panels are described and a first attempt of classification is proposed as well.

## RECIPROCAL CONFIGURATIONS BASED ON LINEAR ELEMENTS

From the conceptual point of view, the development of a reciprocal structure requires: (1) the presence of at least two elements allowing the generation of a certain forced interaction; (2) that each element of the composition must support and be supported by another one; (3) that every supported element must meet its support along the span and never in the vertices (in order to avoid the generation of a space grid with pin-joints). Figures 1 and 2 show an elementary example of reciprocal structure respecting such conditions. This basic configuration is developed with linear elements and is generally called 'fan' or 'nexor'. It can be assembled with other similar systems in order to generate more complicated structures.

From the geometrical point of view, a reciprocal configuration is defined by:

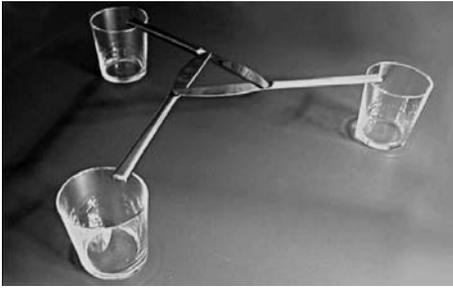
(1) the eccentricity between elements; (2) the engagement length (i.e. the distance between the supported element and the bar end); (3) the length of each element; (4) the style/orientation; (5) the end disposition and (6) the topology of the grid chosen. With these parameters, it is possible to describe and automatically generate any configuration, as shown in the following section.

### Engagement length and eccentricity

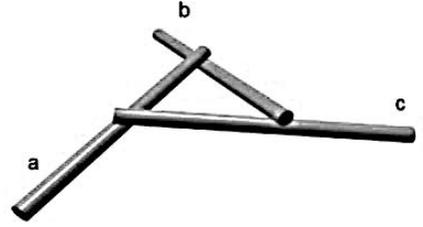
The engagement length represents the distance between the bar end of a supporting element and its meeting point with the supported one. As shown in figure 3 left, it is denoted by  $\lambda$  and can vary between 0 and L, which indicates the total length of the supporting bar.

The eccentricity is indeed the shortest distance between the axes of two connected elements and provides three-dimensionality to the resulting assembly (figure 3 right).

Figure 1 - 2  
An elementary reciprocal system.

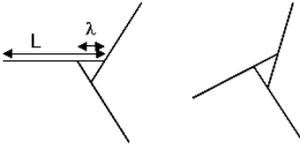


1



2

Figure 3  
Fans with identical and different engagement lengths (left); changes in eccentricity due to different elements radii (right).



3

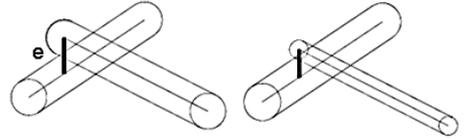
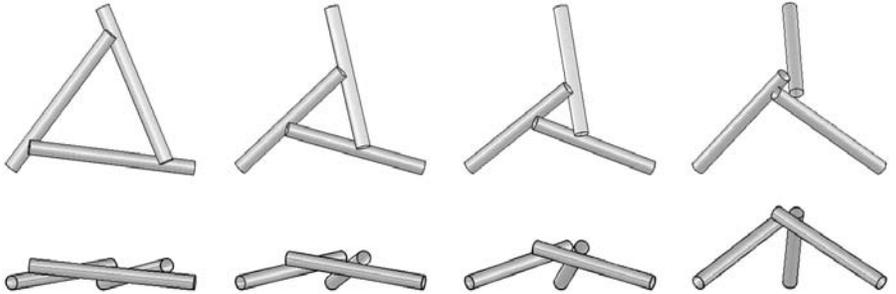
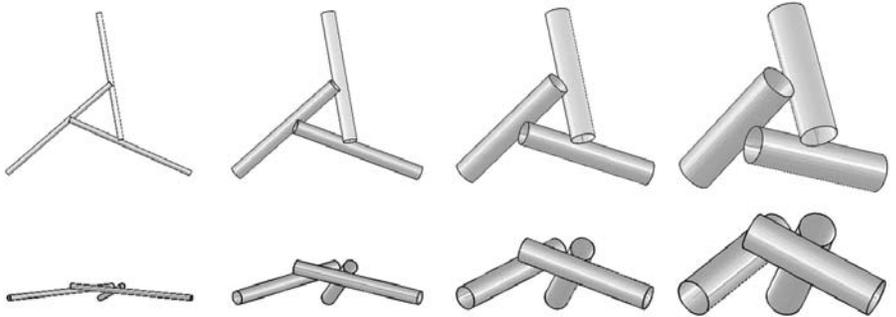


Figure 4  
Basic reciprocal configuration with fixed eccentricity and decreasing engagement length.



4

Figure 5  
Basic reciprocal configuration with fixed engagement length and increasing eccentricity.



5

If the elements of a reciprocal configuration have an identical circular cross section, the eccentricity is equal to the diameter of the element. In other cases, this parameter could be more complex to calculate and not constant due to angle variations between elements. Figures 4 and 5 show how changes in eccentricity and engagement length can affect the geometry of a simple reciprocal configuration made of three linear elements.



Figure 6  
Plan view of a left fan and right fan.

6



Figure 7  
A fan with positive end dispositions and a fan with 'up' and 'down' end dispositions.

7

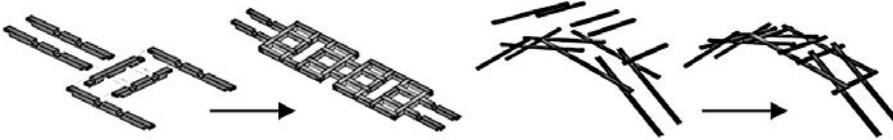


Figure 8  
Flat (with notched joints) vs. curved (with superimposition of bars) reciprocal configurations.

8

### Style/orientation

Every simple reciprocal structure (fan) can be built in two different manners according to its orientation. The method to determine it is to virtually push each of the elements of a fan and observe the rotation direction. When it creates a clockwise moment is called a 'right fan', while with an anticlockwise moment is identified as 'left fan' (figure 6).

### End disposition

The end disposition considers whether an element of a reciprocal configuration is placed above or below its support. In figure 7, left part, a fan created with only above, or positive, end dispositions is shown. By contrast, the right image represents a mix of positive and negative end dispositions.

### Assembly and growth possibilities

Simple fans can be assembled to obtain more complex configurations with endless possibilities. From the geometrical and architectural point of views, some growth categories are worth to be mentioned.

First, reciprocal configurations can generate flat or curved structures. As shown in figure 8, the composing elements can be shaped in order to obtain flat bridges or slabs, while with simple superimposition of bars the final assembly is intrinsically developed in space.

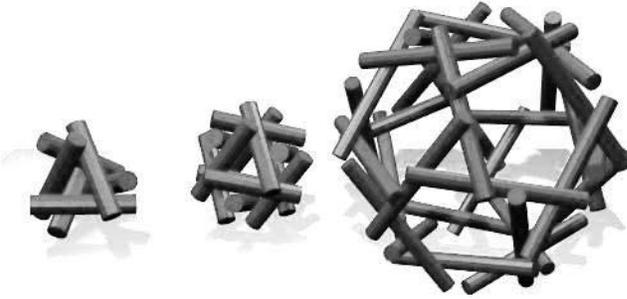
Second, the growth of reciprocal structures can be classified according to the development directions of the final geometry. Bridges are therefore 1D or linear configurations while shells are 2D or surface-like structures. Other assemblies, not belonging to the previous two categories, are 3D or 'fully' spatial configurations.

**Figure 9**  
 Left, 1D reciprocal bridge inspired by the Leonardo's bridge; Middle, 2D reciprocal roof with fans composed by four elements; Right: 3D conceptual reciprocal structure by Popovic Larsen.



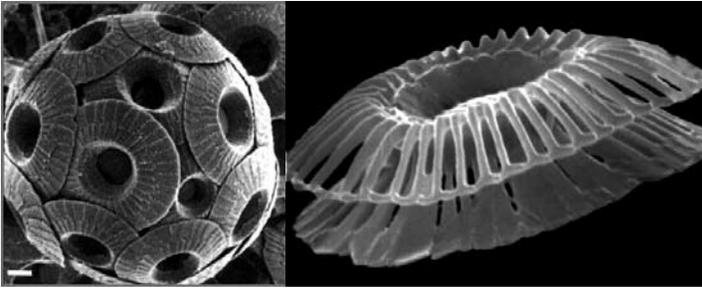
9

**Figure 10**  
 Reciprocal polyhedra: 'tetrahedric' (left), 'cubic' (middle) and 'dodecahedric' (right).



10

**Figure 11**  
 View of a coccolithophore and an elementary tile.



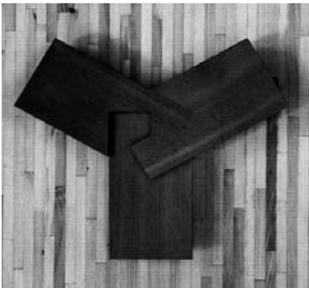
11

Reciprocal structures can be also obtained from the geometry of regular polyhedra. Within this family, figure 10 shows that tetrahedric, cubic and dodecahedric reciprocal configurations can be built with fans identical aspect ratio.

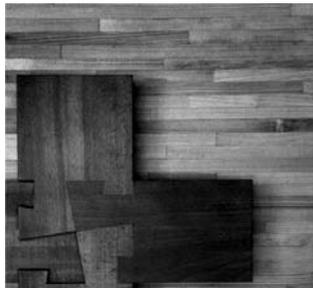
## RECIPROCAL CONFIGURATIONS BASED ON PLANAR ELEMENTS

Throughout history, reciprocal systems have been mainly developed with linear or elongated elements. In Europe, the concept of spanning distances longer than the length of the available timber beams was the key reason for the use of such structures, which were therefore called 'short-beams'. In Orient and especially in China, the use of interwoven strips of bamboo for the construction of baskets is an old tradition that was transferred to objects of larger scale, bringing to the development of reciprocal configurations based on linear elements as well.

However, such principle can be also extended to the use of planar elements as suggested by the rare natural example of the Cocolith. As shown in figure 11, in this case the composing elements are made of circular tiles instead of elongated members, inspiring a new research direction for finding new shapes and geometries for reciprocal structures.

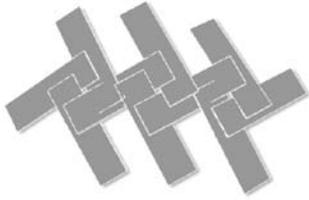


12



13

Figure 12-13  
Joints of  
reciprocal  
configurations  
based on planar  
elements by  
Werner Blaser.



14

Figure 14  
Reciprocal fans  
based on planar  
elements used  
as 'thick' linear  
elements.

### Material and Joints

Some furniture realized by Werner Blaser [5] shows how the use of planar elements for the realization of reciprocal configurations highly moves the attention in the study of materials and joints. As shown in figures 12-13, the use of timber as well as superimposition of elements, commonly used in reciprocal configurations based on linear elements, find here new design possibilities which are completely to be explored.

### ASSEMBLY AND GROWTH: AN ATTEMPT OF CLASSIFICATION

In order to guide future morphological researches, we would propose to distinguish three main categories of reciprocal configurations based on planar elements, as shown below.

#### Planar elements used as 'thick' linear elements

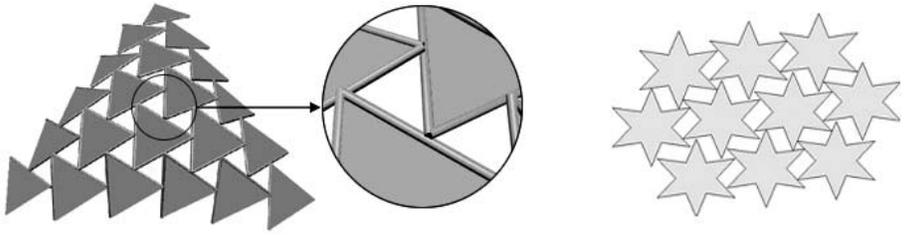
This category includes all those reciprocal structures in which the composing planar elements are assembled in the same way of linear ones.

#### Planar elements used as 'groups' of linear elements

This second category includes all those reciprocal structures in which the composing planar elements can be substituted by a fan of linear elements, i.e. the planar element is conceptually grouping linear ones forming reciprocal fans. In this case the focus is on the design of the composing element.

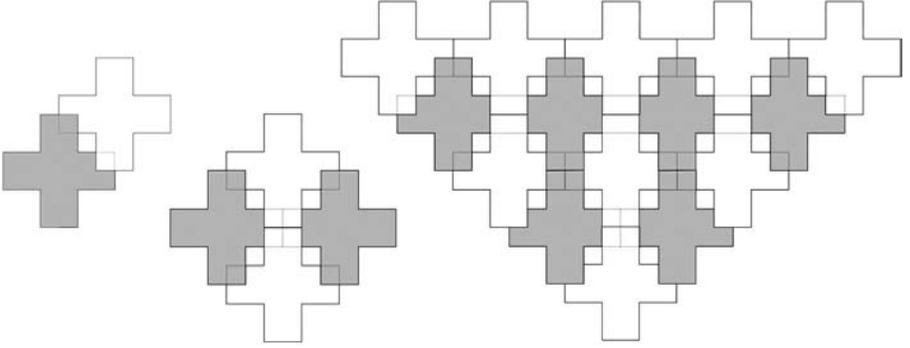
Figure 15 shows the simplest example of a reciprocal structure belonging to this category, which is made of triangles replacing fans of three linear elements each. The tiles can have three different engagement lengths where only two are possible for elongated elements. These tiles can be transformed in a configuration with three linear elements that are the edges of the triangle. The arrangement in figure 16 shows a 6 vertices star element. The star shape is the only solution to allow the elements to be placed on top of one another otherwise the tiles would overlap one another. This type of tile could have 6

**Figure 15-16**  
Triangular tiles, perspective view and zoom on a tile (left); Hexagonal arrangement with 6 vertices stars - plan view (right).



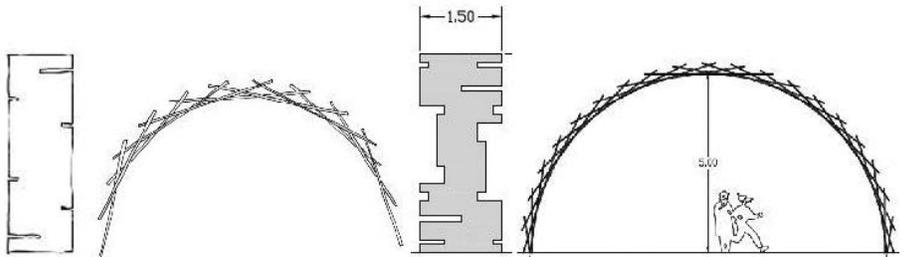
15-16

**Figure 17**  
Reciprocal configuration made of cross tiles, plan view.



17

**Figure 18-19**  
Example of tile with slots (left), example of a complex tile with slots (right) and their resulting shapes.



18-19

different engagement lengths. Figure 17 shows a configuration made of crosses replacing fans made of 4 linear elements.

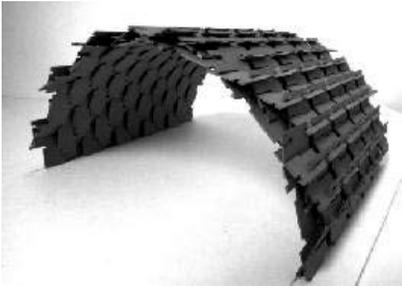
Figures 18 and 19 show a reinterpretation by H. Logan [3] of the Leonardo's bridge developed with planar elements. Here, the tiles are connected with a slot that can be quite simple (figure 18), but working on shaping the composing element more complex configurations can be obtained (figure 19). This configuration connects many tiles together and, as drawn in the elevation, it creates a truss effect. The stiffness of the structure is therefore not only depending on the stiffness of a tile but of the equivalent truss.

Figures 20 and 21 show perspective views of the structure represented in Figure 19.

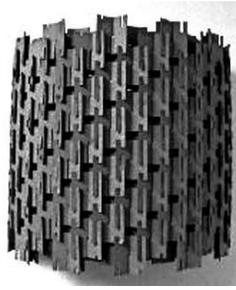
### **Planar elements used in other ways than the previous two categories**

In this category two different configurations can be distinguished: (1) where the notch between the tiles transmits a bending moment (Figures 22-23) and (2) where the notch permits to the element to transmit traction or compression forces (Figures 24-25).

Figure 22 shows the connection between two planar elements - this assembly permits to transfer bending moment and give the structural stability of the configuration.

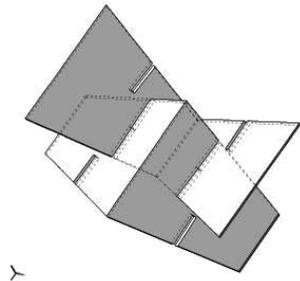


20



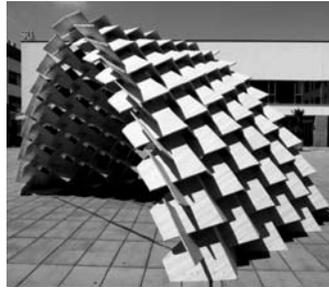
21

Figure 20-21  
Resulting  
structure made  
with the complex  
tile.



