

Construire en matière^{grise}

« Si nous voulons résoudre les difficultés qui nous assaillent, notre manière de penser doit évoluer au-delà du niveau auquel nous avons réfléchi le jour où nous avons créé ces problèmes »

Albert Einstein

RÉSUMÉ

La préservation du climat, de la biodiversité et des ressources est un enjeu vital pour les prochaines décennies. Face à cette crise environnementale, la majorité des activités humaines peut être tenue pour responsable, en particulier le domaine de la construction.

En effet, l'industrie du BTP représente 40% des émissions de CO₂ des pays développés. Face à ce constat, l'architecte doit modifier son approche conceptuelle et constructive du bâtiment. Il convient donc de renforcer la proximité entre l'architecture et la matière, de repenser les modes d'utilisation de certains matériaux, de s'interroger sur leurs impacts climatiques et écologiques. Cela nous amène également à remettre en question l'intégration sociale et environnementale de l'action de construire. Prendre conscience des besoins énergétiques et matériels pour construire est un point de départ. Ainsi, à travers l'étude de modèles constructifs traditionnels esquimaux et subsahariens, nous établirons un parallèle avec la construction en terre et son potentiel d'adaptation pour aboutir à une architecture contemporaine consciente de son environnement.

Dès lors, le lecteur curieux se posera la question de la viabilité d'une telle manière de construire. L'importante main d'œuvre que la construction en terre requiert pourrait constituer un inconvénient économique qui entrerait en conflit avec la pérennisation de ce type d'architecture. Cependant, ne pourrions-nous pas voir dans les évolutions techniques et technologiques actuelles l'ébauche d'une solution à cette manière de concevoir et construire ? Dans ce cas les recherches menées par certains chercheurs et laboratoires, tel que l'IAAC, sur des manières innovantes de construire seraient une source d'inspiration pour l'architecture. En d'autres termes, accentuer la réciprocité entre recherche et architecture pourrait constituer une piste sérieuse à approfondir.

Mots-clefs : Matière, Outils, Innovation, Vernaculaire, Terre, Fabrication additive

ABSTRACT

Preserving climate, biodiversity and resources is today a burning topic. Most of human activities can be held responsible for this environmental crisis, particularly the construction area.

Indeed, construction industry represents 40% of carbon emissions of developed countries. To improve this situation, architects must modify their conceptual and constructive approach of buildings. It implies then, to reinforce the proximity between architecture and material, to re-think the using modes of some materials, to ask ourselves about their ecological and climatic impact. This leads us to tackle the environmental and social integration of the act of building by knowing its energetical and material impact. Through the study of traditional eskimos and sub-Saharan constructive examples, we will draw a parallel with earthen construction and its adaptive potential to reach a contemporary architecture, conscious of its environment.

From now on, the curious reader will ask him/her-self the question of the viability of such a way of building. The important labour supply that would require could constitute an economical drawback which would hurdle sustaining this kind of architecture. However, could we not see in the development of current technique and technology the first sketch of a solution to such a way of conceiving and building? In that case, researches led by some searchers and labs on innovative and constructive way of building would be an inspiration source for architecture. In other terms, to work on a reciprocate relationship between research and architecture could constitute a serious lead to explore.

Keywords : Material, Tools, Invention, Vernacular, Earth, Additive manufacturing

SOMMAIRE

Remerciements	9
PRÉFACE	
<i>La ligne directrice de l'architecte</i>	12
Introduction	18
I. DE L'INTELLIGENCE DE L'APPROCHE CONSTRUCTIVE	
A. Des outils et des Hommes	24
B. Détournement et optimisation	28
C. La matérialité comme esquisse	33
II. TECHNOLOGIE ET NUMÉRIQUE, VERS UNE NOUVELLE MANIÈRE DE FAIRE L'ARCHITECTURE	
A. Dématérialiser pour reconstruire	42
B. La paramétrisation comme outil d'empirisme	48
C. Automatiser la pensée	54
SYNTHÈSE	
<i>L'ingénieur et l'architecte, une relation à redéfinir pour une architecture innovante, capable d'expérimenter</i>	62
Annexes	68
Bibliographie	72

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord l'École Spéciale d'Architecture de m'avoir permis de développer un diplôme d'architecture innovant, ainsi que l'École Spéciale des Travaux Publics pour son soutien dans cette démarche.

Pour cette raison, je tiens à remercier chaleureusement les professeurs qui animent ces deux écoles. Tout d'abord, Marc Hymans pour l'énergie et les ressources qu'il a su apporter tout au long de l'année pour aboutir à un mémoire-projet unique et sans qui ce diplôme novateur n'aurait sans doute pas vu le jour. Guillaume Faas qui a permis d'installer une relation pérenne entre architecture et ingénierie dans le diplôme. Lionel Lemire dont l'ouverture d'esprit et l'écoute ont permis au mémoire-projet d'élargir considérablement ses horizons.

Je remercie également l'Institute for Advanced Architecture of Barcelona, et plus particulièrement Alexandre Dubor, de m'avoir permis de mettre un premier pied dans l'univers de la recherche appliquée à l'architecture à l'occasion d'un stage de 3 mois (01/2020 - 03/2020), me permettant ainsi de nourrir considérablement le mémoire-projet.

Je remercie Martin Pointet et Paule Trojani, pour les conseils et lumières qu'ils ont su m'apporter tout au long du diplôme.

Enfin, je remercie Florence Béliard et Julie Chopin pour le regard neuf et extérieur qu'elles ont su apporter au mémoire et projet.

Préface -
La ligne directrice de l'architecte

À la suite de la révolution industrielle, l'Homme épaulé par la machine prolonge le courant de pensée des humanistes de la Renaissance. Il se place au-dessus de la Nature, tend à s'en extirper et devient de fait « maître de la nature par sa science »¹.

L'explosion urbanistique via la prolifération de gratte-ciels à Manhattan entre 1890 et 1940 est le parfait exemple d'une société qui cherche à tout prix à se séparer physiquement de l'environnement qui l'entoure : [Coney Island, le Skyscraper, le centre Rockefeller et Europeans] «montrent la progression (et le déclin qui s'en suit) de la détermination de Manhattan d'extirper son territoire de la nature aussi loin qu'humainement possible»².

Cependant, la croissance de ces villes verticales est possible tant que ressources et énergies sont considérées inépuisables. S'il ne s'agit pas de bannir ce type de construction, il est légitime d'interroger la pertinence d'une telle manière de construire aujourd'hui. De même, un retour holistique aux méthodes de construction pré-industrielles, époque où la notion d'écologie n'avait pas de raison d'être, ne semble pas davantage pertinent. En effet les anthropologues s'accordent sur le fait que, depuis la *révolution cognitive* et l'avènement d'*homo sapiens*, nous avons accentué les pressions sur les écosystèmes environnants à hauteur des moyens énergétiques accessibles³. Ainsi, il convient de ne pas tenir responsables le progrès et l'amélioration de nos connaissances techniques, mais plutôt la manière dont nous les utilisons.

Selon l'architecte français, André Ravéreau (1919-2017), le constat va même plus loin : pour que l'architecture s'adapte parfaitement à son environnement et à la société il est nécessaire qu'«une morale pré-existe». Le terme de *morale* est ici à prendre au sens d'une ligne de conduite qui devrait dicter un comportement à suivre pour la société et les architectes. Ainsi, au-delà des questionnements autour de techniques ou matériaux à privilégier, il semblerait pertinent de repenser l'architecture à long terme, autour d'un cap. Dans les faits, cette décision peut sembler profondément politique et dépendante de d'orientations gouvernementales fortes. Néanmoins, certains architectes telle que Toshiko Mori (1951-) considèrent que la logique descendante (du gouvernement vers le peuple) n'est pas la seule alternative. Pour elle, « les architectes et plus généralement les citoyens doivent choisir activement où, quoi, comment et avec quoi construire ? ». Antoine Picon, historien de l'architecture (1957-) va encore plus loin et se demande «quand ne pas construire ?»⁴, interrogation primordiale dans ce contexte de surexploitation des ressources.

Une des solutions que nous pouvons envisager consiste à se rapprocher considérablement de l'environnement de construction. Agir à l'échelle du quartier, à l'échelle de la ville est une manière de mettre à l'épreuve de nouveaux paradigmes qui pourront ensuite inspirer des actions à échelle globale (nationale ou internationale). A l'instar de Shigeru Ban ou Diébédo Francis Kéré, être *architecte* aujourd'hui, c'est rendre indissociable le lien entre sensibilité du site, innovation technique et fibre sociale. De-là peut

1 RAVEREAU, André. *Le Mzab, une leçon d'architecture*. Editions : Sindbad, 1981, p.79

2 « [Coney Island, the Skyscraper, Rockefeller center and Europeans] show the progression (and subsequent decline) of Manhattan's determination to remove its territory as far from the natural as humanly possible » (nous traduisons) KOOLHAAS, Rem. *Delirious New York*. Editions : 010 Publishers, 1994, p.11

3 NOAH-HARARI, Yuval. *Sapiens A brief History of Humankind*. Editions : Signal Books, 2014. p.11

4 PICON, Antoine. *Culture numérique et architecture – Une Introduction*. Editions : Birkhauser Fr, avril 2010. p.165



émerger la réponse pertinente et pérenne à un *besoin* fort de la population locale.

Un *besoin* à long-terme pour l'école de Diébédo Francis Kéré car l'architecte refuse l'idée, alors installée dans l'inconscient collectif du village, que les enfants doivent le quitter pour s'instruire. Construire une école, c'est donc répondre à cette nécessité et renforcer le patrimoine local.

Un *besoin* à court-terme pour les maisons en rouleau de carton de Shigeru Ban car l'architecte refuse l'idée alors commune que des sinistrés ou des réfugiés aient à vivre dans des tentes fragiles. Ces maisons constituent le souhait d'une architecture digne pour tous.

En bref, que ce soit la construction d'un patrimoine ou la reconstruction dans l'urgence d'habitats, ces architectures sont nées du refus d'obéir à une ligne de conduite pré-établie et à la volonté d'expérimenter, de tenter d'apporter une solution sur-mesure à un problème spécifique.

Par ailleurs, les deux architectes travaillent à partir d'une échelle restreinte, avec une implication profonde de la communauté dans le projet : construire une école primaire avec les villageois et construire un abri pour les sinistrés avec les victimes. Devant le succès de ces expérimentations à petite échelle, l'école a été agrandie ; un collège et d'autres infrastructures publiques ont été produites de manière similaire à Gando. Il en est de même pour les *Paper-log houses* qui ont également été déployées en Turquie et Inde et qui encore aujourd'hui abritent des réfugiés.

Ainsi, en prenant part à construction, les habitants sont directement impliqués dans le projet et se l'approprient davantage. Procéder de la sorte permet de créer une architecture qui n'a pas à se poser les questions *où, quoi, comment, avec quoi ?* mais une architecture qui se les pose naturellement, tout le long du processus de conception et de production. Quant à se demander *quand ne pas construire ?* cela est directement lié à la notion de *besoin*, de *nécessité*, qui est à la fois le moteur et le point de départ du projet.

Cependant, définir ce qui est *nécessaire* (ou ne l'est pas) dépend de la subjectivité de chacun, et ce qui semblait l'être il y a quelques décennies, voire années, peut ne plus être pertinent aujourd'hui. Manhattan constitue un exemple approprié à cette subjectivité. Koolhaas écrit : « la situation du quartier des finances de Manhattan avec la rivière de chaque côté empêchant l'expansion latérale a encouragé l'audace architecturale et ingénieure pour dénicher de l'espace afin de répondre à l'immense demande d'espace de bureaux au cœur du nouveau monde»⁵. L'expansion horizontale étant impossible, il en a résulté une extrusion verticale de la ville via les gratte-ciels. Ainsi, la ville résulte directement de l'intersection entre besoin de

5 « The situation of Manhattan's financial district with the rivers on either side forbidding lateral expansion has encouraged architectural and ingenieur skill to find room aloft for the vast interests that demand office space in the heart of the New World » (nous traduisons). KOOLHAAS, Rem. *Op. Cit.* p.85

École primaire à Gando (Burkina-Faso). Diébédo Francis Kéré (2001)

Projet dans le village natal de l'architecte, alors en manque crucial d'infrastructure publique. A l'image de sa maçonnerie de briques d'argiles (ressource locale abondante) stabilisées au ciment pour une meilleure capacité portante, l'école est un mélange de tradition locale et manières modernes de construire. Il est aussi l'occasion de former de nombreux villageois à ces techniques de construction afin de créer des emplois localement et renforcer la communauté et le patrimoine.

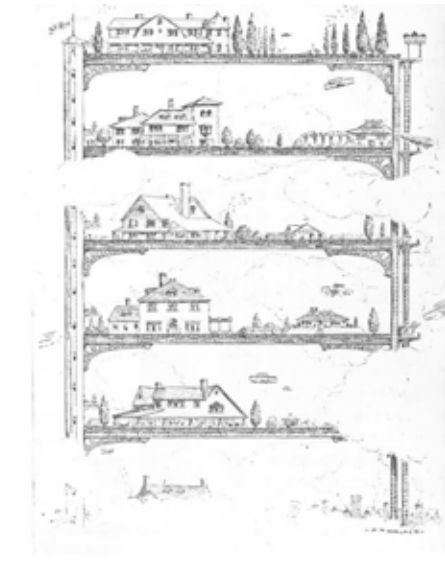
Source : Kéré architecture



Paper-log Houses à Kobe, (Japon) Shigeru Ban (1995)

Conçues pour venir en aide à des individus en besoin critique d'hébergement suite à un séisme, ces maisons sont rapidement et simplement construites par des étudiants architectes, bénévoles et la population locale. L'utilisation de matériaux destinés à être, pour la majorité, jetés (tubes de carton pour les murs, cages de bières pour étanchéifier les soubassements de la maison) permet un rapport coût de production/confort extraordinaire dans ces conditions d'urgences (moins de 2000\$ (environ 1800 €) pour une maison de 52 m²).

Source : Shigeru Ban architects



« Buy a cosy cottage in our steel constructed chose lots, less than a mile above broadway, only ten minutes by elevator. All the confort of the country with none of its disadvantage ». (Achetez un confortable habitat dans nos constructions, à moins d'un mile [environ 1,6 km, nda.] au dessus de broadway, seulement dix minutes en ascenseur. Tout le confort de la campagne sans aucun de ses inconvénients).

Source : Celestial Real Estate Company. Illustration visible dans *Delirious New York*, KOOLHAAS

construire toujours plus sur une île finie (pour loger une population grandissante) et de l'innovation technique (l'ascenseur, les progrès structurels) et sociale (berceau d'un secteur tertiaire en pleine croissance).

A l'instar des *Paper-log houses* de Shigeru Ban ou de l'école de Gando de Diébédo Francis Kéré, Manhattan est aussi l'exemple du refus d'une situation peu satisfaisante. Le refus d'être limité par des dimensions horizontales fixes et l'expérimentation à petite échelle (échelle de l'îlot) permettent d'aboutir à un type d'architecture qui s'est aujourd'hui étendue sur une grande partie de la planète.

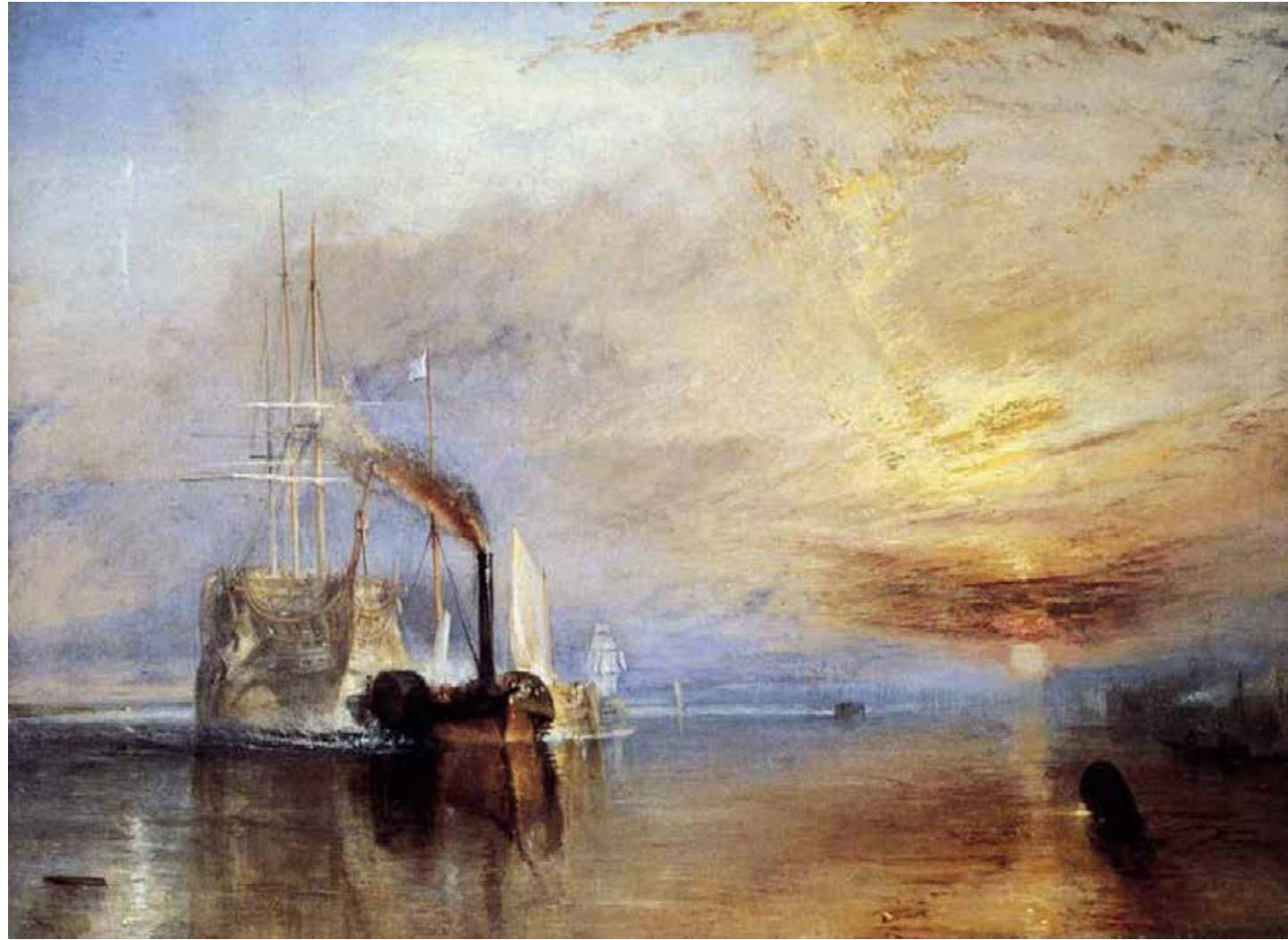
Ainsi, Manhattan, l'école de Gando ou encore les *Paper-log houses* montrent qu'un *besoin*, une *nécessité* forte couplée à une innovation technique et sociale forment la ligne de conduite à une architecture pertinente avec son époque. Plus encore, ces projets sont la preuve qu'une révolution de petite échelle peut faire effet boule de neige sur la société et influencer l'urbanisme à grande échelle.

Conscient de la situation complexe dans laquelle l'architecte se trouve aujourd'hui, les réflexions exposées dans le mémoire tenteront de s'ancrer dans cette quête d'innovation, en réaction à une conception préétablie de ce que doit être l'architecture.



Localisation de Coney island par rapport à Manhattan. Vers la fin du XIX^e siècle, grâce aux nouveaux ponts de Manhattan et à l'amélioration des moyens de transports, Coney Island devient accessible au plus grand nombre.

Source : *Delirious New York*, KOOLHASS



The Fighting Temeraire tugged to her last berth to be broken up (Le Téméraire remorqué à son dernier mouillage pour y être détruit) par J. M.W. Turner.

Source : National Gallery of Art, London (UK)

Introduction

En 1987 Gro Harlem Brundtland, alors Première Ministre de la Norvège, définit le développement durable comme « un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre les droits des générations futures »¹, et souligne ainsi les prémices d'une prise de conscience globalisée de la crise environnementale et climatique. Cependant, et particulièrement en architecture, nous pouvons nous demander si la notion de *durable* n'est pas galvaudée?

Par essence, la mission de l'architecte est de créer un abri qui protège ses habitants de l'extérieur (froid, intempéries, dangers,...). Or, pour les protéger cela sous-entend que l'abri doit rester suffisamment résistant et solide durant une période donnée de leur vie. Ainsi, l'abri est construit pour *durer* dans le temps. Si ce syllogisme peut paraître de premier abord trivial, il est intéressant de le confronter à l'architecture actuelle et à la notion de *durabilité*.

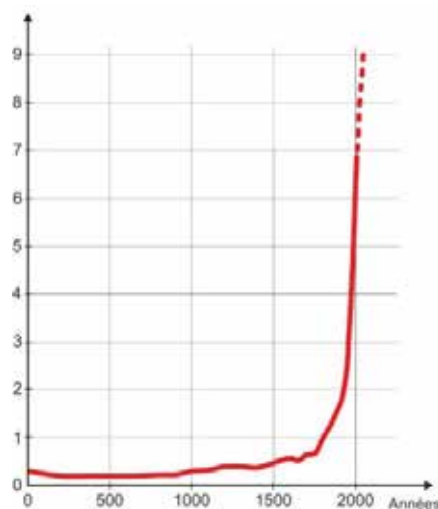
*Durable, adj. : De nature à durer longtemps, qui présente une certaine stabilité, une certaine résistance*².

L'industrie du bâtiment représente environ 40 % des émissions de CO2 des pays développés³. Dans le contexte actuel de crise environnementale, il est aisé de convenir que la dimension *durable* d'une telle architecture est discutable. Sur le long-terme, continuer de construire de la sorte paraît peu souhaitable, ni probable : la quantité de ressources s'épuise et le nombre d'habitants à loger croît continuellement (7,6 milliards d'êtres humains en 2017, vraisemblablement 8,6 milliards en 2030⁴).

La vie au sein même du bâtiment a un impact environnemental important (du fait de la consommation en eau et électricité) qui est aujourd'hui scrupuleusement étudié. Dans le cas présent il est plus intéressant encore de s'interroger sur la *durabilité* même de l'abri et de notre gestion de son obsolescence. Pour le moment, en France, l'industrie du bâtiment produit 73 % des déchets chaque année, soit environ 260 millions de tonnes⁵. Ce chiffre considérable nous éclaire partiellement sur le manque de considération en amont sur le devenir de la construction. La vie de l'abri n'est pas pensée de manière cyclique. L'abri est construit, habité puis démolé si bien qu'il en résulte dans la plupart des cas un amoncellement de déchets inertes, parfois toxiques.

Au sens de Gro Harlem Brundtland, par sa fabrication et la gestion de son cycle de vie, l'abri actuel *compromet les droits des générations futures* et de fait ne s'inscrit pas dans une démarche de durabilité telle que nous l'avons définie. Les causes responsables de cette consommation colossale en énergie et ressources sont multiples et complexes, mais sont en grande partie liées à la révolution industrielle. Résumer en quelques lignes cette période est tout sauf évident, mais afin d'être concis, nous nous focaliserons sur deux points fondamentaux que la révolution industrielle a entraînés.

D'une part, elle engendre l'allongement drastique de l'espérance de vie moyenne des Hommes (baisse de la mortalité infantile et progrès de la médecine). De fait, la population des pays industrialisés augmente, popula-



Courbe schématique de croissance de la population planétaire (en milliards) de l'an 0 à nos jours.

Source : Démographie Responsable.

¹ DESHAYES, Philippe. *Le secteur du bâtiment face aux enjeux du développement durable : logiques d'innovation et/ou problématiques du changement*, Innovations, vol. 37, no. 1, 2012, pp. 219-236

² Larousse [en ligne]

³ DESHAYES, Philippe. Op. Cit. pp. 219-236

⁴ Nations Unies. *Questions thématiques, la population* [en ligne]

⁵ CHOPPIN Julien ; DELON Nicola. *Matière grise, Matériau, Réemploi, Architecture*. Paris : Editions du Pavillon de l'Arсенal, Octobre 2014, p 37-38.

tion qu'il faut loger. D'autre part, la découverte de nouvelles manières de convertir l'énergie, de produire des biens a contribué à libérer l'Homme de sa dépendance à l'écosystème environnant⁶. En d'autres termes, la révolution industrielle permet de s'affranchir des limites imposées par notre condition humaine tout en décuplant notre espérance de vie et notre efficacité grâce aux machines.

Le développement de moyens de transports performants (locomotives puis cargos) a permis de convoier des charges importantes sur des longues distances à des prix faibles. Ce phénomène, couplé à la prolifération d'une énergie à bas coût (charbon et pétrole notamment) explique en grande partie la standardisation des techniques de construction qui s'applique dans chacun des pays industrialisés. C'est tout particulièrement le cas de l'acier puis du béton. Par leur facilité de mise en œuvre sur chantier et leurs caractéristiques structurelles, l'acier et le béton ont rapidement su devenir incontournables. Plus encore, l'association de ces deux matériaux, le béton armé, permet d'aboutir au matériau de construction ultime : résistant à la traction et à la compression, rapide à mettre en œuvre, et peu coûteux.

Enfin, la possibilité de pré-fabriquer des éléments structurels en usine et les travaux de Eugène Freyssinet sur la précontrainte imposent ce matériau composite comme une référence dans l'univers de la construction. Ses prouesses structurelles en terme de portée contribuent grandement à le rendre indispensable, encore aujourd'hui.

Mais le béton armé a aussi ses défauts. Sa production nécessite de grandes quantités de sable, qui, lié à l'eau, au ciment et agrégats permettent de créer un bloc compact. Ainsi, une fois la prise du béton faite, il est difficile d'en séparer ses constituants. Bien que les recherches sur le sujet avancent, le recyclage du béton concassé reste complexe. Il s'agit plus souvent de le transformer en agrégats pour la construction routière qui ne constitue pas en soi une réelle économie circulaire.

A une époque industrielle où nous pensions les ressources planétaires infinies, cette variable n'entrait pas en ligne de compte. Aujourd'hui, la crise écologique démontre que, même si nous sommes conscients des limites de notre monde, la manière de penser n'a pas fondamentalement évoluée depuis le début de la révolution industrielle⁷. En particulier dans le domaine de la construction avec le déploiement massif du béton armé (2/3 des constructions actuelles à l'échelle mondiale⁸). En conséquence, la demande en énergie nécessaire à la production d'acier et de ciment ne cesse de croître.

Pour le cas de l'acier, atteindre des températures de 2000°C⁹ nécessaire à sa production requiert une quantité d'énergie considérable. Nous pouvons même évaluer que l'énergie nécessaire à la production d'une coulée de 150 tonnes d'acier liquide, équivalant à la consommation électrique quotidienne d'environ 61 000 personnes, soit l'équivalent de la ville de Quimper (cf. annexe 3). Pour le cas du béton, outre la quantité d'énergie nécessaire à l'obtention de clinker (chauffer du calcaire et argile à haute température), il

⁶ NOAH-HARARI, Yuval. *Sapiens A brief History of Humankind*. Editions : Signal Books, 2014.

pp.289-298

⁷ JANCOVICI, Jean-Marc. *L'énergie - Cours des Mines 2019* [En ligne]. Disponible sur : <https://www.youtube.com/watch?v=xgy0rW0oaFI> (consulté le 29/08/2019)

⁸ Arte. *Le sable : enquête sur une disparition* ; Denis Delestrac France, 2013, 1h14m

⁹ REICHEL, Alexander ; SCHNELL, Gerald. *Featuring Steel - ressources architectures reflections*. Institut für internationale Arkitektur-Dokumentation GmbH & Co, KG, 2009, Munich. p. 112



Eugène Freyssinet. Viaducs pour l'autoroute de Caracas à La Guaira, 150m de portée, 60m de hauteur. 1951-1953.

Source : Eugène Freyssinet, *un amour sans limite*. Éditions du Linteau, 1993



Montage de la partie centrale du cintre, construite grâce à la précontrainte.



L'arc après le décoffrage.

faut aussi considérer que cette réaction chimique émet de grande quantité de CO₂. Ainsi, on peut considérer que chaque tonne de ciment produite entraîne 850kg de CO₂¹⁰. Cela est dû à l'utilisation d'énergies fossiles pour la clinkérisation (40% des émissions). Les 60% restant proviennent de la dé-carbonatation du clinker, lors de sa transformation en ciment.

Ainsi, dans le contexte actuel de crise environnementale, la question de la pérennité d'un système constructif majoritairement basé sur une utilisation de béton et d'acier se pose. Et pourtant, il faudra, selon les prévisions démographiques construire davantage encore. Fort de ce constat, nous devons revoir fondamentalement notre rapport à la conception et à la construction pour que l'architecture de demain puisse loger une population en constante croissance, selon un développement durable *qui ne compromette pas les droits des générations futures*. Au regard des faits énoncés et de l'épuisement des ressources, il s'agit désormais de se poser la question de la pertinence des techniques et matériaux employés. Nous l'avons énoncé en préface de ce mémoire, un retour inconsidéré à des techniques de constructions *vernaculaires* ou préindustrielles semble vain car non dimensionné pour loger une population en croissance rapide.