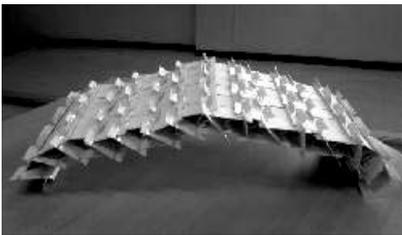
Y

22

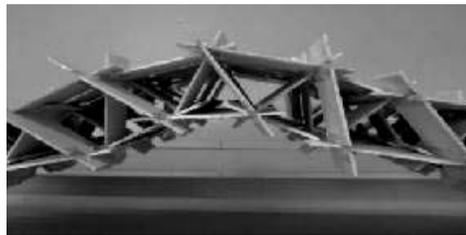


23

Figure 22-23  
A specific tile  
element and the  
resulting shape  
from IBOIS EPFL



24



25

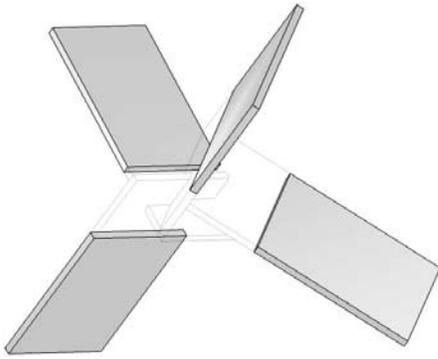
Figure 24-25  
A truss made  
with tiles

The second type of such configurations creates a sort of truss-like structure (figures 24-25). Another example of configuration belonging to this category is shown in figures 26-33. A basic fan is obtained as a reciprocal structure of the first category but with small engagement length (figures 26-27). By means of interlocking and superimposition, such a basic configuration can be extended in a surface-like way (figures 28-29) or as a fully 3D structure (figures 30-31).

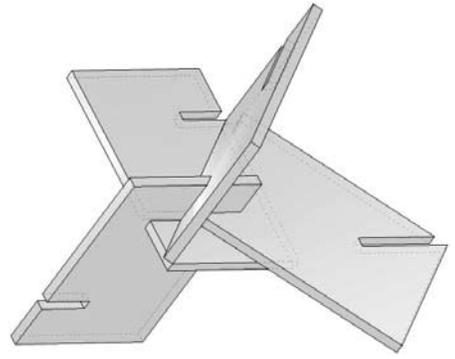
## CONCLUSIONS

The paper has presented a first study of reciprocal systems based on the use of planar elements. First, the parameters that define a reciprocal system with elongated elements are reminded. Second, configurations based on planar elements are tentatively classified in three categories where the composing panels are used: (1) as 'thick' linear elements; (2) as 'groups' of linear elements and (3) in other ways than the previous two categories. For each category several examples are given, displaying a wide range of resulting geometries. This first investigation has aimed to show the morphological potential of reciprocal structures based on planar elements, demonstrating the need of further geometrical, structural and construction explorations.

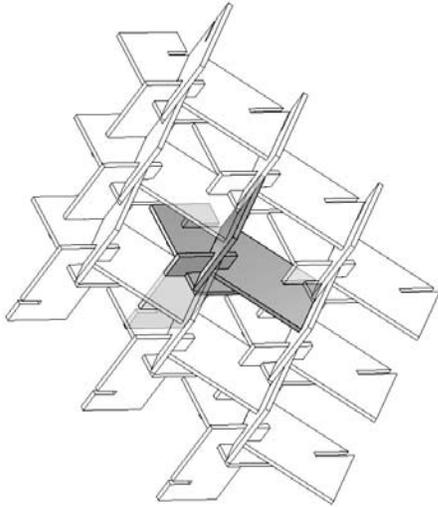
Figure 26-31  
Reciprocal  
structure based  
on planar  
elements  
developed with  
the students of  
the École des  
Ponts in Paris.  
Realization of  
the basic fan  
(26-27), growth  
possibilities as  
surface-like  
structure (28-29)  
and growth as  
spatial structure  
(30-31).



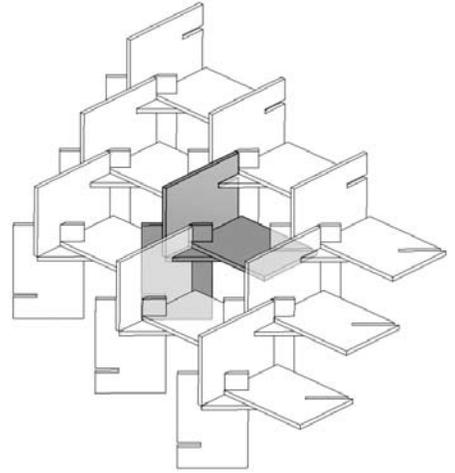
26



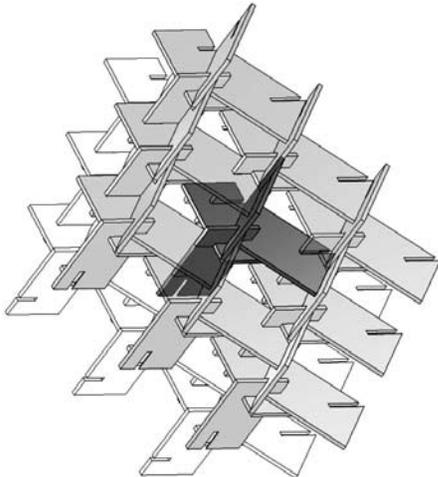
27



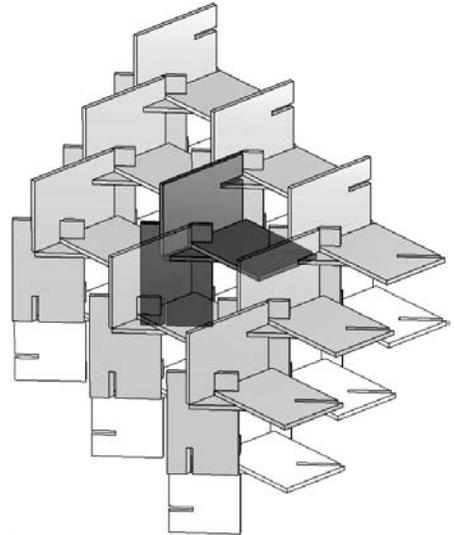
28



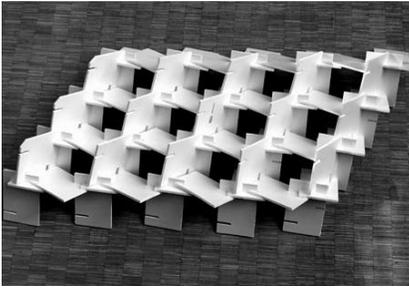
29



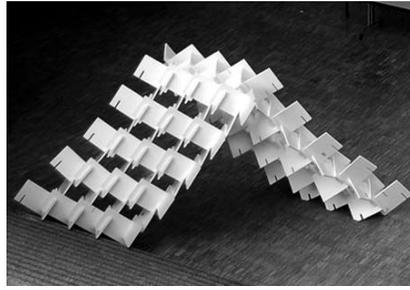
30



31



32



33

Figure 32-33  
Prototype in  
1:1 scale of  
the reciprocal  
structure drawn in  
Figures 26-31.

## REFERENCES

- Baverel O., Nooshin H., Parke G., Kuroiwa Y. (2000), Nexorades: International Journal of Space Structures, 15(2), pp.155-159
- Baverel O., Boulais, L. (2011), Workshop «Nexorades with Composites Materials»: International Journal of Space Structures, 26(4), pp. 363-364
- Blaser W. (1992), Joint and Connection: Trends in Furniture and Their Background, Basel, Birkhäuser
- Logan H. (2008), Recherche de solutions structurelles de nexorades en plaques et ses applications en architecture, Maters thesis, ENS Architecture de Versailles
- Pugnale A., Parigi D., Kirkegaard P.H., Sassone M. (2011), The principle of structural reciprocity: history, properties and design issues: Proceedings of the IABSE-IASS Symposium 2011: "Taller, Longer, Lighter", London, 20-23 September 2011

# TSCB - TWIN SHAPE COMPOSED BEAM

AMBROSINI MARCO<sup>1</sup>, BROGGINI FILIPPO<sup>2</sup>, DIVIANI LUCA<sup>3</sup>, MARTIGNONI UGO<sup>4</sup>

<sup>1</sup>MIKI Advanced Composites, via industriale 11, CH-Riva San Vitale

<sup>2</sup>BlueOffice Architecture, Piazza Governo 3, CH-6500 Bellinzona

<sup>3</sup>CIMSI-SUPSI University of Applied Sciences of Southern Switzerland, Galleria 2, CH-6928 Manno

<sup>4</sup>Airlight Ltd, via Croce 1, CH-6710 Biasca

## ABSTRACT

In the paper is described the project TSCB (Twin Shape Composed Beam) that has aim of study, develop and build a modular pedestrian 18 m wide bridge, characterized by a fast assembly-disassembly system.

The basic idea is to produce a monocoque shell starting from the combination of identical spatial elements with different symmetries (central, Axial, specular and so forth), mimicking the structure of diatoms and radiolars. This leads to the name “Twin Shape Composed Beam”, which clearly illustrates the objective of producing a module by combining small units

Initially, in order to optimize the laminate layout, a full parametric 3D composites finite elements model has been created and a large series of simulation were carried out, varying the number of skins, the type of material and the thickness of the central core.

For the manufacturing phase, various systems aimed producing the foot-bridge modules were taken considered and evaluated: manual lamination, infusion lamination and the use of pre-impregnated materials.

After a first analysis, in order to optimize the ratio between physical-mechanical characteristics and final weight we decided to discard the lamination technique.

In the last phase of the project, the foot-bridge will be put to real service equipped with sensors aimed at mapping the tensional state in function of loads induced by different load conditions, and allowing us to verify the static calculations and check the manufacturing production quality.

## INTRODUCTION

The idea of a foot bridge made of composite material was from the need to create different shape-generating logics and set up new interdisciplinary project spaces aiming at revitalize and stimulate the architectonic and engineering action. The method here presented reverses the normal practice. The place complies with technology and the generative procedures. It becomes an occasion to turn visions into reality. By observing micro-organisms like diatoms, the architect decomposes complex shapes into spatial iterations and complex symmetries laying out simple elements (modules) in space and generating more complex and expressive units. Following the principle which states that in Nature “shape costs nothing, but it is the matter which constitutes it that needs

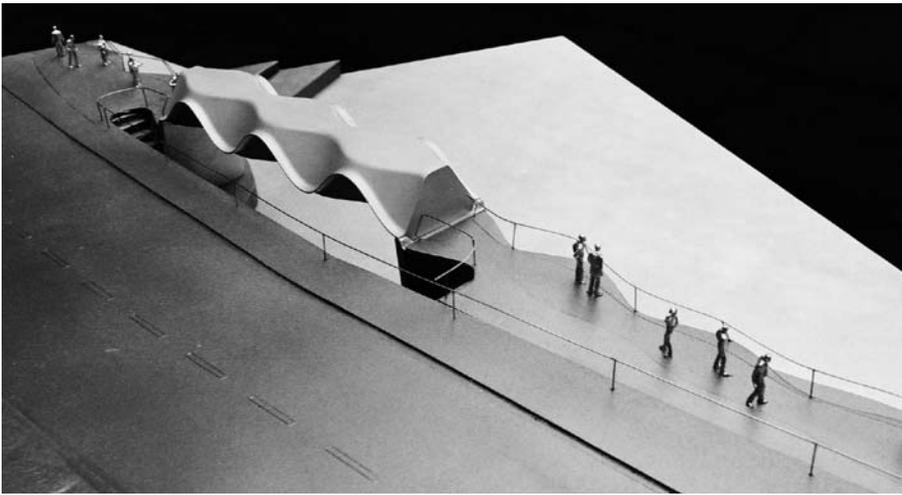


Figure 1  
Model of the  
foot-bridge in  
its architectonic  
context

1

energy to produce it" - we try to produce an element from spatial multiplication of a small unit. When using composite materials, smaller is the unit, lower are the costs involved in the production of the basic mold. Therefore, global production costs can be reduced by reducing the dimension of the unit and optimizing the assembly costs. In this research of shape and static efficiency, a number of shapes were hypothesized. Subsequently, researching by models and creating a system lead both to the spatial definition of the object made up of modules and the static calculation of the structure.

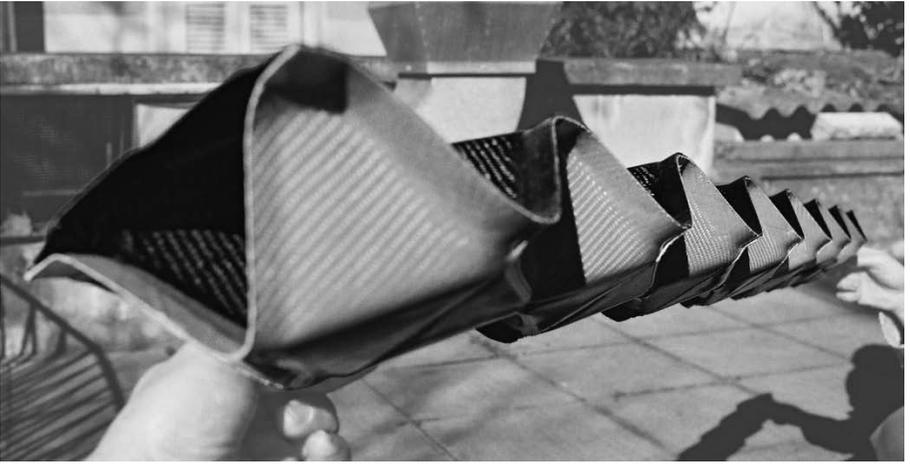
During last twenty years, the utilization of FRP (Fiber Reinforced Polymer) technology provided interesting solutions for the realization of pedestrian bridges for public or industrial use. More than 100 footbridges have been installed worldwide so far. Several authors [1-19] studied the problems connected to the realization and the analysis of this type of structures. In the next paragraph is described the project Twin Shape Composed Beam (TSCB) supported by the CTI (Swiss Confederation's innovation promotion agency).

## DESIGN

The design covers not only the structural aspects (shape intended as expression of forces), but also the research on the optimization of details and the selection of materials. We are convinced that the design experience takes on new cues only in the presence of a diffuse curiosity and a deep motivation to interdisciplinary work. A structural need becomes an aesthetic occasion, a strengthening zone, a receptacle for an illuminating device, a side stabilization lip, a plastic characterization element.

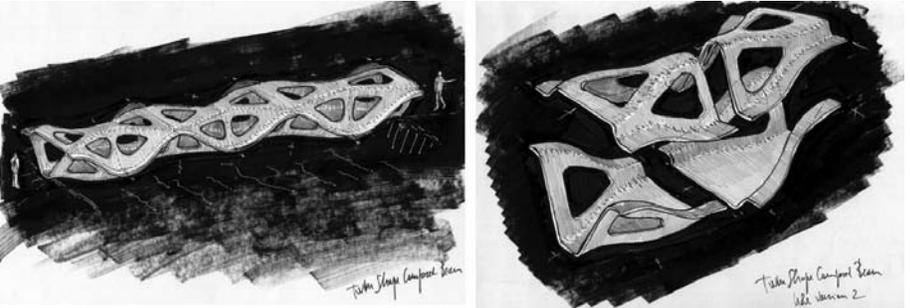
The first shapes of a composite foot-bridge were born from a discussion with Anthony Hunt's group (ing. Allan Bernau, Sheffield office) aimed at making a proposal for a foot-bridge to be installed in Glasgow (UK). Initially the beam was thought just as a load-bearing element onto which some plates made of pultruded products (walking zone), the fixed systems, the parapet and the handrail were fixed. The construction of the first model not only stimulated our plastic research, but also increased our confidence in the solidity of the adopted shape, exhibiting great resistance to flexion, twist and side loading. Besides that, building a small model implies the search for solutions (say intuitive solutions) of details like the connection between bodies and that regarding supports. Formal intuition becomes geometry and transforms into "micro execution", exhibiting merits and defects, relevancy and aesthetics.

Figure 2  
First model of  
beam made up of  
identical elements



2

Figure 3  
First introspective  
sketches of a  
beam to be run  
inside



3

By actually handling the object, we gradually discover it, approaching more and more closely the reality to build. Suddenly, space becomes an architectonic place, going beyond the purely technical aspect. So the idea of crossing the bridge going inside the beam instead of on it gained footing.

By transforming the beam inside into a transit zone and crossing in a real spatial experience, we develop a number of openings which aesthetically lighten the beam, but which also play the role of windows on the surrounding territory. Thanks to new models, realized by means of the technique of stereo-lithography, we can verify the positioning of lips perpendicular to the plane of openings.

These surfaces stiffen the walls producing a “anti-buckling” effect, and at the same time prevent the flow of meteoric waters on the sloping walls to penetrate inside the volume. We have further improved body geometry by setting up a new model which is then produced exactly as in reality, i.e. by means of a mold.

So produced, the object confirms the plastic interest of this shape, which results from the combination of identical elements variously layed out in space. Also the internal aspects is strongly relevant. Space is decomposed in shadow and light zones, yielding a sort of kaleidoscopic geometrization which modifies its own aspect during daytime.