Selon Reyner Banham, « les vernaculaires – qu'ils soient architecturaux, linguistes, ou autres – sont des ensembles de coutumes, transmises par la culture, qui régissent parfois sans partage la vie des communautés qui les pratiquent [...]. La persistance durable des vernaculaires montre qu'ils [les ensembles de coutumes] conviennent en général fort bien aux peuples qui les pratiquent et à leur territoire de résidence »¹¹. Ainsi, définir une architecture vernaculaire, c'est définir le contexte social et environnemental qui l'a créée. Pour cette raison, il n'est pas possible de transposer les traditions vernaculaires d'une communauté à une autre, car plus qu'une habitude, c'est tout un mode de vie et une culture que cela impacte.

Néanmoins, loin des coutumes et traditions, les différentes typologies d'architecture vernaculaire ont mis en lumière autant de manières pertinentes d'utiliser des matériaux locaux, bruts (matériaux nécessitant peu d'énergie pour être mis en œuvre, la terre est un bon exemple), ou bio-sourcés (matériaux d'origine animale ou végétale, dont le bois, la paille, le chanvre, la laine,...). S'il ne s'agit pas de bannir l'acier et le béton, mettre en avant de telles alternatives *vernaculaires* semble être un bon point de départ pour interroger notre rapport à l'architecture.

Ainsi, orienter l'industrie de la construction vers ces matériaux *vernaculaires* passe tout d'abord par une nouvelle manière d'appréhender l'économie avec une vision à plus long terme et la nécessité d'énoncer de nouveaux paradigmes pour développer l'architecture. Encore une fois, il ne s'agit pas d'oublier les connaissances techniques contemporaines mais au contraire de les réorienter, de les détourner, de les croiser aux techniques *vernaculaires*. En effet, si le béton et l'acier ont révolutionné la manière de construire, le développement d'outils paramétriques qui permettent autant de concevoir que de produire l'architecture a aussi le potentiel de bouleverser profondément l'architecture. En effet, les progrès des technologies numériques nous permettent désormais d'envisager l'ordinateur non plus comme un *outil* mais comme un *partenaire de conception*. Les architectes et

ingénieurs ont désormais pour mission de saisir tout le potentiel du numérique afin de l'utiliser à leur avantage. Pour cela, certains laboratoires à l'instar de l'IAAC (Institute for Advanced Architecture of Catalonia) développent des recherches et forment des étudiants à ces problématiques. L'expérimentation mise en œuvre permet notamment de croiser les matériaux vernaculaires aux outils technologiques. Ces laboratoires explorent les capacités du numérique appliqué à l'architecture. Le détournement d'outils et le croisement de compétences permettent d'élaborer un processus de fabrication innovant, et font de la recherche et de l'expérimentation une source d'inspiration pour une architecture appliquée à plus grande échelle.

Il s'agira ainsi de se demander dans quelle mesure la recherche technologique appliquée au patrimoine constructif vernaculaire permet d'aboutir à une architecture pérenne, évolutive et en adéquation avec les enjeux de développement durable ?

¹⁰ CHAUVOT, Myriam. *Cap sur le ciment bas carbone* [En ligne]. Disponible sur : <https://www.lesechos.fr/industrie-services/immobilier-btp/cap-sur-le-ciment-bas-carbone-l140893> (consulté le 20/10/2019).

¹¹ Ibid. p.301



Johann Le Guillerm lors de sa représentation circassienne au Mans (Sarthe, France) de *Secret (Temps 2)* en Juin 2019. Dôme construit sans vis ni clou, uniquement par l'enchevêtrement de tasseaux de bois.

Source : Philippe Cibille

I. De l'intelligence de l'approche constructive

A. Des outils et des Hommes

Le développement de l'Homme s'est fait de concert avec l'architecture. Avant même la sédentarisation humaine, nous pouvons déjà remarquer son évolution, son adaptabilité, à travers le tout premier élément protecteur jamais conçu et fabriqué par l'Homme : le vêtement. Si, de premier abord, le vêtement peut sembler éloigné de l'architecture, il constitue en réalité l'abri le plus proche du corps. De ce fait, c'est peut-être même l'architecture la plus primaire qui soit. L'historien et auteur, Yuval Noah-Harari (1976-), relate dans "Sapiens" que, dans un premier temps, l'évolution et l'adaptation de l'homme à tous les territoires du globe sont dues en partie à sa capacité à se créer une enveloppe externe. Celle-ci permet à un corps adapté au climat Africain de résister au froid : « *Homo sapiens, whose body was adapted to living in the African savannah [...] learned to make snowshoes and effective thermal clothing composed of layers of furs and skins, sewn together tightly with the help of needles* »¹. (Homo Sapiens, dont le corps était adapté pour vivre dans la savane Africaine[...] a appris à confectionner des chaussures pour la neige et des vêtements isolants composés de couches de fourrures et peaux, fermement cousues ensemble à l'aide d'aiguilles). Le vêtement est donc un élément essentiel à l'Homme pour lui permettre de survivre dans de nouveaux environnements. Pour Ravéreau, cette capacité d'adaptation tient du génie, et caractérise pour lui l'expression de toute l'intelligence humaine : « l'Homme est le même sous toutes les latitudes et son génie est de s'adapter à chacune d'elle »². Si le propos peut être nuancé en précisant que l'emploi du terme «le même» peut dans certaines conditions être discutable (en particulier, le rapport au corps par la culture peut différer d'une région du monde à l'autre), il s'agit néanmoins de partir du présupposé que peu importe les latitudes, nos corps partagent en moyenne tous les mêmes caractéristiques de résistance physiologique. L'avis de Ravéreau est par ailleurs appuyé par Claude Lévi-Strauss : « c'est seulement depuis quelques années [avant 1955] que nous avons appris les principes physiques et physiologiques sur lesquels reposent les conceptions du vêtement et de l'habitation des Esquimaux, et comment ces principes, méconnus par nous, leurs permettent de vivre dans des conditions climatiques rigoureuses et non pas à l'accoutumance ou à une constitution exceptionnelle »³. L'ethnologue établit de manière concrète le lien de causalité entre le vêtement (et l'habitat, nous reviendrons sur ce second point plus tard) d'une part et la possibilité du développement des Hommes dans un environnement extrême d'autre part.

Ainsi, à mesure que nous avons amélioré nos techniques de confection, il nous a été possible de nous aventurer plus loin dans des régions inconnues. Plus nous nous sommes enfoncés dans des territoires hostiles, plus notre capacité à créer des vêtements adaptés à des environnements rigoureux s'est développée. « *As their thermal clothing and hunting techniques improved, Sapiens dared to venture deeper and deeper into the frozen regions. And as they moved north, their clothes, hunting strategies and other survival skills continued to improve* »⁴. (Comme ses techniques pour confectionner des vêtements et chasser se sont améliorées, Sapiens a pu s'aventurer de plus en plus loin dans les régions glacées. Plus il se rapprochait du nord, plus ses stratégies de chasse et ses techniques de survie s'amélioraient). Le fait de savoir confectionner des vêtements adaptés à l'environnement est tout

1 NOAH-HARARI, Yuval, Op. Cit. p.64

2 RAVÉREAU, André. Op. Cit. p.140

3 LEVI-STRAUSS, Claude. Op. Cit. p.461

4 NOAH-HARARI, Yuval, Op. Cit. p.64

aussi vital à l'Homme que de se nourrir.

Certains architectes, à l'instar de Ravéreau, prolongent cette pensée et considèrent que le vêtement est essentiel dans la compréhension d'un habitat, d'une architecture. En effet, dans *André Ravéreau, l'atelier du désert*, il nous est décrit toute la démarche que l'architecte et professeur impose à son étudiant lors de son arrivée à Ghardaïa dans la vallée du M'zab (Algérie). Elle consiste tout d'abord à « se rendre chez un tailleur pour se constituer une garde-robe : djellaba, gandoura, sarouel (qui facilite la station assise en tailleur). Ainsi l'introduction à l'architecture commence par la découverte du vêtement »⁵. De cette manière, les disciples de Ravéreau découvrent que le vêtement n'est pas seulement un moyen de se protéger des agressions extérieures (rayons dardant du soleil, froid des nuits dans le désert). L'habit traditionnel est aussi une manière d'aider le corps à bien réguler sa température, et même à le rafraîchir. En effet, il a été démontré que les robes Bédouines amples et sombres, superposées à un vêtement léger de coton porté à même la peau, permettent un mouvement de convection et créent un courant d'air qui aide à l'évaporation de la transpiration et rafraîchit son porteur⁶.

L'étude et la compréhension du vêtement entraînent alors les étudiants à s'interroger sur la manière dont l'habit par sa matière et par les volumes de son drapé coïncide avec l'architecture de la vallée du M'zab. C'est pour Ravéreau une leçon indispensable dont l'enseignement se transmet de manière empirique : « loin des questions de stylistique, il s'agit d'apprendre à écouter les respirations de l'espace, la cadence du pas, l'ampleur d'un mouvement, la chorégraphie des gestes, la majesté d'une démarche, la grâce d'un pli »⁷. En procédant de la sorte, l'architecte amène l'étudiant à se poser des questions fondamentales sur les bases d'une civilisation. Il n'est pas ici question de copier sans recul le modèle mozabite, mais bien de comprendre comment des générations et des générations d'habitants de la vallée du M'zab sont parvenues à l'établir.

Ainsi, nous remarquons que le vêtement se situe à la croisée de deux ensembles qui se complètent mais qui ne s'interpénètrent pas en principe. En effet, le vêtement est un système transformé (peaux, laine, fourrures cousues et assemblées) qui lui-même transforme son environnement (chaleur, protection solaire) pour l'adapter à l'Homme. Le vêtement s'illustre donc comme l'architecture qui permet à l'Homme de survivre dans son environnement et comme l'outil qui lui permet d'évoluer et d'agir sur ce dernier. Cette dualité nous amène à définir précisément la notion d'outil, dont découle toute architecture.

*Outil, [n.m] : Objet fabriqué, utilisé manuellement ou sur une machine pour réaliser une opération déterminée*⁸.

L'élément essentiel, au sens propre du terme, de cette définition est le mot *manuellement*. En effet, la *main* est *l'outil* qui nous permet d'utiliser les outils. S'il s'agit du plus rudimentaire de tous, c'est aussi le plus efficace et performant. Sans la main, il est bien probable que jamais nous n'ayons été en mesure d'évoluer de la sorte : « *the more things these hands could do, the more successful their owners were, so evolutionary pressure brought about*

5 POTTIER, Philippe. André Ravéreau, l'atelier du désert. Editions : Parenthèses. Marseille. 2003. p.61

6 SHKOLNIK, A.; TAYLOR, C. R.; FINCH, V.; BORUT, A., Why do Bedouins wear black robes in hot deserts? Nature, Vol. 283, pp. 373-374, 1980.

7 POTTIER, Philippe. Op. Cit. p.61

8 Larousse [en ligne]. Consulté le 05/11/2019

an increasing concentration of nerves and finely tuned muscles in the palms and fingers »⁹. (Plus les mains savent faire des choses, mieux leurs propriétaires s'en sortent. La pression de l'évolution a apporté une concentration de nerfs et de muscles fermes dans les paumes et les doigts). Cette concentration de nerfs et de muscles dans nos paumes et nos doigts nous a, entre autres, permis de développer tout un artisanat technique basé sur la préhension. Le philosophe américain Richard Sennett (1943-) pense même que notre capacité préhensile constitue un ensemble de « mouvements dans lesquels le corps anticipe et agit avant de recevoir des données des sens »¹⁰. Ainsi, plus qu'une *révolution cognitive* pour reprendre le concept anthropologique établi au chapitre I, c'est aussi une véritable *révolution manuelle* qui s'est opérée.

Pour Sennett, la main dispose de sa propre intelligence. Une intelligence pratique qui nous permet d'appréhender au mieux l'environnement, les matériaux, les objets qui nous entourent. Cela contredit une certaine conception de la société actuelle qui considère que « le théoricien vaudrait mieux que l'artisan parce que les idées durent »¹¹. La matière serait plus fragile que l'idée. Or, par sa *capacité préhensile*, la main de l'artisan est un moyen de réfléchir sur son environnement, un outil pour comprendre et anticiper afin d'agir au mieux sur le réel. Le couple tête/main est donc intimement lié. Dans certain cas, la main surpasse même la tête. A travers la pratique et la répétition d'un même geste, une routine s'installe. La main d'un artisan expérimenté n'a plus besoin de la tête pour agir. Elle anticipe les réactions du cerveau. Pour Sennett, la répétition ne constitue pas un asservissement mais au contraire un moyen de faire de la main l'*outil parfait*. A propos d'une souffleuse de verre, le philosophe écrit qu'elle « dut acquérir une conscience plus aiguë de son corps en rapport avec le liquide visqueux, comme s'il y avait une continuité entre la chair et le verre »¹². Par la pratique intensive du métier, l'artisan a développé un tel savoir-faire sur le travail du verre qu'elle ne fait plus qu'un avec la matière qu'elle manipule. Loin d'être asservissant, la routine procure au contraire du plaisir chez l'artisan vertueux : « la gratification émotionnelle réside dans l'expérience même de la répétition »¹³.

Ce dernier point nous pose une question essentielle sur le lien entre outil et Homme. Si Sennett fait l'éloge de la routine, l'exemple de l'ouvrier industriel nuance son propos. En effet, l'artisan comme l'ouvrier travaillent de leurs mains sur une tâche répétitive. Le premier intervient sur les différentes étapes de l'élaboration du produit fini, lorsque le second n'est, généralement, qu'un maillon de la chaîne de production. Son apport individuel correspond à une partie infime du produit final. Il est dans ce cas difficile de parler de *gratification émotionnelle* tant la répétition de sa tâche manque de concret et empêche l'ouvrier de développer un réel savoir-faire. La suppression d'emploi sur les chaînes de production suite au développement de technologies est la preuve de la faible valeur ajoutée humaine dans l'exécution de tâches industrielles. Quelle place occupe l'Homme dans une société où l'outil est capable d'agir par lui-même devient alors une question primordiale. Le sujet est vaste et nous tenterons d'y apporter une réponse dans le chapitre suivant consacré à la paramétrisation de l'architecture.

9 NOAH-HARARI, Yuval, Op. Cit. p.15

10 SENNETT, Richard. *Ce que sait la main. La culture de l'artisanat*. Paris, Albin Michel, 2010. p.211

11 *Idem*, p.172

12 *Idem*, p.237

13 *Idem*, p.239



Pour revenir au cas de l'artisan, nous pouvons d'ores et déjà remarquer que la routine est aussi une source d'innovation. Une innovation qui n'est pas accessible à la machine. En effet, Sennett affirme que la routine permet à l'artisan d'accéder à la *conscience matérielle*. Par son biais, ce dernier est en mesure d'agir sur son environnement et la matière qui l'entoure. Il peut ainsi se l'approprier de manière extrêmement personnelle et développer un savoir-faire pointu. La *conscience matérielle* apporte donc à l'objet fini une authenticité, une trace de la main propre à chaque artisan, une irrégularité, que les machines ne sont pas en mesure de reproduire.

Plus concrètement, la capacité d'innovation de l'artisan naît de l'association de deux idées différentes et qui n'ont de premier abord rien en commun. L'artisan capable de détourner un outil, un savoir-faire, un matériau, prétend à l'innovation. Pour Sennett, cela n'est accessible qu'à une personne ayant suffisamment d'expérience « dans la technique du métier ». S'ouvre alors à cette personne « le sentiment du possible ». Sentiment seulement car, dans l'état actuel de son art, il ne peut se réaliser pleinement. Ce sentiment « s'enracine dans la frustration née des limites d'un outil ou provoquée par ses possibilités inexplorées »¹⁴.

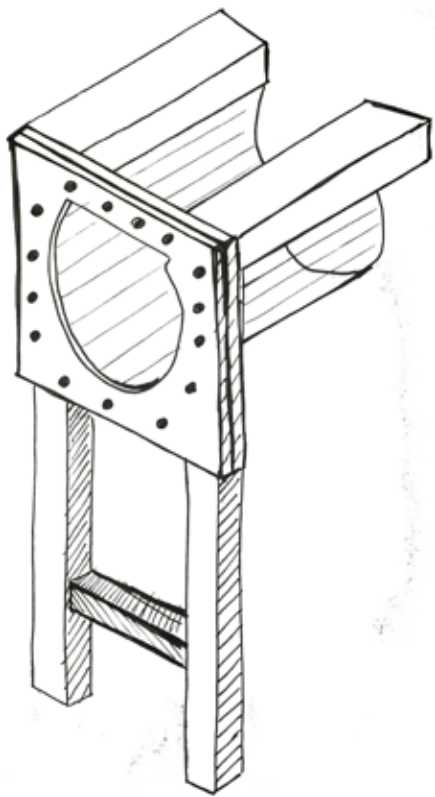
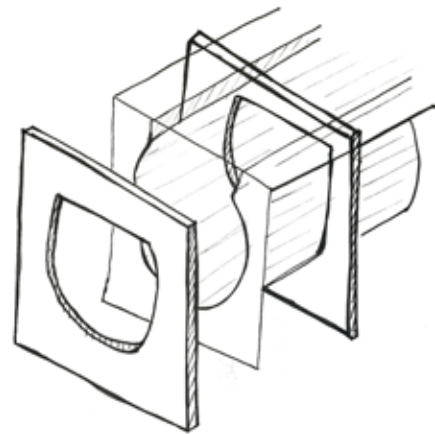
Afin de pouvoir pleinement se réaliser, l'artisan passe donc par quatre étapes qui constituent ce que Sennett appelle le *saut intuitif*. La première étape est le *reformatage* : l'artisan détourne l'usage d'un outil ou d'une pratique volontairement ou par inadvertance. Vient ensuite l'*adjacence* : l'artisan établit un parallèle entre deux domaines différents. Très similaire à la sérendipité, la conséquence directe de l'*adjacence* est la *surprise*. Elle se manifeste comme la découverte inattendue d'une divergence. Enfin la *gravité* conclut le processus : l'artisan réalise que tous les problèmes n'ont pas été résolus par le *saut intuitif*. Néanmoins, de cette séquence résulte une création, une innovation technique ou esthétique dont il peut tirer profit.

Le projet Bomnong L'or à Sihanoukville au Cambodge est l'illustration parfaite de notre capacité à établir des parallèles, des associations entre deux idées qui peuvent paraître de premier abord complètement décorréées. Dans un contexte de guerre civile durant les dernières décennies, la couverture forestière du Cambodge a drastiquement diminué. Afin d'utiliser la quantité de bois la plus faible possible, le bureau d'étude Structure Mode et l'agence d'architecture Orkidstudio abordent le problème selon le *saut intuitif* de Sennett.

Ci-dessus. Projet Bomnong L'or (Cambodge) par l'agence d'architecture Orkidstudio et le bureau d'étude Structure Mode. Les poutres à section semi circulaire témoignent de l'utilisation d'un coffrage peu courant.

Source : Lyndsey Perth

14 SENNETT, Richard. Op. Cit. p.286



Le manque de bois oblige à créer un autre outil de coffrage pour couler le béton de la structure. Le choix se porte sur le tissu qui, de ce fait, est détourné de sa fonction première, c'est le *reformatage*. Le bureau d'étude teste ensuite la résistance du tissu sous la charge des armatures et du béton. En d'autres termes, les ingénieurs étudient la pertinence de détourner le tissu en coffrage de poutres. Un parallèle s'effectue donc entre deux domaines différents, le textile et le gros-œuvre : c'est ce que Sennett appelle l'*adjacence*. Les tests réalisés en laboratoires sont concluants : le tissu choisi est capable de servir de coffrage. C'est ici la *surprise*, selon les termes du philosophe. Enfin il est tout de même nécessaire d'avoir recours à des éléments de bois (en plus faible quantité, certes) qui servent d'échafaudages pour maintenir en place le tissu coffrant¹⁵. Il s'agit ici de la *gravité* de Sennett. La solution au problème du manque de bois n'est pas absolue, et même s'il est utilisé dans des quantités moindres, architectes et ingénieurs sont contraints d'avoir recours à ce matériau. Néanmoins, procéder de la sorte offre une alternative économique très intéressante et découle sur la création d'un esthétisme unique de structure.

La contrainte des matériaux (économie de bois) sous-jacente au projet de Structure Mode et d'Orkidstudio, nous amène à réfléchir à la question du détournement dans le projet de construction. Le détournement du textile comme outil de coffrage offre plusieurs prismes de lecture. Tout d'abord, cela fait apparaître une forme d'innovation dans le projet. Nous l'avons dit, l'esthétique cylindrique des poutres est novatrice et découle directement du processus créatif. Par ailleurs, l'innovation est aussi économique. Le détournement du textile démontre une manière d'optimiser la ressource en bois, en ne l'utilisant seulement dans les conditions où le textile est inutile. Ainsi, du détournement de la matière naît une forme d'optimisation. Utiliser le textile en flexion pour soutenir le béton frais et l'acier. Utiliser le bois en compression pour soutenir le coffrage des poutres. En d'autres termes, l'emploi des matériaux a été fait de manière à optimiser les caractéristiques mécaniques de chacun pour les faire travailler au mieux. Cependant, toute l'intelligence constructive mise en œuvre ici nécessite le recours à des structures provisoires de coffrage, dont certains architectes ont réussi à se passer, jusqu'à atteindre un niveau d'optimisation exemplaire.

B. Détournement et optimisation

*Optimum, n.m. : État, degré de développement de quelque chose jugé le plus favorable au regard de circonstances données.*¹⁶

Dans *l'architecture de l'environnement bien tempéré*, Reyner Banham écrit : « le dôme de neige qu'est l'igloo des Esquimaux demeure un modèle d'ingéniosité environnementale et de sophistication géométrique ». S'il n'emploie pas le mot d'optimum, il désigne par sophistication l'« utilisation astucieuse et intelligente des équipements et des ressources disponibles »¹⁷. *L'astuce* et *l'intelligence*, pour reprendre le champ lexical employé par Banham, sont deux points fondamentaux pour traiter de l'optimisation qui caractérise la construction des igloos. En effet, s'il est une structure, une construction pour laquelle la définition d'optimum prend tout son sens,

¹⁵ Structure Mode, Fabric formwork for reinforced concrete school buildings [en ligne] <https://www.structuremode.com/projects/fabric-formwork-community-centre/> Consulté le 24/10/2019

¹⁶ Dictionnaire Larousse [en ligne]

¹⁷ BANHAM, Reyner. Op. Cit. p.299

c'est celle-ci.

En 1938, l'ethnologue Suisse Jean Gabus, mène une expédition solitaire de 18 mois dans la baie d'Hudson (Canada) pour observer les « Esquimaux-Caribous ». Il rapporte dans ses écrits et dessins que, dans des conditions climatiques extrêmes (températures de - 45°C à - 50°C en hiver), le choix des matériaux de construction est peu étendu. Aussi les autochtones ont dû faire preuve au fil des générations de créativité et d'adaptation pour perdurer.

La neige, qui est le matériau le plus abondant, a su être détournée afin de devenir un élément structurel de l'habitat traditionnel esquimau, l'igloo. Pour le bâtir, le constructeur cherche une neige résistante, puis « dégage une face perpendiculaire qui lui donnera la hauteur de son bloc [...] il ouvre deux tranchées parallèles, très étroites qui vont dégager les côtés de ses blocs et qui, à un mètre d'intervalle, fendent la neige sur une longueur de trois à quatre mètres ». L'esquimau libère ensuite le bloc à l'aide d'un couteau qui, grâce à son savoir-faire, est « régulier comme une pierre de taille »¹⁸.

L'ethnologue précise que la neige qui est située dans les Alpes ne se trouve pas sous la même forme que celle du Barreland, utilisée par les Esquimaux : « Elle [la neige des Alpes] peut être très résistante en surface parce qu'elle a gelé, mais il suffit de casser cette croûte glacée pour trouver une neige molle ou poudreuse ». C'est en revanche le contraire de la neige du Barreland, qui sous la pression du vent « résiste sous les pieds comme de la glace, et cette résistance se ferait sentir aussi bien à dix ou cinquante centimètres de profondeur qu'en surface »¹⁹. Il convient alors de noter que le type d'architecture à laquelle Gabus veut nous introduire n'est réalisable que dans les régions du monde où les conditions sont réunies pour produire un tel matériau. En cela, l'igloo est un exemple d'architecture endémique. Par sa manière locale de s'approvisionner en matériau de construction, il est un optimum par l'économie de moyens mis en œuvre.

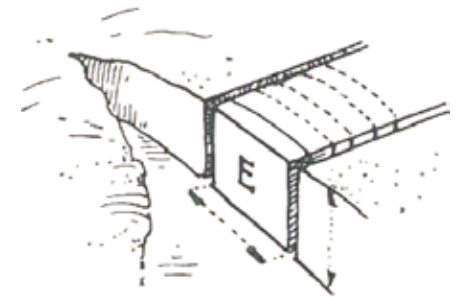
Les blocs extraits du sol délimitent ensuite le périmètre de la construction. A l'intérieur de la zone, le bâtisseur prélève les blocs suivants nécessaires à ériger le dôme de l'igloo. « Comme les blocs de neige sont enlevés à l'intérieur de l'igloo, le fond de celui-ci s'abaisse au fur et à mesure que les parois s'élèvent »²⁰.

Par ailleurs, les Esquimaux qui connaissent la vertu isolante de l'air, érigent une seconde paroi aux deux tiers de la hauteur de la première. L'écart d'une vingtaine de centimètres entre les deux parois est ensuite rempli de neige. « La couche d'air ainsi maintenue dans la double paroi entre les petits morceaux de neige durcie est donc utilisée comme isolant selon

¹⁸ GABUS Jean, extrait de Vie et coutumes des Esquimaux Caribous, 1943. Consulté pendant l'exposition Ichoumani, Musée Ethnographique de Neuchâtel (MEN), juin 2019

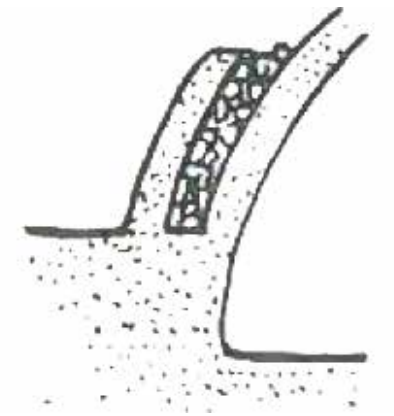
¹⁹ GABUS, Jean, Op. Cit. Consulté pendant l'exposition Ichoumani

²⁰ Ibid.



Création de blocs nécessaires à la construction de l'igloo.

Source : Jean Gabus, Vie et coutumes des Esquimaux Caribous, 1943

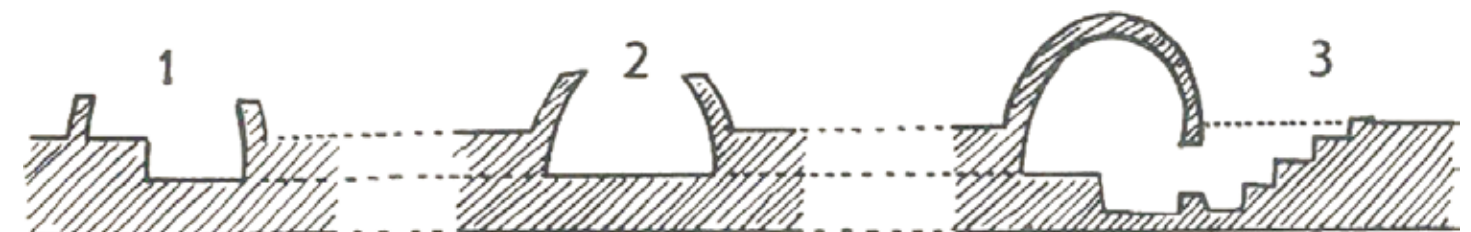


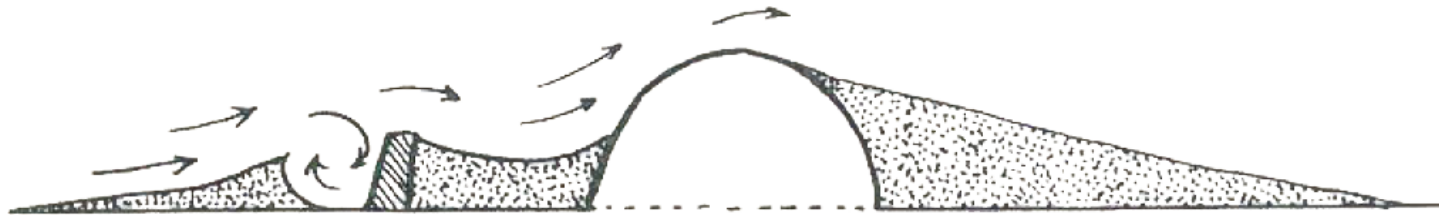
Seconde paroi érigée au 2/3 de la première.