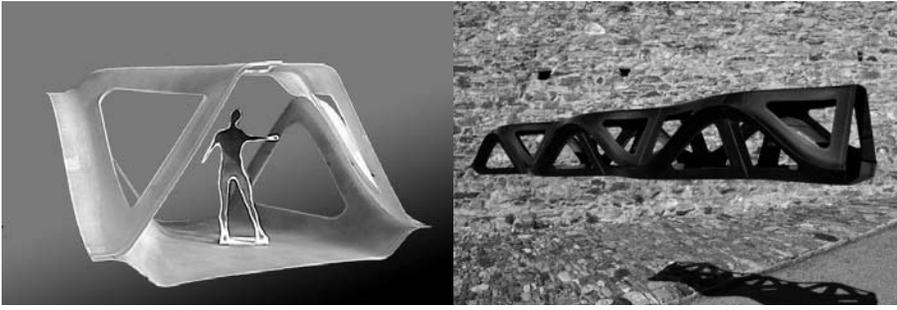


Figure 4  
Stereolithographic model and scaled model of the foot-bridge

4

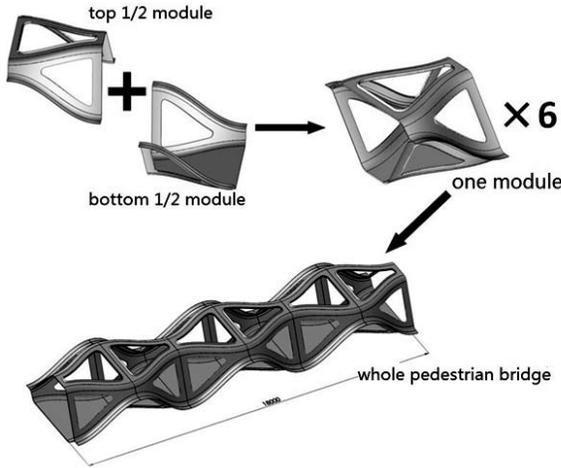


Figure 5  
CAD virtual models of the modular structure

5

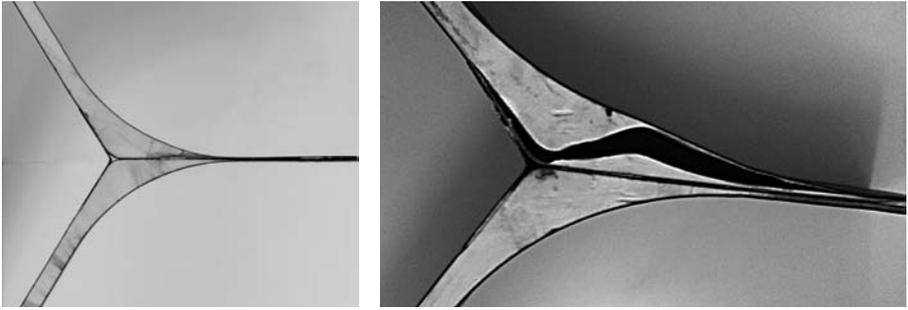
But any model (maquette) offers new design cues. At the safety level, a system of parapets filling in the side walls openings must be provided. Also, in order to further dynamize the interiors, a number of curved profiles, not perfectly following the openings, were designed. The walkable surface will be covered with anti slip coating material of reduced thickness and weight.

## MATERIALS

Materials characterization led to the determination of:

- The physical properties, which allow the verification of resistance to different types of loads on the structure. The test were carried out in the traction (ISO 527-1, 527-4, 527-5), compression (ISO-14126), bending (ISO-14125) and Interlaminar Shear Stress (ISO-14130) modes.
- The durability properties, which allow the verification of resistance to atmospheric agents. The resistance to bending after environmental ageing treatments, to chlorides and to ammonia were tested.
- The adhesion properties, with and without ageing treatment, in order to obtain the characteristics of the glue best suited to composite-composite and to composite-metal combinations.

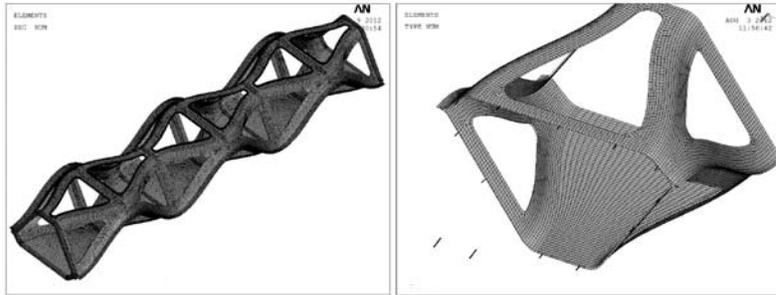
Figure 6  
(a) specimen of a 1:1 scale module critical detail; (b) specimen break after compression test



6a

6b

Figure 7  
FEM model for structural calculations



7

- The calibration parameters for the multi-directional strain gages inserted into the composite, aimed at monitoring deformations and loads of the structure.
- The specimens have been subjected to artificial accelerated ageing by a climatic chamber able to simulate the weathering. The ageing was based on the repeated exposure of the specimens to the main weathering agents, such as rain, temperature, freeze/thaw cycles, humidity and sunlight.

## DIMENSIONING

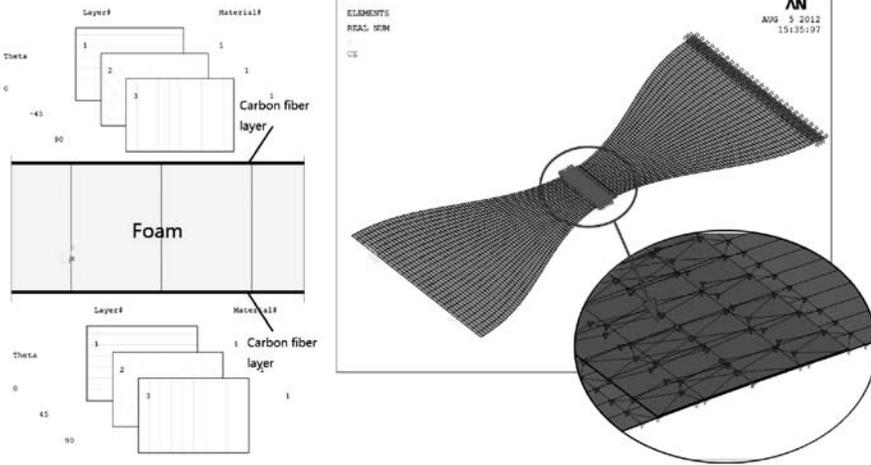
Dimensioning, verification and structural optimization was carried out by means of the Finite Element (FEM) software Ansys 13.0.

The computed foot-bridge dimensions are: length 18.0 m; width 4.2 m and height 2.4 m; Border conditions were defined in such a way to simulate the variable action of a pedestrian  $4.0 \text{ kN/m}^2$  on the whole walkable surface; wind loads of  $1.2 \text{ kN/m}$  and Snow load of  $0.8 \text{ kN/m}$ . Analysis use loads combination, based on SIA (Swiss Society of Engineers and Architects) codes, which try to excite the instability of the critical elements.

The structural verification use a linear analysis to evaluate total deflection and carbon plies stress and a modal analysis to individuate critical modes for single compressed elements and to impose an initial imperfection to the model.

Initially, in order to optimize the laminate layout, several different simulations were carried out, varying the number of skins, the type of material and the thickness of the central core. The results of these calculations led to the selection of a sandwich-like structure: the core is foam, using the solid elements and the two faces are carbon fiber, using Shell elements. In most of bridge, each face has three layers with different preferred directions.

Figure 8  
Layout of  
structure and  
Bonding DOF  
coupling



8

In order to simulate the bonding carbon fiber layer belts link two modules, we create constraint equations connecting the adjacent regions. Linear constraint equations link degree of freedom of bonding carbon fiber belt with the adjacent regions nodes of module models.

12 mm stainless steel bars are used to combine each two modules. The following figure show the junction between two modules.

In order to reinforce the structural stability, we create enhanced frameworks at both ends of TSCB and the edge of top triangle holes.

The effects of aging over material characteristics is considered by dividing the mechanical characteristics and the values for limit stress by a factor, which depends on the kind of analysis in the following manner:

- Short time analysis: 1.93
- Long time analysis: 4.83

According to the static structure analysis, the global deflection for the whole bridge is less than 90mm, so it is satisfied with the norms SIA260 and SIA261. We use Tsai-Wu failure criteria to verify the delamination of materials.

According to the modal analysis, the vertical vibration frequency is 8.6Hz and lateral vibration frequency is 6.2Hz. It is satisfied with the design requirements of 4.5Hz as minimal frequency.

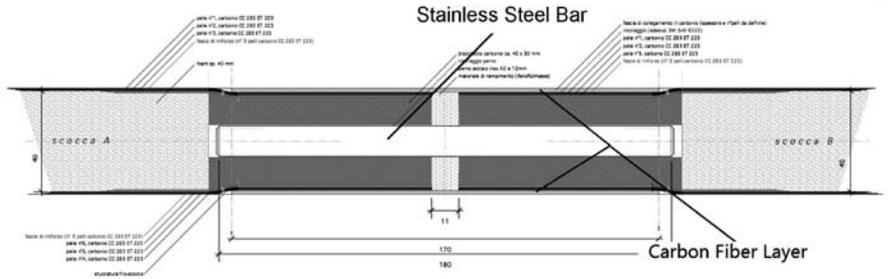
## MANUFACTURING

Various manufacturing systems aimed producing the foot-bridge modules were taken considered and evaluated: infusion, vacuum bagging and pre-impregnated materials techniques were taken into account. After a certain number of test in order to optimize the physical-mechanical characteristics and economic aspects leading to the choice of the vacuum bagging technique.

Vacuum bagging uses atmospheric pressure as a clamp to hold laminate plies together. The laminate is sealed within an airtight envelope. The envelope may be an airtight mold on one side and an airtight bag on the other. As a vacuum pump evacuates air, the pressure differential between the inside and outside of the envelope determines the amount of clamping force on the laminate.

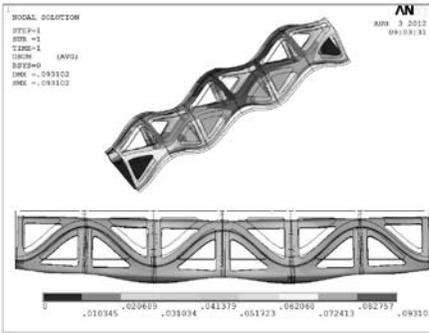
Flow and reticulation of thermosetting resins during the infusion process was simulated by means of FEM programs.

Figure 9  
Section of  
modules junction

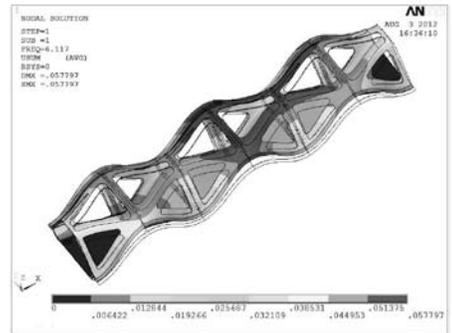


9

Figure 10  
(a) deformed  
shape under  
pedestrian load;  
(b) First mode  
deformed shape  
at 6.2 Hz



10a



10b

Figure 11  
(a) Milling of the  
reverse model of  
the mold; (b) Final  
model



11a



11b

The first step for the mold construction is to create a perfectly designed reverse mold of the final piece. To do that, a 1:1 scale model has been realized in polyurethane material. After a painting and polishing phase, this model described above has been used to obtain the reverse mold in glass fiber material reinforced with a steel reticular structure. After mold set up, all the semi-modules are laminated, post-cured, and finished. In following figures are presented some of these stages.



**Figure 12**  
 (a) Construction of the Glass fiber Mold; (b) Final mold of TSCB semi-model

12a

12b



**Figure 13**  
 Vacuum bagging lamination technique

13



**Figure 14**  
 (a) semi-module after lamination; (b) assembling of the final module

14a

14b

## TESTING

The foot-bridge will be put to real service equipped with sensors aimed at mapping the tensional state in function of loads induced by different load conditions, and allowing us to verify the static calculations and check the manufacturing production quality. This will be accomplished using electrical and optical fiber strain gages and will allow, at the same time, to evaluate the peculiar features of these different devices by comparing the results they deliver.

Electrical strain gages are usually “drowned” into the structure directly during the manufacturing process of fibre composite materials. This makes it possible to carry out measurements at points of the object that will be no more accessible after manufacturing.

The most evident characteristic of drowned strain gages consists of two connectors projecting out vertically to allow the electrical connection of the device, which is made after the manufacturing of the structure and externally to it.

This type of strain gages is ideal to uncover the onset of both cracks in the resin and delamination in the composite fibers.

For optical fiber strain gages, an optical fiber strain gages are made up of optical fibers having approximately a 4 - 9 •m core.

A light with special wavelength is transmitted into the optical fiber by a laser.

At the measurement point, inside the fiber, there is a filter which reflects some specific wavelengths. The light which does not get reflected, leaves the fiber on the opposite end. When the measured part becomes loaded, the deformation goes transferred from the sensor to the optical fiber, provoking a change in the wavelength of the light reflected by internal filaments. From these variations, the deformations can be studied and assessed.

## CONCLUSIONS

In the history of technologies and materials, the first reaction of man is to apply the typical shapes of old, known materials to the usage of new ones. So was the case for the first concrete walls, which mimicked the ashlar of stone walls, for the cast iron columns and capitals, which resembled the classical shapes, as well as in pultruded products, which initially imitated the typical sections of steel beams (with H, I, L, square sections).

Now the times are mature to face composite materials through the logics pertaining to the material itself. Metaphorically, It can be said that we are “ready to listen the material's soul” and to express its characteristics at best through shapes which react well to usage conditions. It has to be left to future designers in next years (but something is already happening now) to interpret this challenge, which will have to aim at creating not only new structural and formal approaches, but also at conceiving spaces resulting from the meeting of matter, forces and fantasy.

## REFERENCES

- Giannopoulos G., Vantomme J., Wastiels J., Taerwe L. (2003), Numerical analysis and experimental validation for static loads of a composite bridge structure, in *Composite Structures*, 62(2), pp. 235-243(9)
- Karbhari V.M., Seible F., Burgueño R., Davol A., Wernli M., Zhao L. (2000), Structural Characterization of Fiber-Reinforced Composite Short- and Medium-Span Bridge Systems, in *Applied Composite Materials*, 7(2-3), pp. 151-182(32).
- Burgueno R., Karbhari V.M., Seible F., Kolozs R.T. (2001), Experimental dynamic characterization of an FRP composite bridge superstructure assembly, in *Composite Structures*, 54(4), pp. 427-444(18).
- Davey S.W., Van Erp G.M., Marsh R. (2001), Fibre composite bridge decks - an alternative approach, in *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing (Incorporating Composites and Composites Manufacturing)*, 32(9), pp. 1339-1343(5).
- Zetterberg T., Backlund J., Burman M. (2001), On design of joints between composite profiles for bridge deck applications, in *Composite Structures*, 51(1), pp. 83-91(9).
- Aref A.J., Alampalli S. (2001), Vibration characteristics of a fiber-reinforced polymer bridge superstructure, in *Composite Structures*, 52(3), pp. 467-474(8).
- Aref A.J., Parsons I.D. (2000), Design and performance of a modular fiber reinforced plastic bridge, in *Composites Part B: Engineering*, 31(6), pp. 619-628 (10).
- De Roover C.; Vantomme J., Wastiels J., Croes K., Taerwe L., Blontröck H. (2003), Modular pedestrian bridge with concrete deck and IPC truss girder, in *Engineering Structures*, 25(4), pp. 449-459(11).
- De Roover C., Vantomme J., Wastiels J., Croes K., Cuyper H., Taerwe L., Blontröck H. (2002), Modelling of an IPC-concrete modular pedestrian bridge, in *Computers and Structures*, 80(27), pp. 2133-2144(12).



**EXPÉRIMENTATIONS  
PROTOTYPES**

**-**

**EXPERIMENTS  
PROTOTYPES**

**2**



# MORPHOLOGICAL AND STRUCTURAL INVESTIGATION OF INTERCONNECTED GRID SHELLS

BAVEREL OLIVIER<sup>1,2</sup>, JENSEN TIM-JOACHIM<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Université Paris-Est, Laboratoire Navier,  
ENPC-IFSTTAR-CNRS, UMR 8205 - France

<sup>2</sup>ENSAG - France

<sup>3</sup>ENSAV - France

## ABSTRACT

This paper describes the structural reinforcement of grid shells by interconnecting several Grid Shells together. The investigation takes as a reference the composite (GFRP) Grid Shell structure built for the Forum of the Solidays music festival in Paris in 2011 where the research laboratory Navier developed components for Grasshopper to automatically mesh free-forms structure on Rhino. In this investigation the structural behaviour a configuration is studied and compared. One of them leads to the construction of a double Grid Shell prototype to show the feasibility of the concept. The architectural and morphological potential is also showed through an example. Finally, the authors conclude on the technical feasibility of such morphologies that could give interesting and unexpected architectures.

Keywords: Grid Shell, experimental construction, formfinding, composite materials

## INTRODUCTION

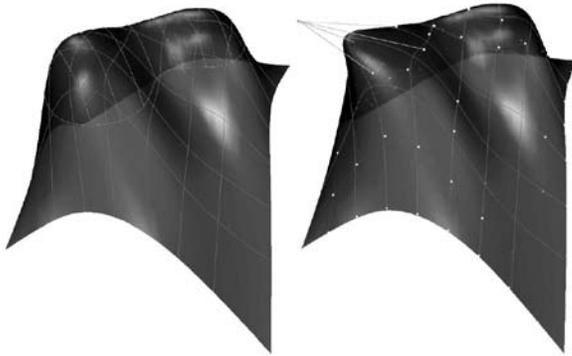
The Navier laboratory has participated to the design and construction of the first composite (GFRP) Grid Shell Building for a public event (Solidays music Festival in June 2011). It was made possible with a team that has worked on (GFRP) Grid Shell knowledge for about ten years [1-3]. The name of Grid Shell commonly describes a grid structure having the shape and the rigidity of a double curvature shell. The form is obtained by elastic deformation of a two-way grid initially flat. The deformed grid is then rigidified using a third direction of bars.