Source : Jean Gabus, Vie et coutumes des Esquimaux Caribous, 1943.

Ci-dessous. Les coupes schématiques montrent le fond du dôme s'abaisser à mesure que l'architecte-esquimau érige la structure.

Source : Jean Gabus, Vie et coutumes des Esquimaux Caribous, 1943.





Ci-dessous : Coupe schématique de l'igloo et de la menée formée par la neige et le vent.

Source : Jean Gabus, Vie et coutumes des Esquimaux Cariboux, 1943.

les principes de nos architectes modernes »²¹.

Afin d'améliorer davantage encore les performances thermiques des igloos, l'Esquimau tente dans la mesure du possible de l'enfourer sous la neige, « mais quand l'endroit ne s'y prête pas, une muraille élevée à une dizaine de mètres de l'igloo, dans le sens opposé au vent du Nord qui est le plus régulier en hiver, va former une menée qui recouvrira une partie de l'igloo »²².

Grâce à ces techniques de construction et à l'intelligence d'implantation, Gabus affirme que « la température dans un igloo de dimensions moyennes se maintient sans chauffer entre dix et quinze degrés sous zéro »²³. Cela permet donc, grâce à une intelligence constructive et structurelle, de gagner près de 40°C par rapport à l'extérieur dans les moments les plus froids.

C'est dans des environnements particulièrement rigoureux que l'optimisation dans la construction se dévoile au plus grand jour. Dans un contexte tout aussi extrême, mais pour des températures très élevées cette fois, l'architecture du M'zab démontre elle aussi toute l'étendue de son intelligence constructive et sa capacité d'adaptation. L'architecte André Ravéreau, la décrit comme une manière de construire où le bon sens est poussé à son paroxysme. Tout comme le dôme est la structure de l'igloo - pour l'optimum qui résulte du rapport volume / quantité de matière nécessaire - la structure des constructions du M'zab est elle aussi déterminée par un optimum constructif.

En effet, « l'arc est à l'extrême limite des moyens, de la matière et du temps »²⁴. Pour le bâtir, les architectes mozabites utilisent les matériaux locaux disponibles. Tout comme pour les Esquimaux, les matières fibreuses sont rares dans le contexte désertique du climat saharien. Il faut composer la structure à l'aide de :

- « Cailloux : sans taille, ni outil, ni choix (à l'origine, il n'y avait pas d'extraction, le ramassage s'effectuait à proximité des chantiers) »²⁵.

- « Plâtre : gisements de gypse abondant sur le site, prise rapide, maniement sans outil, à main nue »²⁶. La construction en plâtre tire parti des conditions climatiques avantageuses du M'zab. La chaleur sèche permet au plâtre de sécher rapidement et donc améliore le temps de mise en œuvre.

- « Nervures de palmiers : matière sans valeur, on est obligé de tailler chaque année ces djerid du palmier, abondantes, pose sans façonnage ni assemblage »²⁷.

Les trois éléments constructifs cités constituent les matériaux

21 GABUS, Jean, Op. Cit. Consulté pendant l'exposition Ichoumani

22 Ibid.

23 Ibid.

24 RAVÉREAU, André. Op. Cit. p.36

25 Ibid.

26 Ibid.

27 Ibid.

primaires des constructions du M'zab en raison de leur disponibilité immédiate et en grande quantité. A l'instar de la neige pour les igloos, les mozabites ont détourné la surface sur laquelle ils marchent en matériau de construction. Du fait de son abondance et de sa proximité au chantier, il est très rapide de récolter et mettre en œuvre ces matériaux. Cela constitue l'extrême limite de temps évoquée par Ravéreau. De plus, comme chez les Esquimaux, un faible niveau d'outillage est requis. La plupart des tâches de collecte s'effectue à « main nue », seule la taille des feuilles de palmiers requiert un élément tranchant. Il en est de même pour la mise en œuvre de la structure mozabite : l'assemblage entre le plâtre, les cailloux et les nervures de palmiers s'effectue à la main, sans assemblage spécifique. En cela, l'architecture du M'zab est à l'extrême limite de moyens.

En ce qui concerne l'extrême limite de matière dont fait état André Ravéreau, il convient d'explicitier cette dernière notion. Pour chacun des trois matériaux nécessaires à l'architecture du M'zab (cailloux, plâtre et nervures de palmiers), Ravéreau précise que tous viennent en abondance. Or, l'abondance ne force pas à la frugalité. Aussi, il conviendrait peut-être de nuancer l'extrême limite de matière. A minima, préciser qu'il n'est pas possible de la considérer comme une économie, de la même manière que nous avons considéré économique le temps de collecte et de mise en œuvre des matériaux de l'arc, avec des outils restreints. La notion d'extrême limite de matière est ici à comprendre non pas comme une économie de matériaux, mais d'avantage comme la combinaison optimale de matière. Retirer un des trois matériaux de ce triptyque constructif, c'est provoquer la ruine de l'arc. Si l'assemblage des cailloux au plâtre est indispensable pour la résistance à la compression, les nervures de palmiers sont, elles, primordiales pour renforcer la structure à la traction. Bien qu'il s'agisse d'arcs, on ne peut pas considérer le problème comme un cas d'école avec une hypothèse de moment fléchissant nul. Aussi, dans un contexte réel soumis à des effets de dilatation de la matière, et complexifié par une symétrie approximative des arcs du M'zab, les nervures de palmiers sont indispensables pour reprendre les éventuels efforts de traction. Plus encore, ces nervures constituent des fibres dont l'importance est multiple pour la structure²⁸ :

1) Les fibres empêchent « la fissuration au séchage en répartissant les tensions dues au retrait de l'argile dans toute la masse du matériau ».

2) Les fibres permettent un séchage plus rapide par le « drainage de l'humidité vers l'extérieur par les canaux des fibres ». A l'inverse, l'absorption d'eau est accrue en présence de fibres.

3) Les fibres diminuent de la masse volumique du matériau, donc diminution de la masse totale de la structure.

4) Les fibres permettent d'« augmenter la résistance à la traction ; sans doute le plus grand intérêt des fibres ».

De cette manière, il est possible de réduire la liste des matériaux de construction utilisés au choix le plus rudimentaire possible en associant les qualités intrinsèques de chacun. En cela, la construction est à l'extrême limite de matière et l'architecture du M'zab démontre être un modèle d'optimisation.

L'idée que l'association ingénieuse et réfléchie d'un minimum de

28 Houben, Hugo ; Guillaud, Hubert. CRATerre - Traité de construction en terre. Editions Parenthèses. Marseille. 2006. p.88



Ci-dessus (gauche) : Arcs du M'zab

Source : Manuelle Roche

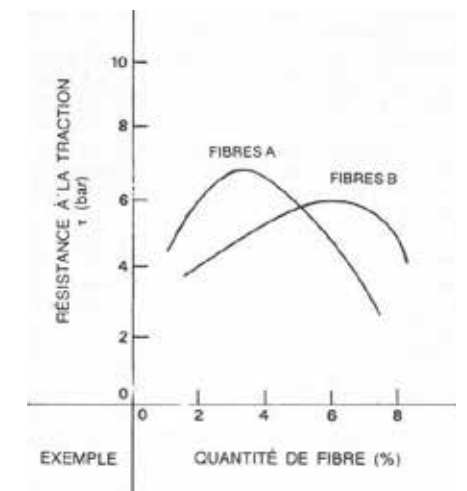
Ci-dessus (droite) : Schéma du parcours des forces dans un arc.

Source : dessin personnel



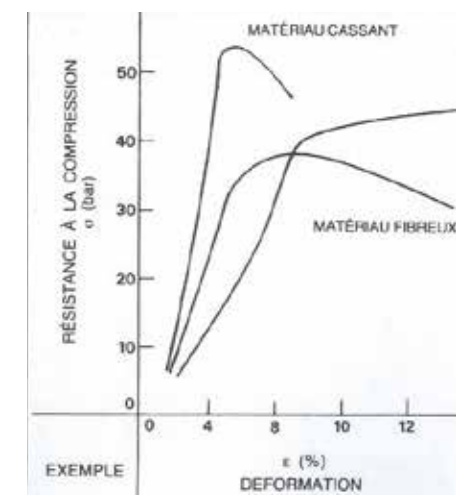
En Algérie, dans les terres, à proximité du désert du Sahara se trouve la vallée du M'zab. Chaque construction est bordée d'arches, qui jouent un rôle tant structurel que climatique, et par conséquent définissent une esthétique vernaculaire.

Source : Manuelle Roche



Résistance à la traction, optimale pour une quantité précise de fibres.

Source : CRATerre - Traité de construction en terre



Graphique schématique montrant l'impact de l'ajout de fibres dans les structures en terre

Source : CRATerre - Traité de construction en terre

matériaux entre eux produit un résultat maximal, est particulièrement satisfaisante pour la question de l'optimisation. Si nous avons pour le moment évoqué cela dans la mise en œuvre de l'architecture, il faut aussi réaliser que la collecte des matériaux peut elle aussi s'optimiser de la sorte. Dans les pierres sauvages, Fernand Pouillon relate la vie d'un moine bâtisseur au XIII^e siècle. En raison de moyens humains et économiques limités, les moines affectés aux carrières de pierres devaient redoubler d'ingéniosité pour être efficaces et dégager les blocs nécessaires à la construction. L'une de ses techniques se base sur les caractéristiques intrinsèques des différents outils dont disposent les moines : la pierre, le bois et l'eau. La pierre se casse nette lorsqu'elle est tendue, tandis que le bois humide gonfle. « Dans des trous arrondis de deux pouces sur quatre de profondeur préparés et alignés sur les futures arêtes du bloc, espacés de moins d'un pied, nous avons enfoncé des rondins de chêne très secs, aussi ajustés que la forme encore trop irrégulière des trous le permettait. Ensuite, à l'aide d'une goulotte de terre argileuse dirigée depuis une source à faible débit, à cent pas de la carrière, un mince filet d'eau arrive sur le banc, repart en rigoles ou minuscules cascades. L'eau fait son travail, le bois augmente de volume et le bloc se sépare nettement du banc d'un seul coup »²⁹.

Ainsi, à travers la collecte des matériaux, les moyen de les mettre en œuvre, de les détourner de leur fonction primaire, de les associer les uns aux autres avec ingéniosité, l'optimisation dans l'architecture peut prendre de multiples formes. En conséquence, nous devons être d'autant plus vigilants lorsqu'il s'agit de généraliser des techniques constructives d'un coin du globe à l'autre. Du point de vue de l'optimisation, ces solutions sont rarement capables d'autant de pertinence que les architectures *vernaculaires*. Généraliser, mondialiser une architecture endémique d'un contexte à l'autre entraîne nécessairement une perte de pertinence et nécessite l'apport d'énergie et/ou de matière extérieure pour atteindre un confort comparable.

En Europe du Nord, les ouvertures percées sont grandes pour permettre à la lumière d'entrer dans le bâtiment. Pour Ravéreau, nous avons tendance à confondre la fenêtre pour son apport de lumière et la possibilité de vision qu'elle engendre. « Or, ce regard n'est qu'une résultante ». A l'inverse au M'zab, la fenêtre est davantage un moyen de ventilation ; « la lumière nécessaire à l'abri étant prise en son cœur ». De fait les fenêtres construites dans cette zone géographique sont étroites pour permettre « ventilation et vision »³⁰. L'adaptation de l'architecture au climat local est une preuve de l'intelligence de l'approche constructive, ou du moins de sa pertinence à répondre à un problème donné en proposant une solution optimale. De la même manière, l'absence de dormant sur les menuiseries des portes de la région nous amène à réfléchir sur leur véritable fonction. En effet, sous un climat sec et chaud, la porte doit surtout servir d'écran et non d'étanchéité. Il s'agit au contraire de favoriser les mouvements d'airs³¹.

Pour cette raison, Ravéreau se montre critique envers la posture du Corbusier qui importe la baie vitrée partout dans le monde, et en particulier dans les zones désertiques : « quand il s'est aperçu que la lumière était excessive en Algérie, Le Corbusier a inventé le brise-soleil comme palliatif » quand il aurait pu simplement poursuivre « une tradition locale séculaire,

ouvrir une fenêtre plus petite »³².

Enfin, pour conclure sur le lien entre le détournement et optimisation, nous pouvons souligner qu'à travers le prisme de l'optimisation, il a été possible de comparer deux architectures qui paraissent complètement déconnectées l'une de l'autre, l'une conçue pour un climat polaire, l'autre pour un climat saharien.

Pourtant, en prenant du recul, nous réalisons que le point commun et la genèse de ces deux architectures reposent sur l'aspect désertique de ces régions. Le matériau alors utilisé, le seul disponible en abondance, est celui sur lequel les Hommes marchent : la neige pour les esquimaux de la baie d'Hudson, la terre pour les mozabites de la vallée du M'zab. Ainsi, c'est à travers le détournement du seul matériau disponible en grande quantité que la création d'une architecture vernaculaire et en un sens innovante a pu avoir lieu.

Plus encore, l'apport théorique de la neige dans l'architecture esquimaude nous a été essentiel pour donner du relief à l'étude de l'architecture de terre du M'zab. Néanmoins, pour des raisons de disponibilité géographique et pour renforcer le parallélisme entre le mémoire et le projet du diplôme, nous nous focaliserons dans la sous partie suivante uniquement sur la terre comme matériau de construction.

C. La matérialité comme esquisse : construire avec la terre crue

Si l'architecture du M'zab est une manière d'utiliser la terre pour construire, ce matériau de construction est utilisé depuis des millénaires sur tous les continents. Comme le montre la frise présentée à la double-page suivante, la terre crue est un matériau disponible localement et dans de nombreuses zones de la planète. De fait, il est possible de travailler ce matériau brut et peu transformé de diverses manières. Nous pouvons en distinguer cinq grandes familles qui sont : le pisé, le bloc comprimé, l'adobe, la bauge, et le torchis.

Nous détaillerons davantage ces trois premières familles qui sont, de nos jours, les plus couramment utilisées³³. Néanmoins, pour permettre une meilleure compréhension de la frise, nous pouvons d'ores et déjà situer le pisé et le bloc comprimé dans la catégorie des terres compactées. L'adobe est une terre moulée tandis que la bauge consiste à empiler des boules de terre les unes sur les autres. Enfin, le torchis consiste à hourder une structure en bois de plusieurs couches de terre³⁴.