In this paper, an investigation of several Grid Shells that intersect each other is developed. The Grid Shell built for the Solidays festival is taken as a reference. The interconnected Grid Shell has a similar span to the reference. In the next section the tools used to adjust the form, to take into account the mechanical constraints and the method to mesh the form are presented. In the third section, different cases of interconnected Grid Shells are proposed and their mechanical behaviour is compared to the configuration of the Solidays



**Figure 1**  
Building of the  
Grid Shell for the  
Solidays music  
festival. Research  
laboratory  
Navier and  
ENPC/Sponsor:  
Solidarité Sida,  
T/E/S/S, Viry

1



**Figure 2**  
Aerial view of the patch stiffness (A) and  
the control point transformation (B)  
(A): Patch options: Stiffness,  $k=5$ , Surface  
U Spans=10, Surface V Spans=10; the red  
line are the support curves for the patch/(C):  
Control point manipulation; the red square  
with the red lines represent the displacement  
of the control point connected to the  
neighboring control points

1

structure. In the fourth section, the concept of two interconnected Grid Shells was tested with the construction of a prototype during a workshop organized with the master students of ENSAV at the Grands Ateliers of Isles d'Abeau. In the fifth section, the morphological potential is illustrated. In the last section the authors conclude on the feasibility of such configurations.

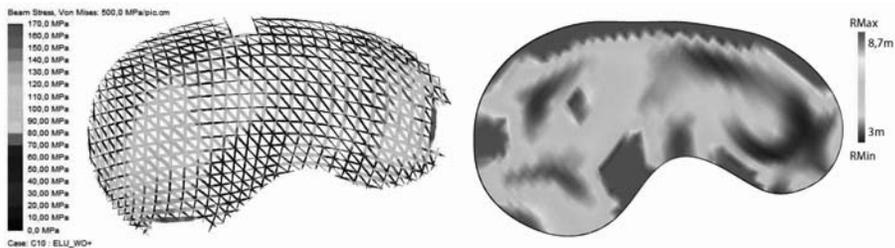
## EXPERIMENTAL FEEDBACK ON THE SOLIDAYS BUILDING

As a guideline, the designer has to concentrate his efforts on three important points:

- That the curvature in each bar is not too high;
- That the entire surface is meshed;
- That the mesh does not get too concentrated locally.

### Global and local transformation of the surface

Figure 2 presents the important drawing steps with the possible transformation of the freeform we want to mesh on Rhino. The drawing of the contour polylines (see figure 2, A) defines the perimeter in plan and the contour polylines in elevation of the surface we want to patch [4]. The less stiffness we enter the smoother the surface becomes. This surface can be changed locally by the displacement of the surface control points (see figure 2, B).



**Figure 3** Top view comparison between the prestressing diagram including the insignificant weights of the structure and equipments (A) and the top view analysis graph of minimum radius (B) (A): Minimum Stress =0 MPa; Maximum Stress=170 MPa/(B): Minimum Radius= 3 m; Maximum Radius=8,7 m

If the sample point spacing of the patch surface is too high, the manipulation of the control points gets too precise and inappropriate for the definition of a smooth surface. The resulting form is a half-peanut with a curvature inversion between the two domes.

### Geometrical Constraints due to the Structural Behaviour

The main stress in the Grid Shell is due to the flexion in the beams. The geometry of the surface to mesh imposes the stress distribution of the Grid Shell. The stress is inversely proportional to the curvature and is given by the expression:

$$\sigma = \sigma_{comp} + \sigma_{flex} \approx \sigma_{flex} = \frac{E \times v}{R}$$

$\sigma$ =stress (Mpa)/ $E$ =Young modulus (Mpa)/ $v$ =distance to the axis of the beam (m)/ $R$ =radius (m)

The constraint on the minimum curvature radius is therefore given by:

$$R_{min} < R_{curvature} < R_{max} \Rightarrow E \cdot \frac{v}{R_{max}} < \sigma < E \cdot \frac{v}{R_{min}} \Rightarrow R_{min} > \frac{E \cdot v}{\sigma_{max}}$$

For the Solidays project the minimum radius was set at 3,28m and tolerated locally at 3m. In the global analysis, the local stress (in red) on the doors of the Grid Shell has not to be taken in account (see figure 3, A). The yellow and orange beams are submitted to a 100 to 140Mpa stress. Located on the curvature diagram it corresponds to the blue regions where the radius is the lowest (see figure 3, B).

The comparison with the minimum radius analysis graph is relevant because there is a correlation between the numerical analysis and the graphical analysis, which shows that where the curvature is the strongest is also the localisation of where the stress in the beams is the most important. This observation is a starting point for the design of the surface but does not evaluate the mechanical behavior of the structure under self-weight or external forces.

### Meshing of the Surface

The "compass method" used to generate the grid consists in constructing a network of parallelograms on a given surface. This method was described in IL10 Gitterschalen of Frei Otto. Figure 4 shows different steps of the method on a plane surface. The task is to construct a grid from a surface with only a compass, two arbitrary curved axes that intersect are laid down. Then, a mesh width is selected and serves as the compass radius. The spacing of the grid is marked along each axis, starting from the point of intersection of

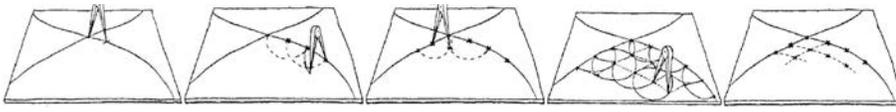


Figure 4  
Construction of the directors and the Grid using the "compass method"

4

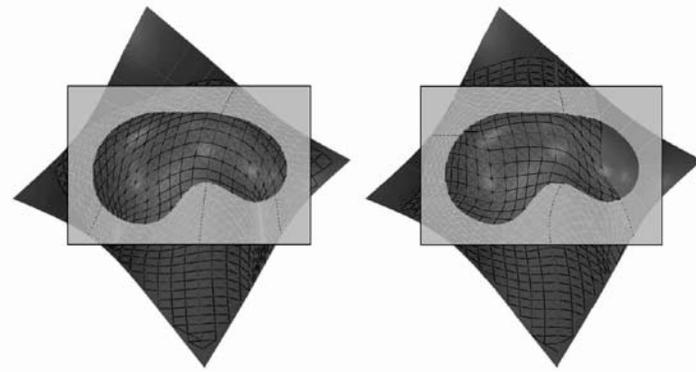


Figure 5  
Top view of the complete (A) and incomplete (B) meshing of the patch surface  
In dark grey the patch surface/  
In light grey the cutting surface for the meshing/  
In red the director polylines for the "compass method" meshing/  
In black the main lines of the meshing/  
In light grey the lines for the third/fourth direction of the meshing

5

the axes. The nodes are determined by the intersection of two circles drawn around each of the neighboring points. Then, gradually, new points are determined in the same way. Finally the nodes are connected rectilinearly. For non plane surfaces, the principle of the construction of the grid is exactly the same than previously explained. This method yields a grid that fits to the 3D shape and has been implemented numerically in Grasshopper for Rhino to mesh free forms.

The position and the geometry of the director lines on the patch surface (see figure 5) as well as the chosen step define a specific grid. The direction of these polylines should follow the geometry of the form. A bad choice of this director polylines creates a non-harmonious grid or an incomplete grid (see figure 5, B) where the meshing is concentrated locally. The mesh optimization is done manually.

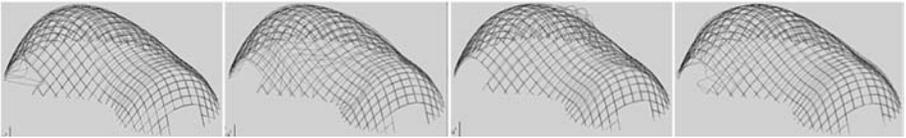
### Buckling Analysis of the Building

The stress analysis in the beams due to the curvature and the loading is not enough to conclude on the overall stability of the structure. A buckling analysis has to be performed. In this study a linear buckling analysis is performed, the shape of the buckling mode was used as a design strategy to decide where the Grid Shell should be reinforced.

The buckling modes show the overall shape of the buckling of the structure, the place where large displacement will occur can be identified. These zones of large displacement will be the zones where the Grid Shell will cross each other.

The four first buckling modes are shown in figure 7 where the light blue show the buckling mode and the dark blue show the initial configuration. It can be notice that the first buckling mode is more a local buckling due to the openings. The opening where reinforced and therefore this buckling mode should not occur.

Figure 6  
Four first buckling  
mode of the  
Soliday's festival  
Grid Shell



6

7

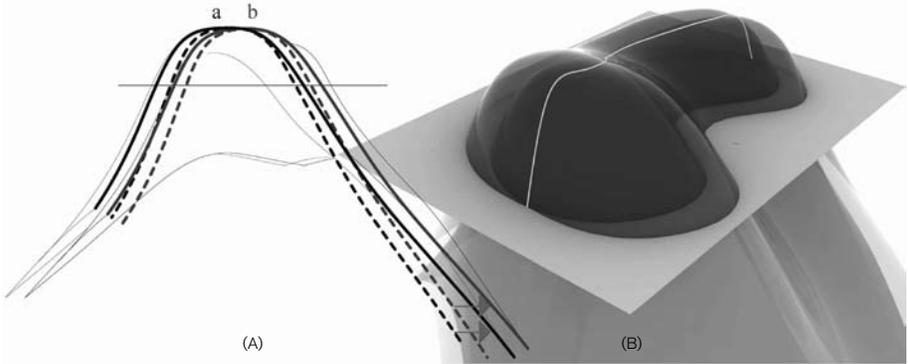


Figure 7 Cut front view (A) and Aerial view (B) of the intersection of two identical surfaces

A): (a): black dashed line for the Solidays patch surface/(b): grey dashed line for the Solidays clone surface (identical)/(a): black continuous line for the 1D scale of the Solidays patch surfaces/(b): black continuous line for the 1D scale of the Solidays clone patch surface/(B): The yellow line is the intersection line of the two surfaces.

## EXPERIMENTAL FEEDBACK ON THE SOLIDAYS BUILDING

In this section, the conception of Grid Shells based on the addition and intersection of surfaces is presented. These intersection and addition are made using the operations presented in figure 2 and 5. The mesh of these intersecting surfaces are connected together in order to improve the structural efficiency.

To compare the structural efficiency of this interconnection Grid Shells to the Solidays builded structure we focus on two criteria:

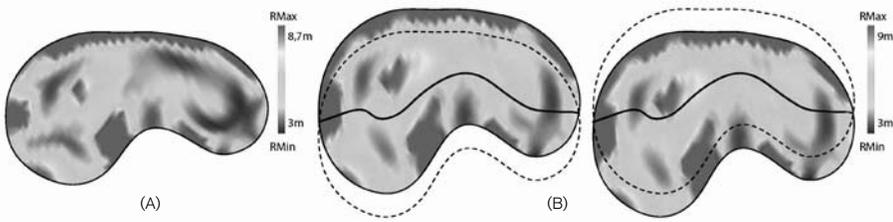
- the covered space in plan resulting of this intersections corresponds to the Solidays perimeter with an equal area (approximately 300 square meters);
- the intersection of the surfaces is located on the regions we want to reinforce from the result of section 2.4.

Only one configuration was analyzed structurally. The structural analysis has shown that the maximum displacement of configuration 3.3 was 77 times lower than in the Soliday's initial configuration. This large improvement of the stiffness of the structure should give a much higher buckling load.

### Interconnection of two identical Grid Shells

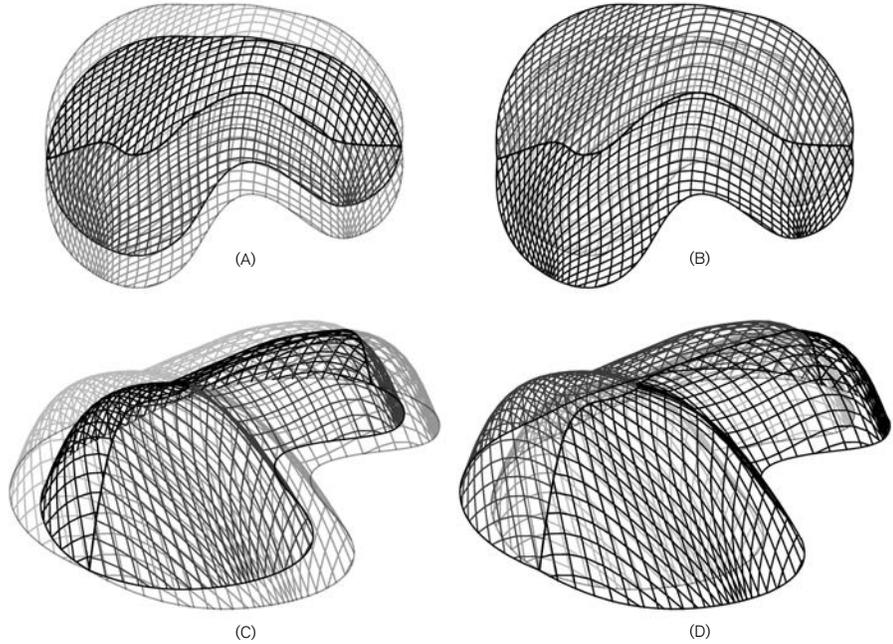
The Solidays patch surface (see figure 7, A, a) and the director lines for the meshing presented in figure 2, A are duplicated and translated horizontally in one direction (see figure 7, A, b). Then the two patch surfaces and their director lines are scaled in one direction to enlarge the covered space in plan to cover the area and the geometry of the Solidays building perimeter on the ground.

The distance between the surfaces is limited to two meters and the region of crossing is located on the highest part of each surface where the curvature is the most important (see figure 8).



**Figure 8**  
Top view comparison between the minimum radius analysis graph of the Solidays surface (A) and the identical intersecting surfaces (B)

8



9

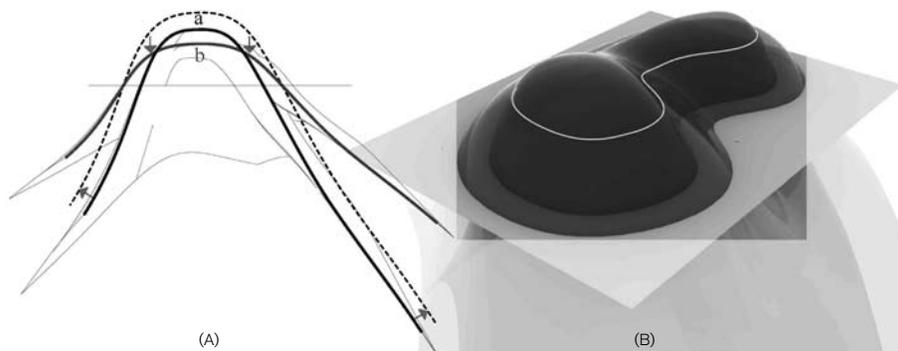
**Figure 9** Meshing of the intersecting surfaces  
(A): Inside meshing plan/(B): Outside meshing plan/(C): Inside meshing parallel perspective/(D): Outside meshing parallel perspective/  
(a): black lines for the Solidays Grid Shell/(b): grey lines for the Solidays clone Grid Shell/To allow the reader to see the interweaving grids more clearly, the third and/or fourth direction line of the meshing is not represented.

The 1D scale of the Solidays surface reduces the low curvature regions located on the border areas of the surface as well as the global minimum curvature of the surface. The maximum curvature radius increases at the same time. The minimum radius value did not change because the surface is modified in one direction. Figure 9 shows different views of the interconnected Grid Shell. The intersection line connects the regions to reinforce presented in the section 2.4.

### Interconnection of the Solidays Grid Shell with another Grid Shell

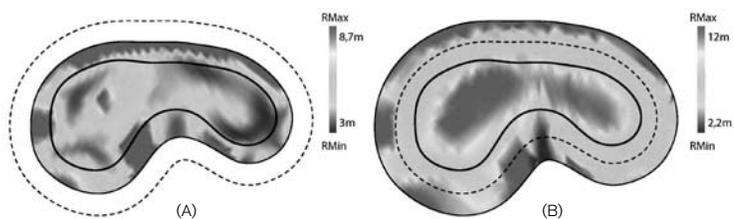
The Solidays surface (see figure 10, A, a) is intersected with a larger surface with a lower altimetry (see figure 10, A, b). The Solidays patch surface (a) and the director lines for the meshing presented in figure 2, A are offset. The distance between the surfaces is limited to two meters. Then the offset patch surface with the director lines is scaled in one direction vertically to intersect the Solidays surface. The region of crossing is located on the highest part (see figure 10, B) of each surface where the curvature is the most important (see figure 11).