La fragilité du matériau face aux intempéries complique les chances de retrouver les signes d'architectures en terre, mais les archéologues s'accordent à dire que des traces remontent à 10 000 ans avant notre ère. A mesure que nous nous approchons du temps présent, le nombre de vestiges augmente et nous pouvons obtenir des informations plus précises sur la diversité de mise en œuvre et de techniques, selon les régions du monde.

Néanmoins, les études scientifiques sur le matériau sont relative-

29 POUILLON, Fernand. *Les pierres sauvages*. Éditions du Seuil. France, Avril 2008. p.38

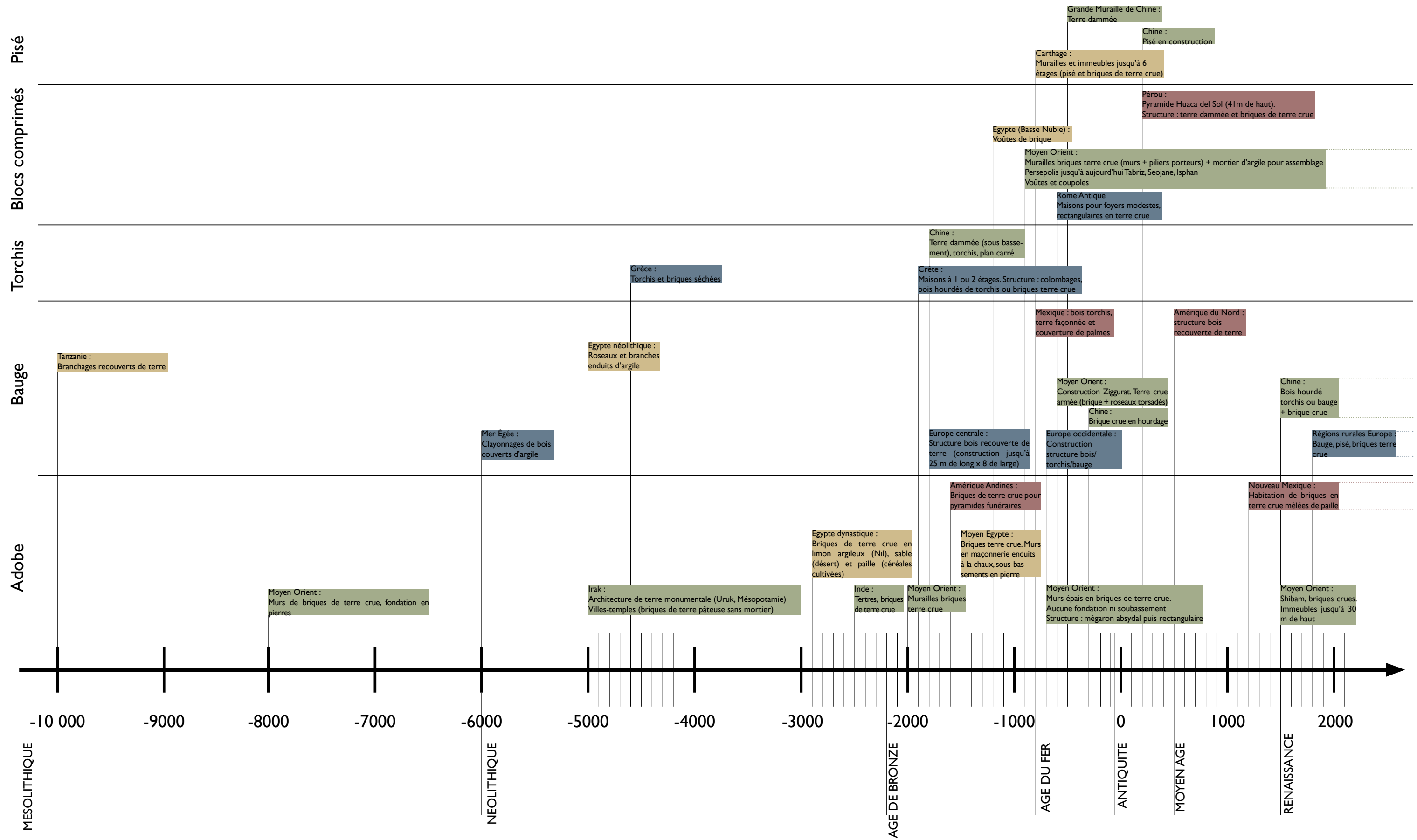
30 RAVÉREAU, André. Op.Cit. pp.146-148

31 Ibid.

32 RAVÉREAU, André. Op.Cit. pp.146-148

33 HOUBEN, H., GUILLAUD, H. *CRATerre - Traité de construction en terre*. Editions parenthèses. Marseille, 2006. pp.14

34 *Idem*



Evolution au fil des siècles et à l'échelle planétaire de la construction en terre

Les informations compilées dans la frise proviennent de : Houben, H., Guillaud, H. *CRAtterre - Traité de construction en terre*. Editions Parenthèses. Marseille, 2006. pp.14-25

ment récentes. En effet, il faut attendre en France les années 1980 pour que coïncident les progrès de l'archéologie et la découverte d'un important patrimoine de terre crue oublié³⁵. Cette période marque aussi la naissance du laboratoire de recherche CRAterre à Grenoble (1979) et une exposition au centre Pompidou *Architectures en Terre*³⁶ parachevée d'installer le matériau de construction terre comme une piste sérieuse de réflexion.

Depuis, sous l'impulsion de laboratoires, dont CRAterre ou l'Institut for Advanced Architecture of Catalonia (IAAC) dont nous parlerons plus en détail dans le chapitre suivant, différentes expériences ont été menées et nous permettent désormais de connaître de manière précise les caractéristiques intrinsèques du matériau terre.

En particulier, nous pouvons aujourd'hui recenser 3 techniques de construction en terre dont les connaissances scientifiques et technologiques ont atteint un haut degré d'expertise.

- L'adobe : consiste à mouler une brique à partir d'une terre malléable, parfois mélangée avec de la paille. Squelette granulaire : argile, sable, granulats jusqu'à 2 mm de diamètre environ³⁷.

- Le pisé : consiste à comprimer la terre entre des banches, couche par couche, avec un pilon. Squelette granulaire : argile, sable, granulats jusqu'à 20 mm de diamètre environ³⁸.

- Le bloc de terre comprimé (BTC) : consiste à comprimer un bloc de terre dans un moule avec un pilon. Squelette granulaire : argile, sable, granulats jusqu'à 10 mm de diamètre environ³⁹.

La terre crue non stabilisée a une résistance à la compression qui varie selon les modes de mise en œuvre et les méthodes de stabilisation. Nous avons les valeurs de référence⁴⁰ compilées dans le tableau ci-dessous. Celui-ci détermine l'épaisseur nécessaire en pied d'un mur soumis à une charge de 1MPa (nous nous plaçons dans le cas hypothétique où la charge est parfaitement verticale et centrée, et n'engendre aucun flambement du mur). A noter que ce calcul est pure vue de l'esprit et qu'un voile de béton de 4 cm d'épaisseur subirait dans la réalité un flambement important au moindre excentrement de la charge. Ce tableau a, avant tout, une valeur indicative et permet de mettre en avant la résistance à la compression des matériaux les uns par rapport aux autres. Le détail des calculs qui ont permis l'obtention du tableau est donné en annexe 4.

35 DE CHAZELLES, C. Témoignages croisés sur les constructions antiques en terre crue : textes latins et données archéologiques

36 LA BARDONNIE, M. Terre de Babel, Le Monde 30 octobre 1981 [En ligne] https://www.lemonde.fr/archives/article/1981/10/30/une-exposition-au-centre-georges-pompidou-terre-de-babel_3039791_1819218.html

37 HOUBEN, H., GUILLAUD, H. *Op. Cit.* p.118

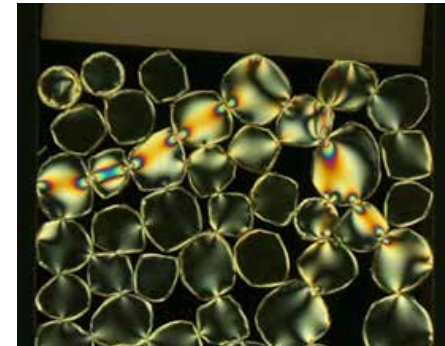
38 *Ibid.* p. 116

39 *Ibid.* p.120

40 HOUBEN, H., GUILLAUD, H. *Op. Cit.* pp. 148-149

Sous une lumière polarisée, les grains «photo-élastiques» révèlent le parcours des forces qui les traversent suite à la compression du système.

Source : Grains de bâtisseurs



Ci-dessous : Épaisseur nécessaire en pied d'un mur soumis à une charge de 1MPa.

Valeurs numériques initiales tirées de : HOUBEN, H., GUILLAUD, H. *CRAterre - Traité de construction en terre*. Editions Parenthèses. Marseille, 2006

Matériau	Masse Vol. kg/m ³	Rc MPa	Charge MPa	H mur m	L mur m	e mur v1 m	Pp mur MN	Charge + Pp MPa	e mur v2 m
Pisé (comprimé à 90-95% Proctor standard)	1800	2	1	2,3	1	0,500	0,021	1,041	0,521
Pisé (idem, stabilisé à 8% de ciment)	1800	5	1	2,3	1	0,200	0,008	1,041	0,208
Adobe	1400	2	1	2,3	1	0,500	0,016	1,032	0,516
Adobe (stabilisé à 5-9% d'émulsion de bitume)	1400	5	1	2,3	1	0,200	0,006	1,032	0,206
Blocs comprimés (comprimé à 20 bars)	1800	2	1	2,3	1	0,500	0,021	1,041	0,521
Blocs comprimés (comprimé à 20-40 bars, stab. 8% ciment)	1800	5	1	2,3	1	0,200	0,008	1,041	0,208
Blocs comprimés (comprimé à 300 bars, stab. 12-19% chaux)	2200	12	1	2,3	1	0,083	0,004	1,051	0,088
Béton C25/30	2200	25	1	2,3	1	0,040	0,002	1,051	0,042

Ainsi, ce tableau montre que construire un projet avec la terre passe aussi par la prise de conscience que le matériau terre est structurellement moins performant que le béton par exemple et qu'il n'offre, de fait, pas les mêmes possibilités constructives. Dans le cas de projets conséquents en terre comme le centre Ricola de Herzog & de Meuron construit avec l'aide de l'industriel Martin Rauch, le matériau terre intervient davantage comme un parement. La terre crue est dans ce cas mise en œuvre sous forme de blocs de pisés, utilisés comme une peau qui recouvre un squelette de béton.

La raison pour laquelle ce matériau peut être considéré comme un bon choix de parement réside tout d'abord dans ses capacités thermiques et hygrométriques. Cependant, ce simple élément de réponse n'est pas satisfaisant en lui-même. En effet, le matériau terre jouit d'une certaine cote de popularité en terme de propriétés thermiques. Cette affirmation est en partie véridique mais est parfois exagérée. Le tableau ci-dessous est une comparaison de la déperdition de chaleur (U-Value) à travers différents matériaux et permet de comparer de manière quantitative la véracité de ce propos. Le détail des calculs qui ont permis l'obtention du tableau est donné en annexe 5.

Ainsi, nous remarquons qu'à épaisseur égale, le béton a une déperdition de chaleur bien moins importante que le pisé ou l'adobe. La qualité thermique de la terre réside en réalité dans une autre grandeur thermique. Les recherches menées par le laboratoire CRAterre, notamment, montrent que «la terre bénéficie d'une inertie latente liée à sa capacité d'absorption»⁴¹. En effet, par sa lente migration dans la structure en terre, l'eau participe à sa capacité de stockage pour des cycles longs (annuels). De plus, la faible diffusivité de la terre «offre l'avantage d'un amortissement et d'un déphasage importants des variations et des apports thermiques externes» (la diffusivité correspond au déphasage et à l'amortissement d'une onde thermique se propageant dans une paroi)⁴².

Ainsi, dans le cas du Centre Ricola de Herzog & de Meuron, tiré à la fois partie des excellentes capacités structurelles du béton armé et de la capacité de parement de la terre est alors l'illustration même de ce que nous désignons par l'idée de *matérialité comme esquisse*. L'hybridité de cette structure doit dès lors inspirer le projet mené en parallèle de ce mémoire pour associer les avantages de chaque matériau : utiliser la terre crue comme la peau qui recouvre, utiliser le bois ou le béton comme le squelette qui soutient.

Utiliser la terre comme un matériau de remplissage est intéressant à plusieurs échelles. Tout d'abord, le matériau est disponible localement, en quantité abondante, et ne nécessite pas ou peu de transformations, contrairement au béton et *a fortiori* l'acier. Ainsi, ce matériau brut et local a une faible empreinte carbone. Cela est par ailleurs renforcé par le fait que

41 HOUBEN, H., GUILLAUD, H. *Op. Cit.* p.157

42 *Idem*

Matériau	Masse Vol. kg/m ³	Conductivité W/K.m	e brique m	e joint argile m	e mur m	Rth brique K.m ² /W	Rth joint K.m ² /W	Rth eq K.m ² /W	U value W/K.m ²
Pisé (comprimé à 90-95% Proctor standard)	1800	0,81	-	-	0,35	-	-	0,432	2,314
Pisé (idem, stabilisé à 8% de ciment)	1800	0,81	-	-	0,35	-	-	0,432	2,314
Adobe	1400	0,46	0,15	-	0,025	0,35	0,326	0,013	1,003
Adobe (stabilisé à 5-9% d'émulsion de bitume)	1400	0,46	0,15	-	0,025	0,35	0,326	0,013	1,003
Blocs comprimés (comprimé à 20 bars)	1800	0,81	0,15	-	0,025	0,35	0,185	0,013	0,581
Blocs comprimés (comprimé à 20-40 bars, stab. 8% ciment)	1800	0,93	0,15	-	0,025	0,35	0,161	0,013	0,509
Blocs comprimés (comprimé à 300 bars, stab. 12-19% chaux)	2200	1,04	0,15	-	0,025	0,35	0,144	0,013	0,458
Béton C25/30	2200	0,18	-	-	0,35	-	-	1,944	0,514



Ci-dessus : construction du centre Ricola. Nous distinguons la structure béton progressivement couverte par les blocs de pisés produits de manière industrielle.

Source : Martin Rauch - Lehm Ton Erde

Ci-dessous : déperdition thermique (U-Value) à travers différents matériaux. Plus cette valeur est grande, plus il y a déperdition de chaleur.

Valeurs numériques initiales tirées de : HOUBEN, H., GUILLAUD, H. *CRAterre - Traité de construction en terre*. Editions Parenthèses. Marseille, 2006

lorsque la terre n'est pas stabilisée, elle en devient un matériau entièrement recyclable⁴³ et peut retourner à son état originel lors de la fin de vie du bâtiment.