10



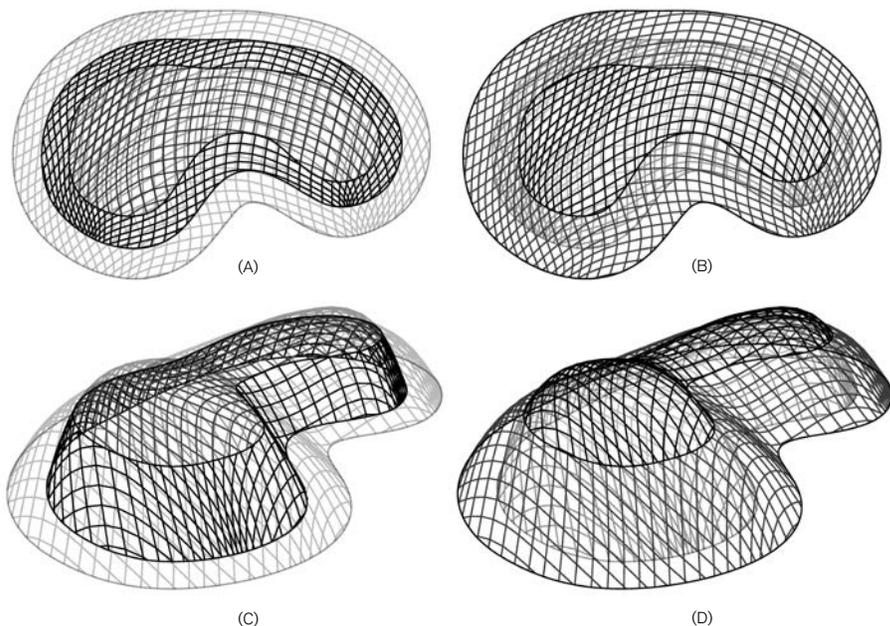
**Figure 10** Cut front view (A) and Aerial view (B) of the intersection of the Solidays surface with another one (A): (a): black continuous line for the Solidays patch surface/(a): black dashed line for the offset of the Solidays surface/grey continuous line (b): 1D scale for the Solidays patch surfaces/(B) The yellow line is the intersection line of the two surfaces

11

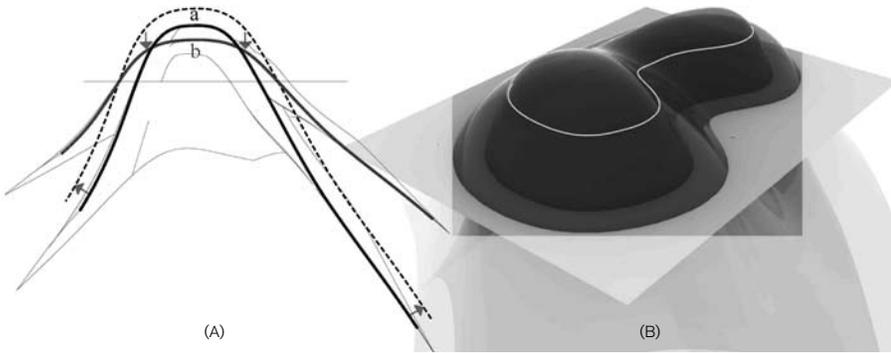


**Figure 11** Minimum radius analysis graph of the Solidays surface (A) intersecting another surface (A): Minimum Radius=3m; Maximum Radius=8,7 m/(B): Minimum Radius=2,2m; Maximum Radius=12m/The black line is the intersection line between the two surfaces.

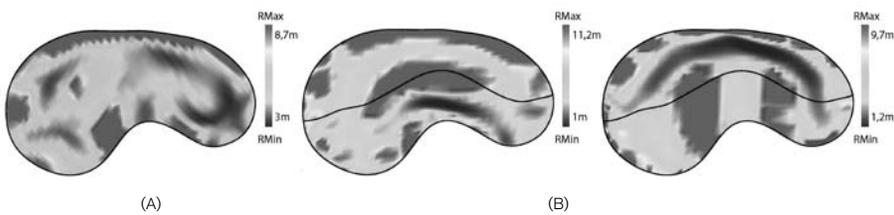
12



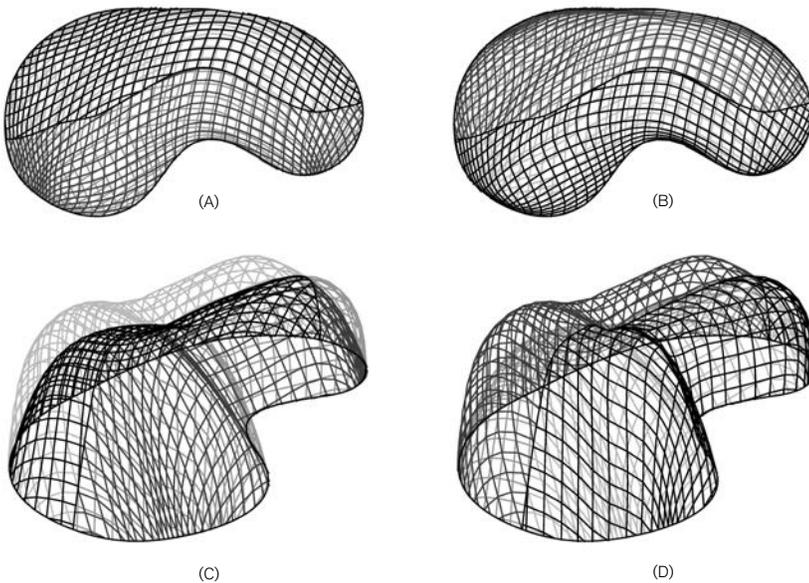
**Figure 12** Meshing of the intersecting surfaces (A): Inside meshing plan/(B): Outside meshing plan/(C): Inside meshing parallel perspective/(D): Outside meshing parallel perspective/ (a): black lines for the Solidays Grid Shell/(b): grey lines for the scaled Solidays Grid Shell/ To allow the reader to see the interweaving grids more clearly, the third and/or fourth direction line of the meshing is not represented.



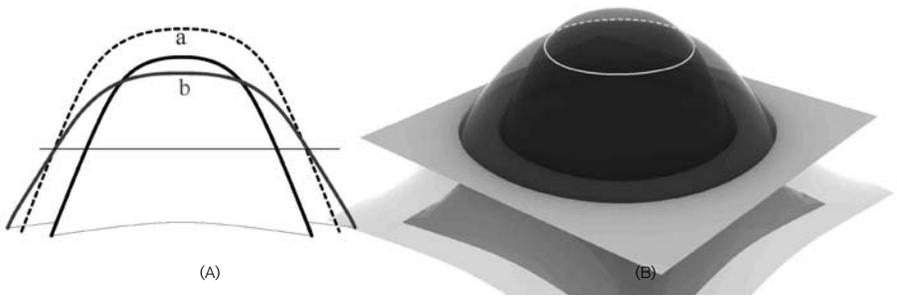
**Figure 13** Cut front view (A) and Aerial view (B) of the intersection of two surfaces on the same perimeter  
 (A): (a): black continuous line for the first patch surface/(b): grey continuous line of the second patch surface/(c): black dashed line for the Solidays patch surface/(d): black dashed line of the offset Solidays patch surface/(B) The yellow line is the intersection line of the two surfaces



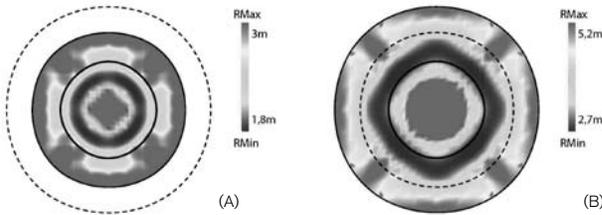
**Figure 14** Top view comparison between the minimum radius analysis graph of the Solidays surface (A) and the two intersecting surfaces (B). (A): Minimum Radius=3m; Maximum Radius=8,7 m/(B): Minimum Radius=0,9m; Maximum Radius= 11,2m/(C): Minimum Radius=1,2m; Maximum Radius=9,7 m /The black line is the intersection line between the two surfaces.



**Figure 15** Meshing of the intersecting surfaces  
 (A): Inside meshing plan/(B): Outside meshing plan/(C): Inside meshing parallel perspective/(D): Outside meshing parallel perspective/  
 (a): black lines for the Grid Shell of the patch surface a (see figure 13, A, a)/(b): grey lines for the Grid Shell of the patch surface b (see figure 13, A, b)/To allow the reader to see the interweaving grids more clearly, the third and/or fourth direction line of the meshing is not represented.



**Figure 16** Cut front view (A) and Aerial view (B) of the intersection of two surfaces a and b  
 (A): (a): black continuous line for the interior patch surface/ (a): black dashed line for the offset interior patch surface/(b): grey continuous line for the exterior patch surface/(B) The yellow line is the intersection line of the two surfaces



**Figure 17** Top view minimum radius analysis graph of the intersecting surfaces (A) and (B)  
 (A): Minimum Radius=1,8m; Maximum Radius=3m/(B): Minimum Radius=2,7m; Maximum Radius=5,2m/The black line is the intersection line between the two surfaces

The 3D scale of the Solidays surface (see figure 11, B) reduces the global minimum curvature of the surface excepted on the inverted region between the two domes. In this region the minimum radius value increases. The maximum curvature radius increases at the same time on all other regions. The intersection line connects the high curvature regions of the Solidays surface (see figure 11, A). Figure 12 shows different views of the interconnected Grid Shell. The intersection line connects the regions to reinforce presented in the section 2.4.

### Interconnection of two Grid Shells on the Same Perimeter

In this case the patch surfaces are resulting from the transformation of the Solidays support curves for the patch (see figure 2, A). The perimeter of the two surfaces is the Solidays surface perimeter. The support curves for each patch surfaces (see figure 13, A, a and b) are drawn between the Solidays curves supporting the patch (c) and the Solidays offset curves (d). The distance between the two curves is limited to two meters. The high curvature on the support curves has the consequence that the minimum radius is very small (see figure 14, B).

Figure 15 shows different views of the interconnected Grid Shell. The intersection line connects the regions to reinforce presented in the section 2.4.

## PROTOTYPE

In this section, we present the prototype as an illustration of the structural principle exposed in section 3.2 that presented the interconnection of the Solidays Grid Shell with another Grid Shell. The prototype construction of a double interconnected Grid Shell is based on the intersection of two simple surfaces.

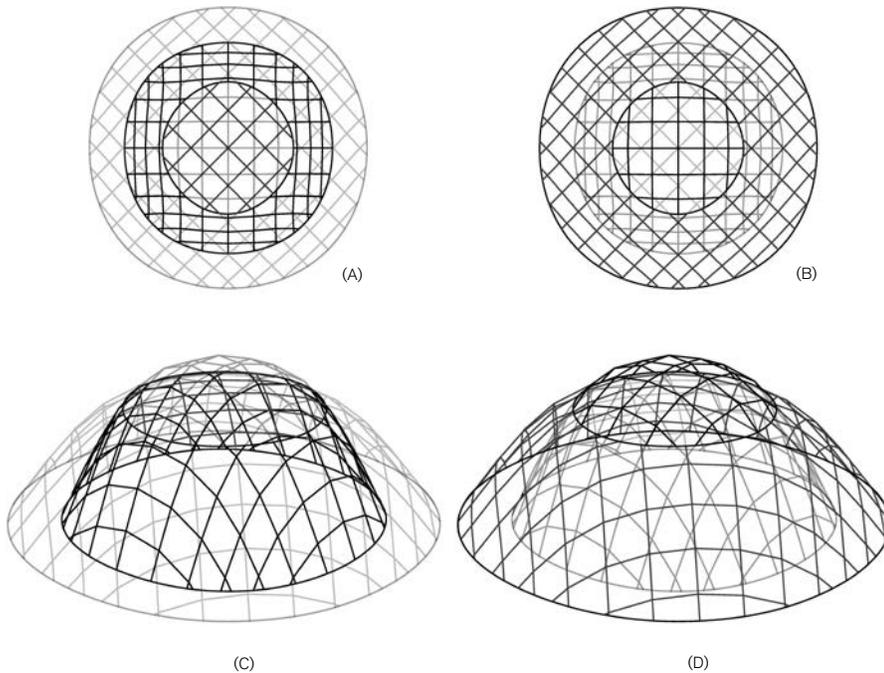


Figure 18 Meshing of the intersecting surfaces

(A): Inside meshing plan/(B): Outside meshing plan/(C): Inside meshing parallel perspective/(D): Outside meshing parallel perspective/  
 (a): black lines for the interior Grid Shell/(b): grey lines for the exterior Grid Shell/To allow the reader to see the interweaving grids more clearly, the third and/or fourth direction line of the meshing is not represented.

### Interconnection of two Grid Shells

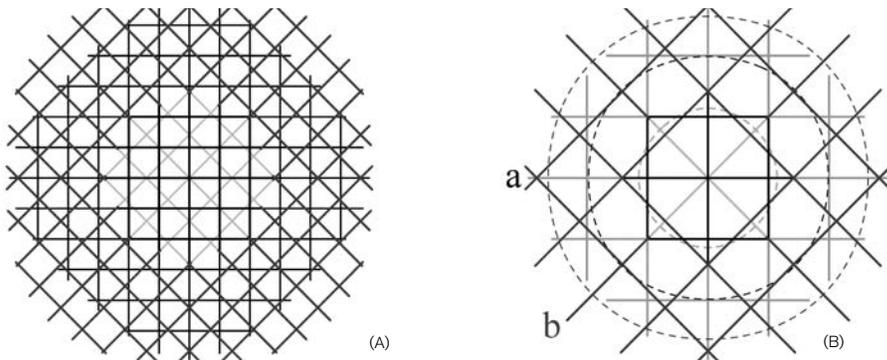
The surfaces a and b are a patch of two half ellipsoids (see figure 16). The interior patch surface (see figure 16, A, a) is intersected with a larger and lower altimetry patch surface (see figure 16, A, b). On the ground, the distance for the offset is limited at one meter. The intersection line of the two surfaces is located on areas where the curvature is the highest (see figure 17).

Both Grids are meshed with the “compass method” with perpendicular director polylines crossing and lying on top of the patch surfaces. To facilitate the interweaving of the two grids, the director polylines for the meshing of the patch surface a (see figure 16, A) are fixed with an angle of  $45^\circ$  to the grid director polylines for the meshing of the patch surface b.

### Construction of the double Grid

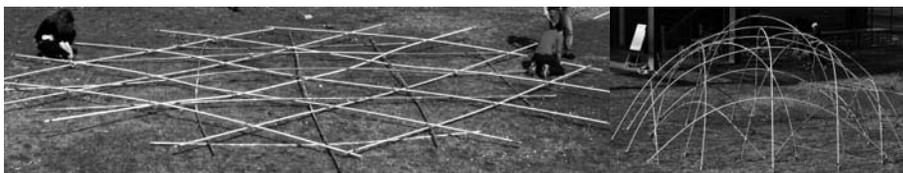
The challenge was to build the two Grids on the ground. To facilitate the erection of the two interweaving Grids (see figure 19, B) the mesh width is wider than in the model shown in figure 18. The connection between the glass fiber beams is made with standard scaffolding elements. Before covering the structure we connected the blue beams of the interior Grid Shell with the exterior white beams of the larger Grid Shell. The experimental test of the connection between both Grid Shells with a local load on the top of 60kg showed that the structure is more rigid than without connection. The last step - that has not been done for this prototype - is to fix the two meshed forms with a third direction of beams or with stiffening cables in both directions to block the network of parallelograms.

19



**Figure 19** Plan of both Grids on ground before bending  
 (A): The mesh width is set at 0,8 meters/(B): Simplified grid of (A) with a mesh width of 1,6 meters/(a): interior Grid/(b): exterior Grid/  
 dashed lines for the perimeter of both Grid Shells

20



**Figure 20** View of the interweaving grid on the ground and view of the two interconnected Grid Shells

21



**Figure 21** Interior view and exterior view by night of the prototype

### Roofing of the structure

The distance between the roofing - fixed on the exterior beams - and the inner space - limited by the interior beams - emphasize the lightness of the structure. The possibility of placing the roofing wherever we want on the two grids offers a new field in the conception of Grid Shells.

### FUTURE WORKS

The future work will concentrate on the morphology of interconnected Grid Shells. To illustrate an example is presented in figure 22. The two patch surfaces are the same than the one presented in the case study 3.1 with the interconnection of two identical Grid Shells. The criteria of covering the same area than the Solidays one is set aside. The parameter that changed is the translation of both surfaces in two directions of the plan.

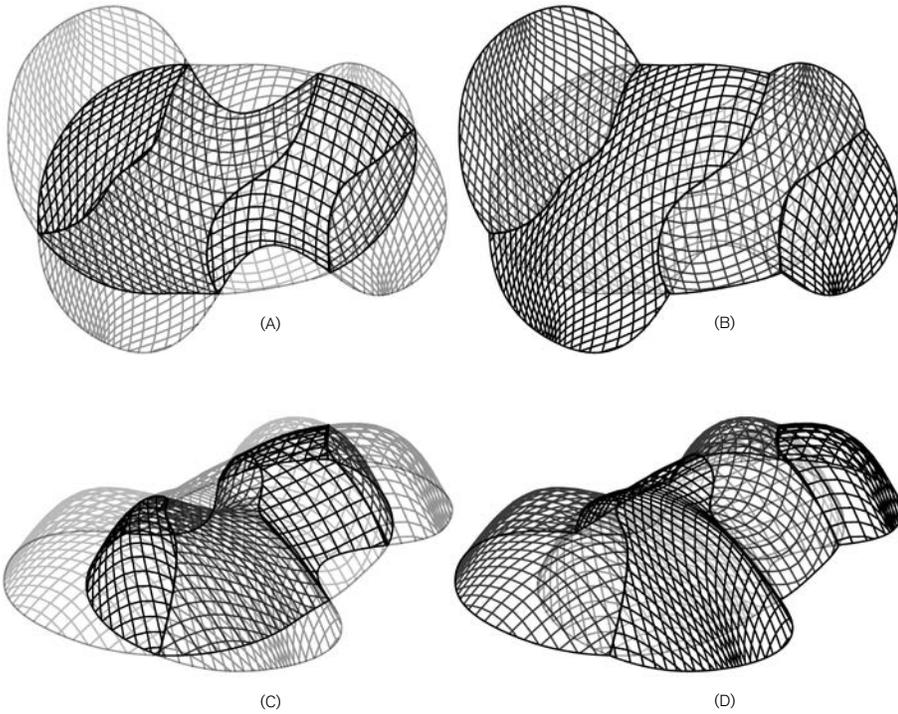


Figure 22 Meshing of the intersecting surfaces

A): Inside meshing plan/(B): Outside meshing plan/(C): Inside meshing parallel perspective/(D): Outside meshing parallel perspective/  
 (a): black lines for the Solidays Grid Shell/(b): grey lines for the Solidays clone Grid Shell/To allow the reader to see the interweaving grids more clearly, the third and/or fourth direction line of the meshing is not represented.

The intersection of both surfaces creates three intersection lines that are approximately located in the regions we want to reinforce. This example shows that the translation parameter of two identical surfaces generates complex morphological structures with a specific space splitting.

## CONCLUSION

In this paper, an investigation of interconnection of Grid Shells was presented. After showing the method to control the form and the mesh, different configurations of interconnections of Grid Shells were proposed. The structural behaviour of one configuration was compared with the initial structure without interconnections. It gave a structure 77 times stiffer than the initial configuration. The other configurations have to be tested to confirm this first result. An experimental interconnected Grid Shell was successfully constructed. This construction showed that the erection process is more complex than a normal Grid Shell. The last section shows a promising configuration that reveals the potential in the development of a new generation of Grid Shells. To conclude, the first results on the structural behavior and on the constructability of interconnected grid shells are promising.

## ACKNOWLEDGMENTS

We would like to thank Jean-François Caron and Frederic Tayeb from the Navier laboratory. For the construction of the prototype we would like to thank Gilles Ebersolt and his master class students Johanna Schmidt, Florentia Christokorov, Mehdi Grosjean, Amine Khodri, Tra Lehuong, Florentin Duroy, Maureen Gerbe, Emilie Anglada, Habib Bencherif, Amir Hossein Shirvani, Maxime Ravaux, Martin Delarue, Quentin Leteurtre and Pauline Mourani (ENSAV). For the prototype construction we also would like to thank the technical team of “Les Grands Ateliers” and the students of ENPC Juliette Adam and Camille Glacet.

## REFERENCES

- Knight T.W. (1994), Shape grammars and color grammars in design, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 21(6), pp. 705-735
- Douthe C., Baverel O., and Caron J-F. (2007), Gridshell in composite materials: toward wide span shelters, *Journal of the International Association for Shell and Spatial structures*, 48(155):p. 175-180
- Douthe C., Baverel O., and Caron J-F. (2006), Form-finding of a grid shell in composite materials, *Journal of the International Association for Shell and Spatial structures*, 40: p. 53-62
- Douthe C. (2007), Study of slender prestressed structures in composite materials: application to the conception of gridshells, PhD thesis, ENPC (French), p. 274
- Rhinoceros, Nurbs modelling for Windows, <http://www.rhino3d.com/5/help/commands.html>
- Frei O. (1974), IL10 Gitterschalen, Institut für leichte Flächentragwerke (IL)



# UNE MÉTHODE DE MODÉLISATION CROISÉE POUR CONCEVOIR DES STRUCTURES EN BOIS : LES « DÉFIS DU BOIS »

**BESANÇON FRANCK, BIGNON JEAN-CLAUDE, DUCHANOIS GILLES**

Modèles et simulation pour l'architecture, l'urbanisme et le paysage (MAP-Crai) UMR CNRS-MCC 3495  
École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy (ENSAN) - France

## **ABSTRACT**

This paper discusses the different models used in design situation. It relies on a learning experience conducted for eight years: «Wood Challenges.» This workshop meets for a week, fifty students in architecture and wood-engineering. A design methodology based on the use of models allows us to imagine and simulate the construction of a wooden inventive structure. In describing the various models and the attributes attached to them, we show that the use of these models allows cross-fertilize the transition from an idea to its concrete materialization.

Keywords: design process, models, architecture and wood engineering, learning experience

## **CONTEXTE**

Le système productif actuel dissocie de plus en plus fortement les compétences et engendre des discontinuités entre les acteurs que l'on tente de compenser par des méthodes et outils dits collaboratifs. Si la spécialisation des connaissances et des compétences est inhérente à l'évolution des pratiques humaines et à l'enrichissement des savoirs et des savoir-faire qui leur sont liés, la nécessité de leur assemblage ou tout du moins de leur intersection reste forte.

Dans le domaine de la production du bâti, les mêmes phénomènes de distanciation sont à l'oeuvre avec des formes de surspécialisation dans les métiers. Il suffit d'observer comment toute nouvelle dimension de conception, par exemple la qualité environnementale, est aujourd'hui attribuée à un conseiller spécifique. On retrouve cette tendance dans l'enseignement. Architectes et ingénieurs sont formés séparément, tout du moins en France, et au sein de chaque formation les savoirs constitutifs de ces disciplines sont isolés et interagissent peu. Le processus de projection allant de l'idée à la matière se fait par des séquences largement étanches qui parfois sont mises en opposition, préparant ainsi involontairement un terrain de méfiance voire de défiance entre les divers praticiens de la maîtrise d'oeuvre. Les outils qui instrumentent ces pratiques finissent même par ne pas être interopérables tant les modèles sur lesquels ils se fondent sont différenciés. La critique de ces pratiques n'est pourtant pas neuve. Jean Prouvé a largement tancé ces contemporains sur cette question en donnant au prototype un rôle central dans les

pratiques de conception et de fabrication (Bignon 1990). Ezio Manzini a montré que le processus qui va du pensable au possible entremêle largement projet virtuel et matérialité (Manzini 1989). D'autres travaux plus récents ont fait apparaître que les différents médiums utilisés en conception et les modèles qui les sous-tendent ne pouvaient s'opposer ou se substituer l'un à l'autre. Par exemple, Pierre Côté a confirmé que la modélisation numérique ne peut ni se substituer au dessin manuel ni à la maquette (Côté 2011).

## **HYPOTHÈSE**

Notre travail se fonde sur l'hypothèse qu'un croisement des outils de modélisation utilisés pour la production des ouvrages est de nature à fertiliser les démarches et augmenter la qualité des propositions. La question de la matérialisation peut alors être abordée à partir de cinq modèles différents : le modèle sémantique, le modèle analogique, le modèle géométrique, le modèle structurel et le modèle prototype, étant entendu que la réalisation finale finit récursivement par devenir elle-même le modèle du projet qui lui a donné naissance.

Chacun des modèles questionne et/ou solutionne une ou plusieurs dimensions de la matérialité. Par exemple, la question du poids des composants qui n'est pas présent dans le modèle géométrique est au contraire un attribut constitutif du modèle structurel. Deux modèles différents peuvent également avoir les mêmes attributs de matérialité, mais avec des valeurs ou des degrés de certitude différents. Ainsi la question de la forme, très incertaine dans le modèle sémantique, devient quasiment figée dans le modèle prototype. Ce sont donc les attributs de la matérialité et leurs valeurs qui sont constitutifs de chacun des modèles. Ils guident les variations différentes du comportement des modèles et donc leur aptitude à permettre l'exploration et l'évaluation des propositions. Dans le présent travail, une liste de dix attributs permet de caractériser chacun des modèles et leur aptitude à représenter ces « être géométriques dans l'espace » identifiés par D.G. Emmerich dans la morphogenèse structurale (Emmerich 1971).

Nous avons formalisé cette approche dans une méthode qui est aujourd'hui utilisée pour mener les « défis du bois ». Appliquée et adaptée depuis huit années, elle permet une production rapide, inventive et partagée dans le cadre de cette manifestation.

## **LES DÉFIS DU BOIS**

Les défis du bois sont un dispositif pédagogique visant à mobiliser des savoirs et savoir-faire, de l'intelligible et du sensible, pour concevoir et réaliser des structures inventives en bois. Il s'agit véritablement d'un atelier à tous les sens du terme. Atelier d'artiste, atelier d'artisan, atelier d'usine, bref c'est un lieu où sont rassemblés ceux qui conçoivent ou fabriquent un objet, voire une œuvre. Le protocole pédagogique proposé met en œuvre des pratiques de modélisation croisées de l'objet à concevoir et réaliser en abordant la question de la matérialité par la manipulation de données tantôt symboliques, tantôt iconiques, tantôt matérielles.

Initié par l'ENSA-Nancy et l'ENSTIB en 2005, cet atelier didactique rassemble près d'une cinquantaine d'étudiants, pour moitié élèves architectes et pour moitié élèves ingénieurs en provenance de différents pays. Organisés en dix équipes mixtes, ces étudiants doivent concevoir et réaliser en une semaine une structure en réponse à un sujet qui leur est révélé le jour du démarrage de l'épreuve en faisant appel à un outillage et à une quantité de matériaux limités et identiques pour tous. ([www.defisbois.fr](http://www.defisbois.fr))

Figure 1  
Défis du bois  
2012 : un rayon  
pour chacun, un  
soleil pour tous



1

## LE MODÈLE EN CONCEPTION

S'il est admis que, d'une manière générale, nous raisonnons sur des modèles (Valéry 1973), il convient cependant d'apporter quelques précisions sur le rôle des modèles. Dans notre contexte expérimental, le modèle doit être appréhendé comme une représentation simulante et stimulante. Comme le modèle scientifique, le modèle en conception permet de décrire et de prédire un fait, un comportement, une réalité au sens large. Mais il permet aussi de construire par la pensée cette réalité qui n'existe pas ou pas encore. Il s'agit moins d'établir la connaissance d'un objet que de produire la connaissance d'un projet (Le Moigne 1989).

La perception de l'objet à construire qui s'établit dans le modèle va pouvoir prendre des formes ou plutôt des formalisations variées. Le modèle pourra se construire sur des données symbolique avec une forme d'abstraction importante par rapport au matériau ; c'est le cas du modèle sémantique ou du modèle physique. Il pourra au contraire s'attacher sur des données iconique avec une correspondance visuelle plus forte, comme c'est le cas du modèle analogique ou du modèle géométrique. Le prototype représente, quand à lui, une forme hybride de modélisation, en combinant une expérience « vraie » de la structure fondée sur des données matériologiques et des représentations symboliques qu'elles soient mathématiques ou sémantiques.

Les modèles de conception vont également entretenir des rapports à la matérialisation de l'idée à des degrés différents. Si le modèle sémantique est très distant et incertain sur la matérialité, le modèle prototype, lui, se confond presque avec cette matérialité. Dans une conception expérimentale comme la nôtre, la question de l'ambiguïté du modèle ne se pose pas comme dans le domaine des sciences. Au contraire, selon les moments du processus de conception et les modèles convoqués, l'ambiguïté peut être favorable à une attitude projective. Le « flou » du modèle sémantique est indispensable pour activer l'imaginaire et permettre des dérivations nombreuses nécessaires à la recherche de la solution. Tandis que la précision du modèle prototype est utile à la finalisation du projet.

La dernière question sera celle de la justesse du modèle. Si le principe de preuve peut être convoqué dans le modèle physique, il est difficilement applicable au modèle sémantique et finalement au projet comme modèle à construire. Certes, la construction réelle pourra participer à la vérification de certaines pertinences, comme par exemple la stabilité, mais elle ne saurait argumenter l'acceptation ou la réfutation globale de la proposition (Popper 2006). L'œuvre réalisée sera ou ne sera pas (pour ceux qui ont échoué), mais elle ne sera

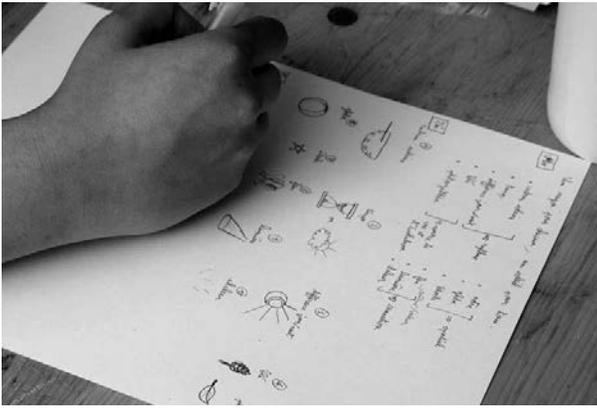


Figure 2  
Modèle  
sémantique :  
des mots et des  
traces graphiques

2

pas une preuve pour les modèles utilisés. Finalement on constatera que les modèles en conception sont d'abord des outils projectifs avant d'être des outils analytiques. La combinaison de différents modèles dans l'activité des « défis du bois » nous permet d'asseoir la multiplicité des points de vue, en particulier celle des architectes et des ingénieurs. Elle favorise une approche sélective, mais différenciée des informations indispensables à la conduite du travail de conception. Elle autorise une évaluation réciproque en permettant également de compenser l'incomplétude de chaque modèle et leurs inadéquations à répondre à toutes les questions posées lors de la conception. Elle permet enfin d'enrichir le processus de conception en situation expérimentale, en limitant les approches routinières et en favorisant la capacité d'invention.

## LE MODÈLE SÉMANTIQUE

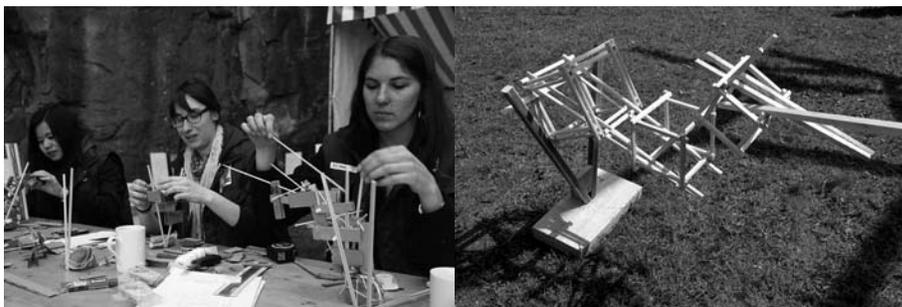
Le modèle symbolique associe librement des mots et des croquis rapides pour permettre à l'équipe de conception de clarifier un « concept » partageable. Le modèle se formalise ici à partir de deux types de signifiants appartenant au langage et à la figuration naturels. Les premiers sont des mots empruntés au vocabulaire courant. Ceux-ci peuvent avoir des caractères d'abstraction du réel très différenciés. Par exemple, le mot « légèreté » porte une ouverture sémantique plus large que le mot « escalier ». Les seconds sont des « traces » ou « icons », ils échappent à la figuration codée, mais affinent le sens des mots auxquels ils sont liés ou apportent un signifié que le mot peine à exprimer.

Par cette formalisation abstraite, le modèle sémantique autorise un premier niveau d'échange du concepteur avec lui-même et des concepteurs entre eux.

Le modèle sémantique est un dispositif d'explicitation incertaine qui permet rapidement d'ouvrir le champ du pensable et du dessinable et de contourner le syndrome de la page blanche.

Nous utiliserons le modèle sémantique pour « mettre en condition » de création l'équipe de conception. Il s'agit de parvenir à dégager un maximum d'hypothèses au sein de l'équipe. L'intérêt porté à ce modèle réside dans sa facilité d'accès. La parole a la capacité de renvoyer rapidement et mentalement à une image, un son, des couleurs..., autant d'éléments à interpréter et de déclinaisons possibles qui deviennent dessinables pour démarrer la conception.

Figure 3  
Modèle  
analogique :  
une première  
forme de  
matérialisation



3

Dans ce modèle, la matière est largement symbolique. Elle renvoie à des images puisées dans des univers référentiels très différents. Le bois peut évoquer l'arbre ou la forêt, la verticalité du tronc et le flou de la canopée. Mais il peut également évoquer le ciel et la terre, le feu et la vie, la cabane primitive ou le temple grec. La représentation formelle donnée au mot enlève une part d'abstraction et précise l'intention, l'idée qu'il faudra développer. Une ligne ondulante, un élanement, un éclatement... représente des formes géométriques simples ou complexes qui font entrer le projet dans le domaine du pensable. La matière prend forme en même temps qu'elle prend nom pour finalement prendre sens.

La réflexion passe de l'imaginable au pensable. L'échange d'informations orales dans l'équipe donne des indications qui ne figurent pas dans le dessin ou qui précisent les mots. La matérialité commence à prendre la forme d'une matière signifiante intégrable dans le projet. Le collectif de conception doit alors gérer et filtrer la quantité d'éléments incertains et complexes introduits dans le modèle.

## LE MODÈLE ANALOGIQUE

Le modèle analogique représenté par la maquette physique est un modèle qui se caractérise par des analogies de comportements ou de formes proches de l'objet réel. Karen Moon nous rappelle que la maquette a toujours été un moyen pour les architectes de développer et communiquer leurs idées, parce qu'elle constitue le passage à la volumétrie par la 3D (Moon 2005). La maquette spatialise les idées souvent représentées en deux dimensions (Schilling 2007). Cependant, le niveau de détail et de prise en compte de la matière va dépendre principalement de l'échelle utilisée.

Nous utilisons deux sortes de maquette dans notre travail. La première est dite conceptuelle. Elle est sans échelle véritable et se trouve dans un prolongement du modèle sémantique. Elle concrétise la pensée par un volume en trois dimensions en associant des matériaux qui pourront ou non se rapprocher de ceux utilisés au final. Sans être dépourvue de matérialité, elle conserve une part d'abstraction de la matière qui permet de développer plusieurs idées constructives ouvrant toujours le champ des possibles. Au travers du modèle ainsi produit, l'équipe de conception s'attachera à structurer la forme pour la rendre réalisable, puis fabricable.

La seconde maquette est dite de composition. Elle peut être réalisée sous forme d'une autre maquette que la maquette conceptuelle ou venir la « reprendre ». Dès lors, la prise en compte de la matière devient de plus en plus précise. Le niveau de détail va dépendre principalement de l'échelle utilisée. La maquette devient support de nombreuses informations. Il y a à la fois l'information réelle comme la position des composants dans ce

Figure 4  
Modèle  
géométrique :  
une maquette  
virtuelle



4

que montre l'objet avec l'exécution de détails soignés, mais aussi l'information de ce qui n'est pas montré, mais seulement suggéré par les matériaux qui seront utilisés. La colle, par exemple, traduit un assemblage qu'il faudra résoudre.