Il semble ici important d'attirer l'attention du lecteur sur la question de la stabilisation de la terre qui peut dans certains cas contredire l'idée du matériau bas-carbone que nous avons exposé. Cette étape facultative mais fréquente, permet de consolider la cohésion des grains les uns avec les autres. Or, lorsque la stabilisation se fait par l'emploi de ciment ou de chaux, l'aspect bas-carbone du matériau est remis en question⁴⁴ (cf. annexe 1 en fin de mémoire). Cependant, le ciment n'est pas la seule alternative, il est aussi possible de travailler sur l'interaction entre la fraction argileuse du matériau terre avec des molécules d'origines végétales pour stabiliser le matériau⁴⁵ (cf. annexe 2 en fin de mémoire).

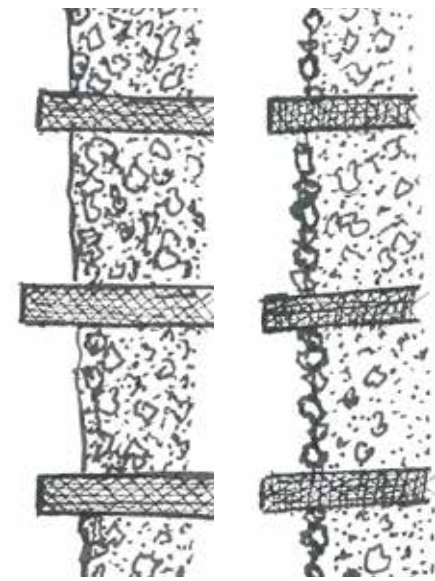
La stabilisation de la terre permet de renforcer les caractéristiques structurelles du matériau (la comparaison des deux premières lignes du tableau p.36 nous le démontre). Par ailleurs, c'est une manière de protéger le matériau de l'érosion, bien que pas entièrement.

En effet, le matériau terre est très sensible à l'érosion et pour cette raison il est particulièrement important de protéger les parois exposées aux intempéries. Concernant l'érosion, il y a deux types de matériaux dans la terre crue : ceux qui résistent bien à l'érosion (pierres) et ceux qui ne s'y opposent pas (argiles).

Prenons le cas d'un mur en pisé (mélange d'argile et granulats de différents diamètres) pour illustrer ce propos. Si le mur est exposé aux intempéries, les premières pluies retireront d'abord l'argile et les pierres de plus petit diamètre. Cela laissera ensuite apparentes les pierres de plus gros diamètre qui s'opposent réellement à l'érosion. En conséquence, la teneur en granulats de grands diamètres est une première manière de limiter l'érosion⁴⁶. Néanmoins, le squelette granulaire (proportion et répartition de granulats de différentes tailles dans le matériau) influe directement sur la résistance mécanique du matériau. Ainsi, lutter contre l'érosion n'est pas aussi simple que d'augmenter la teneur en granulat de grand diamètre.

Une deuxième méthode consiste à ne pas s'opposer à l'érosion mais à la contrôler, où à la *calculer* selon le terme de Martin Rauch, spécialiste du pisé. A l'instar des murs en pisé de la maison Rauch, des petits éléments de terre cuite haut de 3 cm, enfoncés de 15 cm dans le mur avec un débord de 2 cm filent sur toute la largeur de la façade et s'oppose à l'érosion. Chaque lit de tuiles en terre cuite est distant d'une vingtaine de centimètres du lit inférieur ou supérieur. Cette disposition constructive permet ainsi de se protéger de l'érosion en diminuant la vitesse d'écoulement de l'eau sur le mur.

Enfin, la troisième solution provient d'un adage bien connu des constructeurs de terre : « une maison de terre ne demande qu'un bon cha-



Ci-dessus : Principe d'érosion calculée. Coupe schématique d'un mur en pisé après décoffrage (à gauche), puis après les premières pluies (à droite). Les sables et granulats les plus fins ont laissé place à des granulats de plus grands diamètres, s'opposant à l'érosion.

Source : dessins personnels d'après la théorie de Martin Rauch



Ci-dessus : Mur de pisé de la maison Rauch. Le constructeur ne protège pas la façade par un débord de toiture important, les lits de tuiles en terre cuite sont une manière alternative de s'opposer à l'érosion de la façade.

Source : Martin Rauch

43 Conférence inaugurale de l'exposition «Terres de Paris», Pavillon de l'arsenal. Intervenants : Romain Anger, Paul-Emmanuel Loiret & Serge Joly, Martin Rauch. Disponible en ligne : <https://www.pavillon-arsenal.com/fr/arsenal-tv/conferences/hors-cycle/10509-terres-de-paris.html>

44 VAN DAMME, H., HOUBEN, H. Should raw earth be improved? An environmental assessment. Terra Lyon 2016

45 MOEVUS-DORVAUX, M., COUVREUR, L., FONTAINE, L., ANGER, R., DOAT, P., RONSOUX, L., JORAND, Y., OLAGNON, C., MAXIMILIEN, S. Environmental-clay-based concrete. Terra Lyon 2016

46 RAUCH, Martin, Haus Rauch, Basel, Birkhäuser GmbH, 2011

peau et de bonnes bottes »⁴⁷. A travers cette phrase simple en apparence se dissimule la question de la stabilité de la terre à l'eau. Conformément à l'adage, il convient de protéger les éléments construits en terre par un soubassement étanche à l'eau et protéger la façade par une toiture au débord important.

Par conséquent, les moyens et méthodes développés pour ralentir l'érosion de la terre influent sur la géométrie du bâtiment et ont par conséquent, un fort impact sur l'esthétique de ce dernier. Ici encore, le travail avec le matériau terre illustre l'idée d'une matière qui agit comme une ligne directrice pour le projet, délimitant le périmètre d'action de l'architecte.

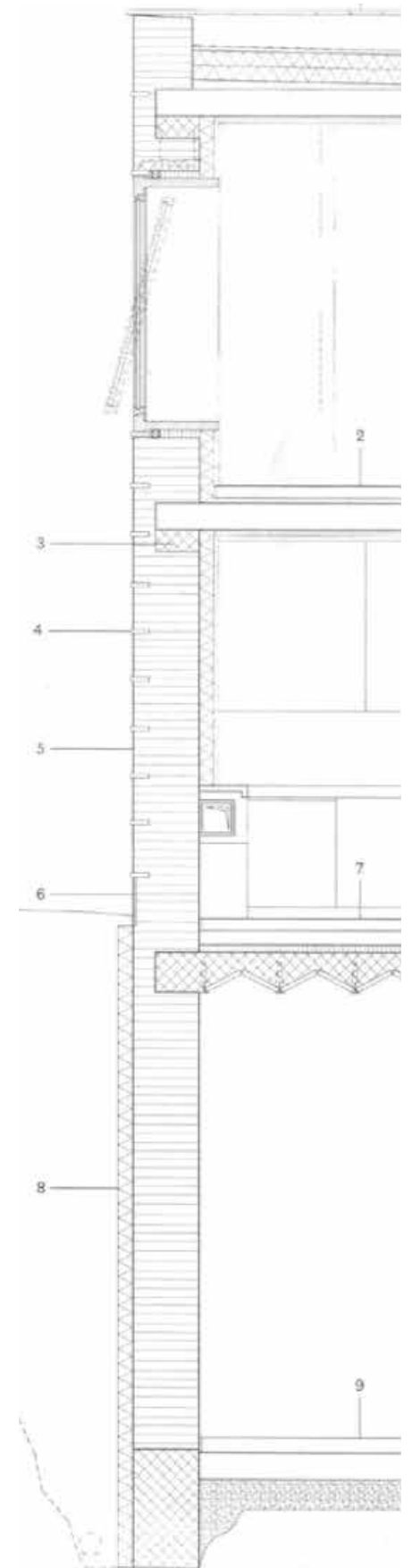
Aussi, dans le cadre du projet développé en parallèle du mémoire, chacun des moyens de protéger le bâtiment de l'érosion sera considéré, tout comme sera étudiée la pertinence d'une structure hybride terre/bois ou terre/béton au regard des caractéristiques mécaniques et thermiques recherchées pour le projet. Enfin, le mode de mise en œuvre de la terre (pisé, adobe, BTC, impression 3D,...) sera également autant de paramètres du projet qui agiront comme des garde-fous lors du développement de celui-ci.

A ce stade, il est important de noter que si l'univers constructif de la terre semble clos et contenu par une tradition riche d'une histoire millénaire, il n'en demeure pas moins sujet aux innovations techniques ou technologiques. L'exemple d'entrepreneurs comme Martin Rauch démontre qu'il est possible d'industrialiser les processus de production et donc de développer et d'améliorer certains modes de mise en œuvre de la terre.

Dans cette lignée, le chapitre suivant sera l'occasion de discuter des manières technologiques de transformer la matière pour créer l'architecture. En effet, l'approche numérique bouleverse l'utilisation des matériaux de construction couramment utilisés comme le béton ou l'acier, et insuffle un intérêt grandissant aux matériaux bas carbone tels que la terre ou des matériaux fibreux (bois, bambou, mycélium,...).

Dans un souci de concision et de continuité entre le mémoire et le projet, le chapitre suivant insistera d'avantage sur l'association entre les outils numériques et la terre. Sous l'impulsion de laboratoires tels que l'IAAC (Institute for Advanced Architecture of Catalonia), les recherches sur les manières d'automatiser la mise en œuvre de la terre s'étoffent. Ainsi, malgré les millénaires d'innovation que le matériau a connu, la *saut technique* induit par l'outil numérique ouvre de considérables perspectives d'expérimentation.

47 HOUBEN, H., GUILLAUD, H. Op. Cit. p.242



Ci-dessus : Mur de pisé de la maison Rauch. Des éléments de terre cuite (4) sont disposés régulièrement pour ralentir l'écoulement de l'eau en façade et diminuer l'érosion du mur. Une membrane étanche à l'eau (8) est appliquée en soubassement.

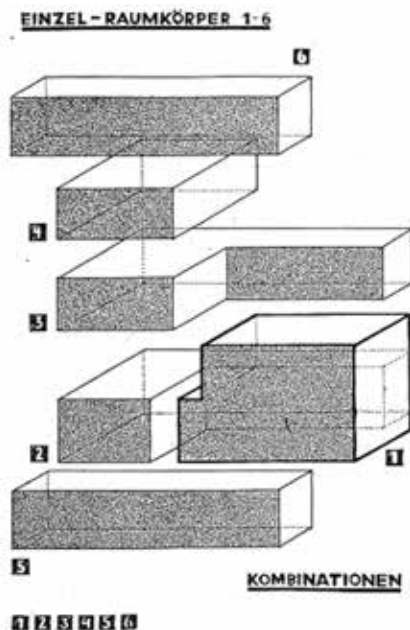
Source : ULRICH, D. Sustainable Architecture in Voralberg: Energy concepts and construction systems, Bâle, Birkhäuser, 2010, p.85



Pour la sculpture imprimée 3D *Digital Grotto II* réalisée en 2017 par les artistes Michael Hansmeyer et Benjamin Dillenburger, le numérique est davantage un partenaire qu'un outil.

Source : Michael Hansmeyer

II. Technologie et numérique, vers une nouvelle manière de faire l'architecture



Baukasten im Grossen, Meyer et Gropius (1923).

Source : Bauhaus-Archive



Dymaxion House, Etats-Unis (1929-1946), Richard Buckminster Fuller.

Source : The estate of Buckminster-Fuller



Habitat 67, Canada (1967) - Moshe Safdie

Source : Jerry Spearman

A. Dématérialiser pour construire

Dans *Culture numérique et architecture*, Antoine Picon fait état des changements que l'ordinateur induit sur la culture architecturale et urbaine. Redéfinir l'individu, redéfinir la manière de produire, de fabriquer le projet, concevoir sa forme, appréhender la matière et sa mise en œuvre, les questions de tectonique, élaborer la ville et son urbanisme, sont autant de sujets interconnectés dans la notion de *digital architecture*. Pour Antoine Picon, l'architecture digitale correspond à une branche expérimentale née du début des années 90 (malgré des racines plus profondes), basée sur l'emploi de l'ordinateur comme outil de pratique et de théorie architecturale. A ses débuts, la notion *digital architecture* englobait toutes les recherches et expérimentations que l'ordinateur permettait. Avoir recours à cet outil révolutionnaire, c'est déjà remettre en question la démarche de projet et les formes qui en découlent. Cela marque la genèse d'une nouvelle manière de concevoir l'architecture qui, très vite, se décline en nouvelles manières de produire l'architecture.

Notons que dès les années 1920, dans le sillage des théories du *Bauhaus*, la systématisation de l'architecture bouleverse la manière de la penser et de la concevoir. Ainsi naît une architecture dite *modulaire*, techniquement simplifiée, à l'instar du concept de *Baukasten* (littéralement «kit de construction» modules pouvant être facilement assemblés) introduit par Walter Gropius et Adolf Meyer. Dans le même temps, Richard Buckminster Fuller développe un élément plus systémique qui prend également en compte la structure, les canalisations,... (cf. illustration ci-contre). Cette manière de concevoir l'architecture ouvre la porte à l'industrialisation du processus constructif¹.

Les années 1960 et les progrès l'armée américaine en informatique décuple le potentiel d'utilisation de l'architecture modulaire et son degré de complexité, à l'image du projet Habitat 67 de Moshe Safdie (1967). A travers les travaux de chercheurs en informatique et architecture, un champ de possibilités conséquent s'ouvre à la discipline : la Conception Assistée par Ordinateur (C.A.O.). En particulier, sous l'impulsion de Nicholas Negroponte, l'*Architecture Machine Group* (AMG) se forme au Massachusetts Institute of Technology en 1967. Le but de ces chercheurs est résumé dans l'ouvrage de Negroponte, *the Architecture Machine* (1970) : que peut apporter l'ordinateur à l'architecture ? *Architecture Machine Group* abouti à la confection des logiciels de C.A.O. *URBAN II* puis *URBAN V*, qui apparaissent avant même que l'industrie informatique se développe massivement².

Il faut en effet attendre les années 1980 pour assister à « la diffusion de l'ordinateur personnel ou PC »³ qui tend, par ailleurs, à découpler les capacités de l'informatique (calculs, mémoire, réseaux,...). La diffusion massive de logiciels de C.A.O. 2D puis 3D dans les agences d'architecture est une conséquence directe de la démocratisation de l'ordinateur. De fait, toute architecture devient alors digitale et s'aventure dans une nouvelle dimension sensible.