Dans ce modèle, la matière va jusqu'à la miniaturisation (qui semble nécessaire) du matériau final dans ses rapports de longueur, largeur et épaisseur. Pourtant si la nature du matériau utilisé pour la maquette est identique à celle du matériau final, l'analogie avec le réel potentiel reste partielle. En conception, le modèle analogique n'est pas une simple réduction. Une volige de 4 mètres de long n'a pas le même comportement qu'une pièce de bois de 20 centimètres, même si sa section est proportionnelle.

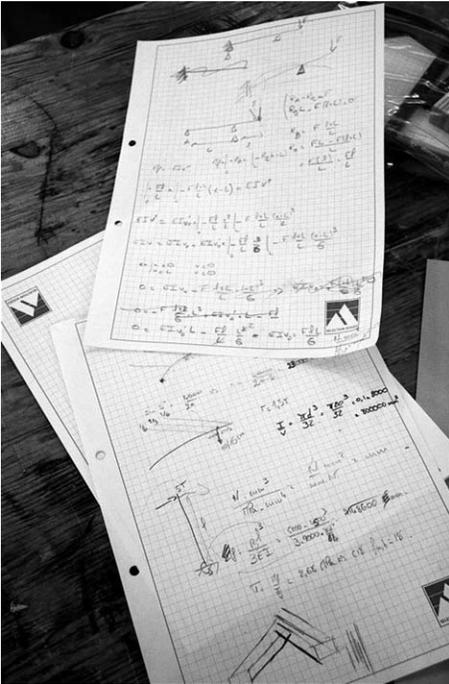
La maquette trouve aussi sa pertinence dans une première approche de la stabilité et de l'assemblage offert par la lecture directe. En manipulant physiquement le modèle créé, on peut expérimenter avec une première approximation son comportement. L'observation et l'analyse des déformations du modèle renverront à l'utilisation d'autres modèles comme le modèle structurel et/ou à la reprise de la maquette. Dans le modèle analogique, la matière devient « visualisable » et le projet devient davantage constructible avec le montage qui transparait en filigrane.

## LE MODÈLE GÉOMÉTRIQUE

La modélisation géométrique est l'ensemble des outils mathématiques, numériques et informatiques qui, combinés, permettent de construire un modèle virtuel (ou modèle informatique) d'un objet réel. Elle sous-entend d'être en mesure de réaliser la construction et l'assemblage de formes élémentaires pour créer des objets de plus en plus complexes en respectant des contraintes topologiques.

Le modèle géométrique permet d'assurer une représentation tridimensionnelle qui favorise la compréhension de l'objet, notamment sur la forme, les connexions... Cet objet peut être le fruit de l'imagination ou l'expression d'une solution plus ou moins exacte d'un problème physique donné, voire un compromis entre les deux. Le modèle créé est une représentation « probable » de l'objet avec un dimensionnement « vraisemblable » des composants donnés au départ. Comme la maquette, le modèle géométrique permet des manipulations pour représenter, modifier, analyser, manipulations souvent facilitées par la capacité des modeleurs à favoriser le choix des points de vue et le niveau de focalisation.

Figure 5  
Modèle structurel :  
l'usage du calcul  
scientifique



5

Par différence avec le modèle analogique, la paramétrisation des composants (par exemple les sections) peut favoriser le travail de recherche de solutions par ajustement.

Du côté de la fabrication, le modèle géométrique donnera une information réelle vis-à-vis de la matière en renseignant les angles de coupes, les longueurs des pièces ou le nombre total d'éléments. Il peut même dans certains processus « numériques continus » fournir les données d'entrées pour des machines à commande numérique. Ce n'est pas l'objet des « défis du bois », car nous voulons privilégier un rapport du projet à l'objet qui sera aussi tactile.

## LE MODÈLE STRUCTUREL

Le modèle structurel permet une compréhension et une simulation du comportement de la structure en terme de stabilité et de résistance des matériaux. Il fait appel à différentes théories issues de la physique des matériaux et des structures comme la « théorie des poutres » ou des méthodes calculatoires comme le « calcul aux éléments finis ».

Sur le plan iconique, le modèle s'appuie sur une abstraction des composants en réduisant leur forme à un axe et une section et leur liaison à un nœud. Sur le plan sémantique les liaisons sont caractérisées par un comportement mécanique (encastrement, rotule...) tandis que la matière y est abordée par son module d'élasticité. Le modèle structurel est donc une abstraction par rapport au modèle analogique et au modèle géométrique dont il reprend les attributs, mais avec une valuation différente. Celle-ci enrichit la compréhension du comportement physique de la structure, mais elle peut aussi perdre de l'information antérieure. Sur la technologie de l'assemblage par exemple, le modèle analogique peut



Figure 6  
Modèle prototype :  
la matière en  
essais

6

porter une information qui se perd dans le modèle structurel. Ainsi, l'usage de fils pour liasonner les composants d'une maquette peut caractériser une ligature, alors qu'une épingle simule une tige filetée.

Le modèle structurel contraint également à un raffinement des composants en obligeant à les dissocier. Il devient possible de décomposer le modèle en identifiant chacune de ses entités et ainsi d'entrevoir la faisabilité constructive de l'objet en conception. La matérialisation devient « structurellement réaliste ».

Enfin, la simulation structurelle favorise la visualisation des efforts et de la déformation de la structure. Elle assooit la compréhension dynamique de l'ouvrage à dimensionner.

## LE MODÈLE PROTOTYPE

Le modèle prototype permet d'expérimenter par le « travail grandeur nature » les multiples valeurs des attributs de la matérialité des autres modèles en apportant une dimension tactile et corporelle indispensable.

Il joue un rôle empirique dans la vérification du dimensionnement en complément du modèle structurel en permettant d'éprouver physiquement des valeurs qui sont trop souvent abstraites pour les étudiants. Avec des tests à l'échelle 1/1, il permet d'accéder efficacement à une solution en facilitant la compréhension de la structure par l'expression concrète des déformations et l'approche des singularités du matériau bois. La matière se révèle et ce qui était pensé comme léger devient parfois lourd, le raide devient souple et gauche, le cintrable devient rigide, le solide et résistant devient fragile et cassant.

Le prototype donne par ailleurs une autre approche constructive que la maquette en intégrant les problèmes réels de poids et d'encombrement, mais aussi ceux liés à l'usinage et au levage. La réalisation du prototype invite à penser la chronologie de fabrication et de montage. Les questions de découpage de l'objet apparaissent en distinguant ce qui est fait au sol et ce qui est fait en l'air avec les problèmes de fixations et de facilité d'accès. Le modèle intègre aussi des « composants éphémères » pour l'étalement, le contrôle de l'équerrage ou encore pour le levage.

Figure 7  
Tableau récapitulatif des modèles et du degré de caractérisation des attributs

Modèles	SEMANTIQUE	ANALOGIQUE	GEOMETRIQUE	STRUCTUREL	PROTOTYPE
Attributs					
Symbolique	***	**	*		*
Forme	*/**	***	***	***	***
Dimension	*	**	***	***	***
Poids				**	***
Position		**	***	***	***
Relation (topologie)		**	***	***	***
Mécanique		**		***	***
Stabilité		*		***	***
Fabrication		*	*		***
Montage		*	*		***

7

On notera enfin que le contact réel et concret avec le matériau n'intervient pas seulement à la fin du processus de conception. Le modèle prototype n'est pas réservé à la réalisation de l'objet final, il se veut permanent dans le processus de conception, en renseignant les autres modèles et en opérant la liaison entre le pensable et le réalisable.

## CONCLUSION

En nous appuyant sur une expérience pédagogique menée depuis huit ans, nous avons tenté de formaliser un processus de conception/fabrication en tant que processus de matérialisation d'idées. Cette approche se fonde sur l'utilisation croisée de cinq modèles caractérisés chacun par des attributs de matérialité. La figure 7 présente un tableau récapitulatif de ces attributs, leur présence et leur valeur dans chacun des modèles. On remarquera que si le modèle sémantique comporte peu d'attributs, ceux-ci sont particulièrement critiques en début de processus. A l'opposé, le modèle prototype comporte beaucoup d'attributs qui le place souvent en fin de process, même s'il est partiellement utilisable avant.

Loin d'être linéaire, ce processus de matérialisation d'une forme structurelle par usage de modèles différenciés se révèle largement opportuniste. Ce sont les différentes questions posées par la matérialité qui appellent l'usage de l'un ou l'autre des modèles.

Les outils numériques (modeleurs géométriques, simulation de structures...) dans un tel dispositif ne se substituent pas aux autres moyens de compréhension et d'échanges, mais viennent les enrichir. Rarement premiers, ils sont aussi rarement derniers dans le processus de conception. La matière ne saurait jamais être totalement dématérialisée.

## REFERENCES

- Bignon J.C., Coley C. (1990), Jean Prouvé entre artisanat et industrie 1923-1939, Archives modernes de l'architecture en lorraine
- Côté P., Mohamed-Ahmed A., Tremblay S. (2011), A Quantitative Method to Compare the Impact of Design Mediums on the Architectural Ideation Process., in P. Leclercq, A. Heylighen et G. Martin, Computer Aided Architectural Design Futures 2011 Proceedings of the 14th International Conference on Computer Aided Architectural Design Futures, Liege, pp. 539-555
- Derycke D.(2012), La complexité inhérente aux modèles numériques et le paradigme de la représentation architecturale, in F. Guéna et C. Lecourtois (dir.), Complexité(s) des modèles de l'architecture numérique, Nancy, PUN, pp. 153-163
- Emmerich D.G. (1971), Morphologie : ses sources, son contenu. La morphogenèse. In Morphologie/structure. Ministère des Affaires Culturelles - Service des Enseignements de l'Architecture et des Arts plastiques
- Joachim G., Safin S., Roosen M. (2012), Les représentations externes en collaboration créative. Étude d'un cas de réunions de conception architecturale, in F. Guéna et C. Lecourtois (dir.), Complexité(s) des modèles de l'architecture numérique, Nancy, PUN, pp. 115-128
- Le Moigne J.L. (1989), «Qu'est-ce qu'un Modèle ?». in Les modèles expérimentaux et la clinique psychiatrique, Confrontations psychiatriques, n° 30, pp. 11-30 Manzini E. (1989), La matière de l'innovation. Collection Inventaire, Édition du Centre Georges Pompidou/CCI,
- Paris Moon K. (2005), Modeling Messages, The architect and the model. Edition The Monacelli Press, New-York
- Picon A. (2005), L'architecture et le virtuel : vers une nouvelle matérialité, in Chupin J.P. et Simonnet C., Le projet tectonique, Infolio, pp. 165-182
- Popper K. (2006), Conjectures et réfutations, la croissance du savoir scientifique, Payot, Paris
- Schilling A. (2007), Maquettes d'architecture. Collection Basics, Birkäuser Editions d'architecture, Bâle
- Valéry P. (1973), Eupalinos suivi de l'âme et de la danse suivi de dialogue de l'arbre, Gallimard, Paris

**PARTICIPANTS \_ PEOPLE**  
**REMERCIEMENTS \_ THANKS**  
**SOUTIENS FINANCIERS \_ SPONSORS**



# PARTICIPANTS \_ PEOPLE

## RESPONSABILITÉ SCIENTIFIQUE \_ CONFERENCE CHAIR

### PHILIPPE LIVENEAU

Permanent teacher and researcher

Grenoble National High School of Architecture, Cresson laboratory - UMR CNRS 1563.

Dr Philippe Liveneau is an architect (1996) and Phd of Engineering Sciences (2005), permanent teacher for the Ministry of Culture, based at the Grenoble National High School of Architecture (2005) where he teaches since 1998. He is also member of Grands Ateliers pédagogique comity and a researcher at Cresson laboratory, UMR «architectural and urban atmosphères». He leads an architectural office and is co-founder of Superlab agency.

His research is focused on both analogical and digital gesture throughout the continuum «Programming > Designing > Manufacturing > Experiencing» architecture. Through the production of atmospheric quasi-objet, following an iterative and recursive logic, he realizes architectural installations and participate to internationales exhibitions (Shanghai, Singapour, Paris, Lyon). The anthropological foundation of cognitive activity involved in the conception and innovation design process is considered here as a set of continuous variation of a formal and informed corporal schematism that can be define as a physical effort, a sensible effect a corporal efficiency and an emotional effervescence. The computational logic and parametric modeling tools associated with CNC machines are part of his research and teaching in the Master program «Architecture, Digital Cultures and Atmospheres», Eco design Strategies of non-standard environment which he is responsible. He is working especially on the fold and origami, sections, modulations, pattern and ornamentation through performative skins and interactive devices. Between intentional aesthetic and intuitive aesthetic the horizon of his approach is an ecological and economical normalization of architectural event .

### PHILIPPE MARIN

Permanent teacher and researcher

Lyon National High School of Architecture, MAP-ARIA Laboratory UMR CNRS-MCC 3495

Dr Philippe Marin is an permanent teacher at the school of architecture of Lyon, where he teaches courses in digital fabrication and design computing since 2006. He leads a seminar on technologies and architecture regarding both theoretical and practical issues. He received a Master degree of Information Technology, a Master degree of Design and a PhD in Architectural Sciences. His researches focus on parametric modelling and digital fabrication. Generative and evolutionary processes are explored in order to characterize the design activity and the designer thinking. As an extension to the conceptual tooling, the digital materialization and the continuum between digital conception and fabrication allow new geometries, new spatiality, and new interaction modalities. The methods, tools and perceptions associated are explored in order to serve education and innovation. He is member of the Grands Ateliers pédagogique committee and researcher at MAP-ARIA laboratory. He contributes to several national research programs and he collaborates with the national technological research organisation CEA. He is co-founder of Superlab agency.

## CONFERENCIERS INVITÉS \_ KEYNOTE SPEAKERS

### MARTA MALÉ-ALÉMANO

Marta Malé-Alemanó is an architect, researcher and innovation design educator from Barcelona. She has been the acting director of the Institute for Advanced Architecture of Catalonia (IAAC) in Barcelona, after co-directing its Master Program for several years, and leading the 'Digital Tectonics' Research & Development area since its creation. She has taught architectural design in several well-known Universities in the US (MIT, U.PENN, UCLA, SCI-ARC, and others) and been a Course Master Tutor in the Design Research Laboratory (DRL) at the AA (Architectural Association) in London. Her academic research focuses on the conceptual and material opportunities that emerge from the use of digital design and fabrication technologies for the production of architecture. Outside of academic environment, Marta Malé-Alemanó directs her own professional studio in Barcelona and has curated several exhibitions on digital fabrication subjects. From the studio she develops her own projects and collaborates with other practices as a consultant for specific projects, in areas that range from the analysis and concept development of parametric design proposals to the application of digital technologies for the materialization of complex forms. Marta Malé-Alemanó graduated from ETSAB-UPC (Barcelona, 96), holds a Master Degree in Advanced Architectural Design from Columbia University (New York, 97) and is currently a PhD candidate at the ETSAB-UPC (Barcelona), investigating the potential of large-scale rapid manufacturing technologies to innovate building construction.

## BRANKO KOLAREVIC

University of Calgary

Branko Kolarevic is Associate Dean (Academic) and Professor of Architecture at the University of Calgary Faculty of Environmental Design, where he also holds the Chair in Integrated Design and co-directs the Laboratory for Integrative Design (LID). He has taught architecture at several universities in North America and Asia and has lectured worldwide on the use of digital technologies in design and production. He has authored, edited or co-edited several books, including "Manufacturing Material Effects" (with Kevin Klinger), "Performative Architecture" (with Ali Malkawi) and "Architecture in the Digital Age." He holds doctoral and master's degrees in design from Harvard University and a diploma engineer in architecture degree from the University of Belgrade in the former Yugoslavia.

## LAWRENCE SASS

Associate Professor  
Massachusetts Institute of Technology, MIT, Department of Architecture

Lawrence Sass is an architectural designer and researcher exploring an emerging field of digital design and fabrication. He believes that all buildings will be printed with machines run by computers and that the age of hand crafted, hand operated construction will be a thing of the past. This includes prefabricated construction which is a century old tradition of handcrafted construction indoors. We are on the edge of a new and emerging means of machine operated design and construction. Best is that the designer will plan a larger role in the delivery process. Cost savings will come from assembly only construction sites; both manual and robotic. The challenge for architectures schools will be development of new research and teaching agendas related to creative digital design and fabrication across scales from furniture and skyscrapers. This transformation also includes new teaching computational methods that support collaborative design production, high level computer programming and robotic fabrication. Lawrence is an associate professor in the department of architecture at MIT teaching courses specifically in digital fabrication and design computing since 2002 after earning a PhD '00 and SMArchS '94 also at MIT. He has a BArch from Pratt Institute in NYC, has published widely and has exhibited his work at the Modern Museum of Art in New York City.

## YVES WEINAND

EPFL, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Laboratoire IBOIS

De nationalité belge, Yves Weinand, a obtenu son diplôme d'architecte en 1986 à l'Institut supérieur d'architecture Saint-Luc à Liège, Belgique. Pratiquant d'abord l'architecture en tant qu'architecte indépendant à Helsinki, à New York et à Bruxelles, il intègre l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne où il obtient son diplôme d'ingénieur civil en 1994.

Assistant à la chaire des structures de la faculté d'architecture de l'Ecole polytechnique de Rhénanie-Westphalie, il présente en 1998 une thèse de doctorat portant sur la visualisation des contraintes. Depuis 1996, Yves Weinand est propriétaire du bureau d'Etudes Weinand, ingénieurs-conseils et architectes à Liège, Belgique.

Professeur à l'Université technique de Graz, Autriche de 2001 à 2004, il est depuis 2004 professeur et directeur du laboratoire de construction en bois IBOIS de l'EPFL, Lausanne. Création de la start-up SHEL, architecture, engineering, production design avec Hani Buri en 2008.

Les recherches en cours dans le laboratoire des constructions en bois IBOIS de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne tendent à questionner profondément les relations entre sciences de l'ingénieur et concepteur architecturale. Les travaux entrepris s'intéressent aux questions de la construction, de la réalisation concrète des formes complexes et des surfaces libres dans l'espace. Nous cherchons à faire aboutir des solutions constructives effectivement diffusables pour un marché de la construction qui nécessite que l'on puisse réaliser à des coûts non excessifs des structures non-conventionnelles. Le développement d'outils informatiques spécifiques et spécialisés apparaît toujours plus nécessaire : nos recherches s'intéressent au développement et à la mise en relation des logiciels qui agissent à divers niveaux de la génération des formes complexes au contrôle et dimensionnement des éléments finis, mais aussi pour la commande des machines à contrôle numérique.

## RELECTEURS – REVIEWER

**PAUL ACKER** Scientific Director, Lafarge  
**ROMAIN ANGER** ENSA Grenoble - CRAtterre  
**LAURY BARNES-DAVIN** Groupe Vicat  
**OLIVIER BAVEREL** ENSA Grenoble  
**HANS BURI** EPF Lausanne  
**THIERRY CIBLAC** ENSA Paris - La Villette  
**TIANA DELHOME** CEA Grenoble  
**GWENAËL DELHUMEAU** ENSA Versailles  
**ANTONIN FABBRI** ENTPE  
**FRANÇOIS FLEURY** ENSA Lyon  
**GILLES LENON** CTP

**STÉPHANE MAGNIN** ENSBA Nice  
**DIMITRIS PAPALEXOPOULOS** NTUA Grèce  
**NICOLAS PAULI** ENSA Montpellier  
**CHRISTIAN PÈRE** ENSAM Cluny  
**VINICIUS RADUCANU** ENSA Montpellier  
**RÉMI ROUYER** ENSA Versailles  
**SILVANA SEGAPÉLI** ENSA Saint-Etienne  
**GEORGES TEYSSOT** FAAAV Laval Canada  
**HENRI VANDAMME** ESPCI  
**MARIA VOYATZAKI** AUTH Grèce

## AUTEURS – AUTHORS

<b>ACKER PAUL</b> Scientific Director, Lafarge - Centre de recherche (LCR) - France	p 205
<b>ADOLPHE LUC</b> PRES - Université de Toulouse, LRA - Laboratoire de Recherche en Architecture	p 113
ENSAT - Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Toulouse - France	
<b>AMBROSINI MARCO</b> MIKI Advanced Composites, via industriale 11, CH-Riva San Vitale	p 309
<b>ANGER ROMAIN</b> Laboratoire CRAtterre, unité de recherche AE&CC (Architecture, Environnement et Cultures Constructives), Les Grands Ateliers	p 215
<b>ARNAUD LAURENT</b> ENTPE National School of Public Works, University of Lyon, France	p 227
<b>BALAY OLIVIER</b> Architecte, CRESSON, UMR 1563 - France	p 185
<b>BAVEREL OLIVIER</b> Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble, AECC - France	p 251, 299, 321
Université Paris-Est, Laboratoire Navier, ENPC-IFSTTAR-CNRS, UMR 8205 - France	
<b>BERNIER-LAVIGNE SAMUEL</b> Université Laval, Québec - Canada	p 55
<b>BESANÇON FRANCK</b> ENSA Nancy, MAP-CRAI UMR CNRS-MCC 3495 - France	p 335
<b>BEYSENS DANIEL</b> ESPCI-PMMH, CEA-Grenoble et OPUR - France	p 281
<b>BIGNON JEAN-CLAUDE</b> ENSA Nancy, MAP-CRAI UMR CNRS-MCC 3495 - France	p 291, 335
<b>BONNEAUD FRÉDÉRIC</b> PRES - Université de Toulouse, LRA - Laboratoire de Recherche en Architecture	p 113
ENSAT - Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Toulouse - France	
<b>BOUJILA BEN AFIA SYRINE</b> Équipe de Recherches sur les Ambiances (ERA) - Tunisie	p 145
<b>BROGGINI FILIPPO</b> Agence BlueOfficeArchitecture - Bellinzona - Suisse	p 281, 309
<b>BURGHOLZER JULIEN</b> Centre d'Études Techniques de l'Équipement (CETE-Est), Strasbourg - France	p 239
<b>CHELKOFF GRÉGOIRE</b> École Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble	p 123
Laboratoire Cresson (directeur) UMR CNRS Ambiances architecturales et urbaines (directeur adjoint) - France	
<b>CIFUENTES QUIN CAMILO ANDRÉS</b> Barcelona Tech - UPC - ETSAB - Spain	p 65
<b>ABONDANO DAVID</b> PhD Candidate, ARC Enginyeria i Arquitectura La Salle, Universitat Ramon Llull, Barcelona - Spain	p 79
<b>DIVIANI LUCA</b> iCIMSISUPSI University of Applied Sciences of Southern Switzerland, Galleria 2, CH-6928 Manno	p 309
Airlight Ltd, via Croce 1, CH-6710 Biasca	
<b>DJAHANBANI KEIVAN</b> Centre d'Études Techniques de l'Équipement (CETE-Est), Strasbourg - France	p 239
<b>DOAT PATRICE</b> Laboratoire CRAtterre, unité de recherche AE&CC (Architecture, Environnement et Cultures Constructives)	p 215
Les Grands Ateliers	
<b>DUCHANNOIS GILLES</b> ENSA Nancy, MAP-CRAI UMR CNRS-MCC 3495 - France	p 335
<b>DURAND MICHEL-ANDRÉ</b> Les Grands Ateliers	p 215
<b>FLOISSAC LUC</b> Laboratoire de Recherche en Architecture (LRA), Toulouse - France	p 239
<b>FONTAINE LAETITIA</b> Laboratoire CRAtterre, unité de recherche AE&CC (Architecture, Environnement et Cultures Constructives)	p 215
Les Grands Ateliers	
<b>RIETHER GERNOT</b> Georgia Institute of Technology - USA	p 199
<b>GHISLAIN HIS</b> Laboratoire Architecture Conception-Territoire-Histoire (LACTH)	p 101
Ecole Nationale Supérieure d'Architecture et de Paysage de Lille (ENSAPL) - France	
<b>GOURLAY ETIENNE</b> ENTPE National School of Public Works, University of Lyon, France	p 227
<b>HÉBERLÉ ÉLODIE</b> Centre d'Études Techniques de l'Équipement (CETE-Est), Strasbourg - France	p 239
<b>HOBEN HUGO</b> Laboratoire CRAtterre, unité de recherche AE&CC (Architecture, Environnement et Cultures Constructives)	p 215
<b>JENSEN TIM-JOACHIM</b> Université Paris-Est, Laboratoire Navier, ENPC-IFSTTAR-CNRS, UMR 8205 - France	p 239
ENSAV - France	
<b>KERKIDOU MARIA</b> National Technical University of Athens - Greece	p 261
<b>KOTSANI EFTHYMIA DIMITRA</b> School of Architecture, Aristotle University of Thessaloniki (AUTH)	p 177
<b>LÉOHAUD ISABELLE</b> Architecte, Chercheure associée au laboratoire Cresson, Centre de recherche sur l'espace sonore et l'environnement urbain,	p 155
CNRS UMR 1536 - France	
<b>DIMITRIOU MARIA</b> Department of Architecture, University of Thessaly - Greece	p 91

<b>MILIMOUK-MELNYTCHOUK IRYNA &amp; OUAZZANI JALIL</b>	p 281
ARCOFLUID - France	
<b>MONIER VINCENT</b>	p 291
ENSA Nancy, MAP-CRAI UMR CNRS-MCC 3495 - France	
<b>OLAGNON CHRISTIAN</b>	p 215
Laboratoire MATEIS (Matériaux : Ingénierie et Science), INSA de Lyon	
<b>PARIS MAGALI</b>	p 133
Centre de Recherche sur l'Espace Sonore et l'Environnement Urbain, UMR CNRS 1563, Ambiances Architecturales et Urbaines	
École Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble - France	
<b>PECHLIVANIDOU-LIAKATA ANASTASIA</b>	p 261
National Technical University of Athens - Greece	
<b>PERRIN BERNARD</b>	p 239
Laboratoire des matériaux et durabilité des constructions (LMDC), Toulouse - France	
<b>PEUPORTIER BRUNO</b>	p 251
Centre Énergétique et Procédés, MINES ParisTech - France	
<b>PUGNALE ALBERTO</b>	p 299
Faculty of Architecture, Building and Planning, University of Melbourne - Australia	
<b>RENK ALAIN</b>	p 171
UFO (urban Fabrique Organisation), Renk + partner	
<b>RIMKUS CARLA</b>	p 73
Universidade Federal de Sergipe	
<b>RIVALLAIN MATHIEU</b>	p 251
Université Paris-Est, Laboratoire Navier (UMR 8205), CNRS - ENPC, IFSTTAR - France	
<b>ROLLET PASCAL</b>	p 185
Architecte, Labex AE&CC - France	
<b>SIMONE WALTER</b>	p 171
UFO (urban Fabrique Organisation), PREVIEW_R&D	
<b>VYZOVITI SOPHIA</b>	p 91
Department of Architecture, University of Thessaly - Greece	
<b>TELLIOS ANASTASIOS</b>	p 177
School of Architecture, Aristotle University of Thessaloniki (AUTH)	
<b>TIXIER NICOLAS</b>	p 281
ENSA Grenoble & ESAA Annecy, Laboratoire CRESSON - UMR CNRS n°1563	
<b>TORNAY NATHALIE</b>	p 113
PRES - Université de Toulouse, LRA - Laboratoire de Recherche en Architecture	
ENSAT - Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Toulouse - France	
<b>TSAKIRIDIS GEORGIOS</b>	p 177
School of Architecture, Aristotle University of Thessaloniki (AUTH)	
<b>VALKHOFF HANS</b>	p 239
Laboratoire de Recherche en Architecture (LRA), Toulouse - France	
<b>VAN DAMME HENRI</b>	p 215
Laboratoire PPM (Physico-chimie des polymères et des milieux dispersés)	
ESPCI ParisTech (Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles)	
<b>VERVISCH-FORTUNÉ ISABELLE</b>	p 239
Laboratoire de Recherche en Architecture (LRA), Toulouse - France	
<b>VOYATZAKI MARIA</b>	p 271
Aristotle University of Thessaloniki, School of Architecture - Greece	
<b>YEN-LIANG WU</b>	p 163
Dep. Of Digital Media Design, Asia University - Taiwan	

## PRÉSIDENT(E)S DE SESSION \_ CHAIRWOMAN & CHAIRMAN

<b>OLIVIER BAVEREL</b> ENSA Grenoble, AECC
<b>JEAN-CLAUDE BIGNON</b> ENSA NANCY, MAP-CRAI
<b>CHELKOFF GRÉGOIRE</b> ENSA Lyon, CRESSON
<b>FONTAINE LÆTITIA</b> ENSA Grenoble, CRAterre
<b>CHRISTIAN PÈRE</b> ENSAM Cluny
<b>VINICIUS RADUCANU</b> ENSA Montpellier
<b>HENRY TORGUE</b> CRESSON
<b>MARIA VOYATZAKI</b> Aristotle University of Thessaloniki, School of Architecture

## ORGANISATEURS \_ ORGANIZERS

<b>PASCALLE BESCH</b> CCI Nord-Isère
<b>LUC BOUSQUET</b> ENSA de Lyon
<b>HÉLÈNE CASALTA</b> ENSA de Grenoble
<b>LUC DELATTRE</b> ENTPE
<b>MICHEL ANDRÉ DURAND</b> Les Grands Ateliers
<b>PHILIPPE LIVENEAU</b> ENSA Grenoble
<b>PHILIPPE MARIN</b> ENSA Lyon
<b>JACQUES PORTE</b> ENSA Saint-Etienne

# REMERCIEMENTS \_ THANKS

- À Denis Grèzes pour ses enseignements, ce qu'il a mis en place aux Grands Ateliers et les rencontres qu'il a incitées.
- Les enseignants, moniteurs et assistants qui ont contribué aux enseignements des workshop : Yann Blanchi, Hervé Lequay, Amal Abu Daya, Samuel Bergnier-Lavigne, Marian Janda, Camilo Cifuentes Quin, Florent Torres, Alex Lupascu, Antoine Pillant, Théo Marchal, Marine Reynaud, Sixtine Danielou.
- Les étudiants des ENSA de Grenoble et Lyon qui ont participé à l'exposition : Abouayoub Fayad, Al-Khayer Rached, Ammor Mariam, Arnould Vanina, Azariah Dimitri, Barilani Mattia, Benjelloun Ghita, Benyachou Hala, Beraldo Ana maria, Bret Benoit, Brichet Dit France Noline, Chevrier Guay Camille, Chiara Loria, Cruz Estelle, de Bona Jonathan, El Khattabi Sami, en Nabli Soraya, Garcia Villa Gemma, Gelik Basak, Ghias Alerassoul Narjes, Hess Joachim, Houam Fatima-Zohra, Ibenmansour Rokia, Jeannot Anatole, Jeannot Anatole, Joachim Claire, Joachim Claire, Kalle Neila, Krasnova Ksenia, Ligeti MatÈ, Lea Andra Madalina, Louriki Adam, Mancho Ricardo, Minasyan Shmavon, Mizgan Adrian-Dan, Moreira da Silva Monica, Napoleoni Martin, Panel Ulysse, Pejoutan Farnoush, Perel Sarha, Pigaglio Brice, Poignon Benjamin, Ravagnani Donadeli Bruna, Sauvage Achienne, Sokolnikova Anastasia, Tèbourbi Walid, Trufanova Ekaterina, Wawrekova Ivana, Wertheimer Nicolas
- Pascaline Thiollie, pour son travail de mise en forme
- Hans Walter Müller, pour son architecture gonflable
- L'équipe des Grands Ateliers :  
Françoise Aubry, Roland Mathieu, Anne-Marie Meunier, Maurice Nicolas, Bruno Vincent.
- Staubli pour le prêt de son bras robotisé
- Trotec pour le prêt de ses machines de découpe laser

# SOUTIENS FINANCIERS \_ SPONSORS

Nous remercions de leurs soutiens financiers les contributeurs suivants :  
We would like to thank the following sponsors for their contributions to the conference:

## LES INSTITUTIONS NATIONALES \_ NATIONAL INSTITUTION

Ministère de la Culture et de la Communication  
Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie

## LES INSTITUTIONS RÉGIONALES \_ REGIONAL INSTITUTIONS

Région Rhône-Alpes  
Chambre de Commerce et d'Industrie du Nord Isère  
Communauté d'Agglomération du Nord Isère  
Consulat des États-Unis

## LES ÉTABLISSEMENTS \_ INSTITUTIONS

Les Grands Ateliers  
L'École Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble  
L'École Nationale Supérieure d'Architecture de Lyon  
L'École Nationale Supérieure d'Architecture de Saint Étienne  
L'École Nationale des Travaux Publics de l'État

## LES LABORATOIRES \_ LABORATORIES

Laboratoire CRESSON, Centre de recherche sur l'espace sonore et l'environnement urbain, UMR CNRS 1563, Ambiances Architecturales & Urbaines  
Laboratoire MAP-ARIA, Applications et Recherches en Informatique pour l'Architecture, UMR CNRS-MCC 3495

Graphic Design: Vincent Velasco  
Ouvrage composé en Lutz Headline, Caslon Pro et Berthold Akzidenz Grotesk  
sur papier Offset Print Speed 300 gr et 80gr  
Impression\_Printing: Imprimerie Grafi

ISBN : 978-2-913962-14-9  
Achever d'imprimer en novembre 2012

---



d' école nationale supérieure architecture grenoble de

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE LYON



ambiances  
| ARCHITECTURALES ET URBAINES |  
| cresson | UMR 1563



CAPI  
> PORTE DE L'ISÈRE



Rhône-Alpes Région



# **MATERIALITY IN ITS CONTEMPORARY FORMS,** **ARCHITECTURAL PERCEPTION, FABRICATION AND CONCEPTION,**

**PROCEEDINGS OF MC2012 SYMPOSIUM  
ORGANISED BY LES GRANDS ATELIERS.**

The far-reaching technological and societal changes which characterize our time go hand-in-hand with the re-organization and renewal of the issues associated with the design and construction of our built environment. Our symposium will centre on the question of materiality in its multiple forms, addressed from a multi-disciplinary, polysemic point of view. Atomic matter has always been and remains pivotal to humankind's building activities, but this matter now has an immaterial extension in the conditions, effects or indeed performance which have become design materials in their own right. These project vectors thus give rise to new practices, know-how and construction techniques, in such a way that the modalities of project planning, design and production, every bit as much as the usual architectural modalities, configure the force field which gives shape to projects. So the notion of materiality takes on a broader sense, encompassing invisible, normative, physical, sensory, digital and societal components. Once completed an architectural project should be understood as a synthesis by which the form of forces configures the force of a form, but new forms of materiality grasped in a performative rationale nevertheless strengthen sectoral expertise. Following six specific threads our prime aim is to present the emblematic changes and innovations which are accompanying the renewal of the paradigms associated with the construction of our physical and human environment.