En effet, l'ordinateur permet l'extension du cerveau du concepteur. La prolifération de la culture digitale a conduit au développement d'interface Homme/machine toujours plus performante, interface qui prolonge de

1 CHAILLOU, S. *Exposition Pavillon de l'Arsenal - Intelligence Artificielle et Architecture*. 02-04 2020

2 *Idem*.

3 PICON, A. *Op. Cit.* p.49

fait la réalité humaine dans l'artificiel digital. Ainsi, « le virtuel se trouve ré-injecté dans le monde physique sous la forme d'une augmentation »⁴. L'outil informatique porté par les travaux du Massachusetts Institute of Technology, renforcé par la collaboration des architectes et des industriels permet de passer du stade d'invention à celui d'innovation. En effet, la recherche dans le domaine informatique a conduit au développement d'une architecture inédite.

Symbole de cette architecture, la NURBS (*Non-Uniform Rational B-Spline*) est peut-être l'illustration la plus pertinente de ce nouveau champ de possible. Il s'agit d'outils qui « permettent aux concepteurs de jouer de manière très intuitive avec les courbes, les surfaces et les volumes, de produire et de visualiser des déformations complexes tout aussi facilement que s'ils tordaient, comprimaient [...] des objets réels dans l'espace »⁵. En effet, la *spline* facilite le recours au pli et partant, renforce la continuité de la matière. Elle permet à des théoriciens de la *digital architecture* comme Greg Lynn de proposer des concepts d'architectures *fluides* en réaction au mouvement moderne⁶.

Franck Gehry est peut-être l'un des architectes les plus emblématique de ce nouvel espace de création ouvert par la modélisation informatique. A travers *Gehry Technologies* qu'il fonde avec Jim Glymph en 1980, l'architecte assouplit alors les contraintes de représentation du bâtiment pour aboutir à des formes inédites. La conception du musée Guggenheim de Bilbao en est une parfaite illustration. A propos de sa conception, Gehry déclare : «je construis des maquettes de plus en plus grandes, ajoutant de nouveaux éléments et de nouvelles pièces au puzzle. Une fois que je tiens le début, que je commence à entrevoir une direction, je me mets à examiner les différentes parties plus en détails. Elles évoluent à leur tour, puis je retourne à une base de rectangle et de boîtes, et je regarde. Puis je recommence à déformer. Et à un certain stade je m'arrête car je sens que j'y suis»⁷.

A l'issue de ce processus, un technicien pointe et numérise 56 000 points sur la surface de la maquette. Les boîtes en carton deviennent virtuelles, l'architecture se dématérialise. Le logiciel calcule la faisabilité de chaque volume de manière rationnelle et démystifie les formes⁸. Cette étape permet alors de mettre toute la puissance de calcul de l'informatique au service de l'architecture.

Cependant, nous attirons l'attention du lecteur sur la démarche conceptuelle de Gehry. En effet, dans la description du processus créatif de l'architecte, il est important de noter la dimension *sensible* dans sa recherche de forme. L'architecture naît avant tout d'un jeu intuitif avec la matière. L'extrémité de ses doigts se prolonge dans la maquette, déforme le carton et le papier, fait apparaître à sa vue et son toucher les courbes et les droites du futur projet. L'architecture naît donc d'abord de manière physique. C'est même cette intuition, ce rapport sensible à la matière qui donne au projet toute sa force et qui ne laisse aucune ambiguïté quant à la place de l'outil informatique dans le projet de Gehry. Le musée Guggenheim de Bilbao est une première fois construit en papier et carton, avant d'être dématérialisé

4 PICON, A. *Op. Cit.* p.49

5 *Ibid.* p.71

6 LYNN, G. « Architectural Curvilinearity : the Folded, the Pliant and the Supple », dans *Folding in Architecture*, AD Profile 102, AD 63, mars-avril 1993 (réédition augmentée 2004), Chichester, John Wiley & Sons. p. 24

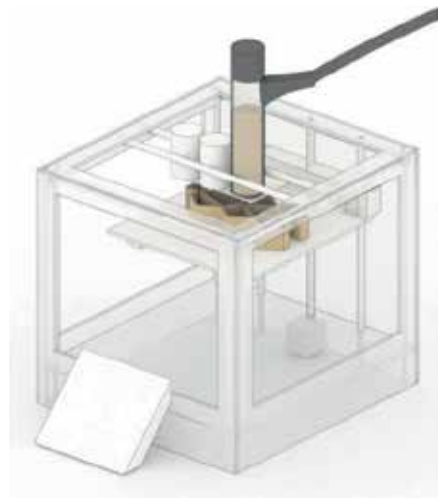
7 DONNADA, J. *Le Musée Guggenheim de Bilbao* [Télévision]. Arte France. 2002. 25 minutes

8 *Idem*.



Ci-dessus : Musée Guggenheim, Bilbao (1997) par Franck Gehry dont la construction est due en partie à l'utilisation d'outil numériques.

Source : AD Magazine



pour pouvoir être reconstruit en béton, acier, titane, verre et pierre.

La démarche de Gehry soulève donc le passage de la figure sensible et abstraite de la maquette d'étude à la structure monumentale et rigoureuse du bâtiment construit. Dans ce cas, le passage d'une échelle à une autre se fait à travers un changement de matérialité, dont le dimensionnement des éléments est dû grandement à l'outil informatique.

Ainsi, il semble que, de façon contre-intuitive, la dématérialisation induite par le passage au numérique renforce le lien entre matérialité et architecture. Si l'exemple de Gehry, par son aura et son prestige, peut être considéré comme marginal et donc peu représentatif, l'émergence de nouveaux outils technologiques accessibles au plus grand nombre semble élargir le spectre de notre réflexion. En effet, le passage au numérique entraîne par extension la naissance d'outils asservis, dont le rôle est de transformer une ligne de code informatique en mouvement dans l'espace.

L'impression 3D (ou en anglais *Additive Manufacturing (AM)*) constitue une très bonne illustration. Si la production d'architecture par impression 3D reste pour le moment relativement expérimentale et s'inscrit principalement dans une démarche de recherche, elle est néanmoins l'illustration que dématérialiser la conception du projet peut renforcer le rapport entretenu entre l'architecte et la matière.

En 2012, au College of Architecture and Environmental Design (Kent State University, Etats-Unis), Brian Peters développe le projet *Building Bytes*, une installation constituée par l'empilement de briques en céramique, chacune obtenue par impression 3D. Cette démarche met en lumière l'apport du numérique sur la matérialité de l'architecture. En effet, le projet de Peters repose sur la création d'un matériau de construction via une technologie innovante. Ainsi, le numérique permet d'apporter un nouveau prisme de lecture à la question de la matière. En d'autre terme, concevoir le matériau de l'architecture devient le principal enjeu. Ainsi, nous pouvons dire que la dématérialisation de la conception peut, dans une certaine mesure, renverser le rapport établi depuis plus d'un siècle entre matérialité et architecture.

Dans le cas de *Building Bytes*, précisons qu'il ne s'agit pas d'aboutir à une structure portante. La recherche se penche sur la création d'objets architecturaux économiques via l'utilisation de matériaux traditionnels (céramique)⁹. Ainsi, plus que de renforcer le lien à la matérialité, le numérique est aussi une manière de réactiver des savoir-faire ancestraux. Il participe à redécouvrir des matériaux qui ont pu être mis à l'écart suite à l'émergence du béton et de l'acier, principalement pour des raisons économiques comme nous l'avons évoqué en introduction.

Le recours à l'impression 3D permet de réduire considérablement les coûts de production moyennant un investissement initial dans la technologie. Dans le cas de *Building Bytes*, l'imprimante utilisée est un modèle de bureau de petite taille (20 x 20 x 20 cm³) bon marché et répandue. Par ailleurs, la géométrie de la brique est étudiée afin de minimiser la quantité de matière à mettre en œuvre pour un gabarit final identique. De même, le temps d'impression a été optimisé afin de réduire d'avantage les coûts dans l'hypothèse d'une production industrielle. Le cheminement de la buse est déterminé en amont pour minimiser ses déplacements «à vide».

⁹ GRAMAZIO, F., KOHLER, M., LANGENBERG, S., PETERS, B. «Building Bytes: 3D-Printed Bricks» dans *Fabricate: negotiating design & making*, London, Edition : UCL Press, 2017. pp. 112-119

En résumé, le projet *Building Bytes* démontre une utilisation possible du robot et sa capacité à reproduire une même brique à la structure travaillée un grand nombre de fois à moindre coût. Le numérique semble amorcer l'émergence de nouveaux paradigmes, d'un véritable renversement dans la manière de faire l'architecture. Il semble en effet se dessiner une architecture qui agit tant à l'échelle de ses éléments constitutifs et structurels qu'à l'échelle du projet en lui-même.

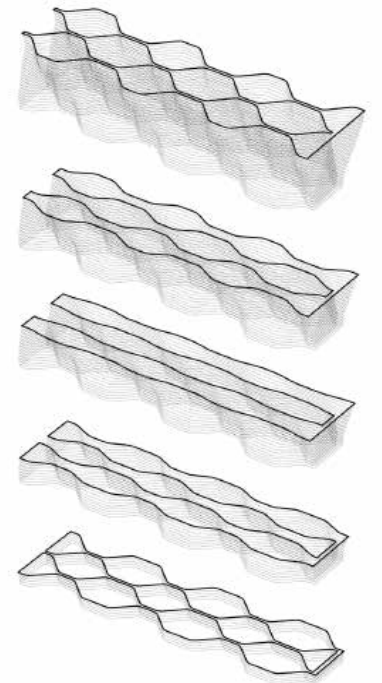
Néanmoins, la lecture de *The Alphabet and the Algorithm* de Mario Carpo (1958-) peut soulever une première limite du travail accompli par *Building Bytes*. En effet, l'auteur développe une vision entièrement articulée autour de la nouvelle grille de lecture que le numérique installe : la fin de l'«identité», l'avènement de la variation¹⁰. Par son passé d'historien de la renaissance italienne, il remonte la trace de l'«identité», basée sur la reproduction à l'identique d'un même schéma, à travers les travaux d'Alberti (à l'origine de la distinction entre dessin et construction et de la profession de projeteur), l'avènement de l'imprimerie par Gutenberg (XV^e), la mécanisation des procédés de constructions et la standardisation des éléments fabriqués de la révolution industrielle. Tous partagent une origine commune : l'économie d'échelle. Reproduire un même geste ou produit un grand nombre de fois conduit indéniablement à une «identité», certes mais à moindre coût.

Or, selon Mario Carpo, les technologies numériques libèrent une variabilité dans le faire et la transformation de la matière. En effet, produire à l'aide d'une imprimante 3D un objet identique un grand nombre de fois ou autant d'objets différents demandera le même coût pour des quantités similaires de matière. Ainsi, nous pouvons nous interroger sur la pertinence de *Building Bytes* dans sa manière de reproduire en masse le même objet via un outil numérique.

A travers l'élaboration de structures imprimées en 3D d'un seul tenant, les travaux du laboratoire OTF (Open Thesis Fabrication) de l'IAAC (Institute for Advanced Architecture of Catalonia) exploitent peut-être davantage le potentiel du numérique, et se place en rupture de l'identité remise en question par Mario Carpo. Cependant, appréhender le projet comme un seul et même élément imprimé demande un travail rigoureux sur la constitution du matériau de construction lui-même et ajoute une couche supplémentaire à la manière d'appréhender l'architecture. A l'instar du projet *Building Bytes*, les recherches menées à l'OTF donnent autant d'importance à l'architecture des éléments imprimés qu'à l'architecture globale du projet. Ces deux échelles sont alors étoffées d'une troisième, permise par un travail sur le matériau de construction lui-même.

Réfléchir à l'échelle du matériau, c'est renforcer le lien entre architecture et matérialité. Cela permet d'appréhender le projet à une échelle plus fine encore. En effet, dans la conception du *Porous Wall*, les chercheurs ont étudié la mise en œuvre de la terre crue par impression 3D. Dans ce cas, la matière terre est le point de départ du projet. La mise en relation des connaissances mécaniques et chimiques de la terre (dont une partie a été présenté dans le chapitre précédent) avec les compétences technologiques des chercheurs de l'IAAC permet aux architectes de retrouver une posture plus proche de la matière.

En effet, en parallèle du développement du projet, le laboratoire éla-



Différentes typologies testées pour la géométrie de la brique.

Source : Building Bytes



Diagramme du cheminement de la tête d'extrusion.








Source : Building Bytes



Ci-dessus : impression d'une brique alvéolée et assemblage selon différentes directions.

Source : Building Bytes

¹⁰ CARPO, M. *The Alphabet and the Algorithm*, Cambridge (MA), The MIT Press, 2011

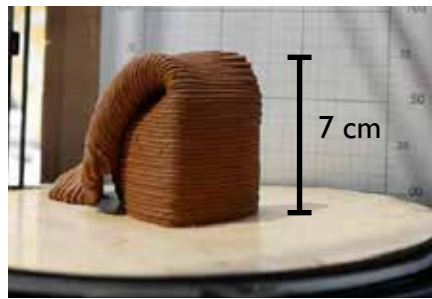
Échantillon	Section	Mélange mère	Micro fibres	Fibres longues	Quantité d'additifs	Plasticité (I-IV)	Retrait	Résistance à la flexion [Bars]
Mélange père		X				IV	4,0 %	2,1 bars
Cellulose		X	X		0,3 %	IV	4,0 %	2,2 bars
					0,6 %	IV	3,9 %	2,4 bars
					0,9 %	IV	3,7 %	2,5 bars
Cendre		X			0,3 %	IV	3,5 %	2,1 bars
					0,6 %	IV	3,5 %	2,1 bars
					0,9 %	IV	3,5 %	2,1 bars
Son de riz		X	X		0,3 %	IV	4,0 %	2,1 bars
					0,6 %	-	-	-
					0,9 %	III	4,0 %	2,1 bars
Sisal		X		X	0,3 %	III	3,0 %	2,1 bars
					0,6 %	II	2,5 %	2,4 bars
					0,9 %	I	-	-
Chanvre		X		X	0,3 %	III	3,5 %	2,4 bars
					0,6 %	I	-	-
					0,9 %	II	3,0 %	2,6 bars
Cellulose + sisal + cendre		X	X	X	0,3 %	III	3,5 %	2,7 bars

Ci-dessus : Tableau récapitulatif des différents tests matériaux réalisés au sein de l'IAAC. Les fibres, présentes en plus ou moins grandes quantités dans le mélange de base, influent directement sur la facilité d'impression (plasticité), le retrait et les propriétés mécaniques (résistance à la flexion) du matériau.

Les résultats obtenus sont classés par ordre décroissant de priorité pour l'impression en terre d'une architecture (facilité d'extrusion > Retrait après séchage > Résistance à la pression).

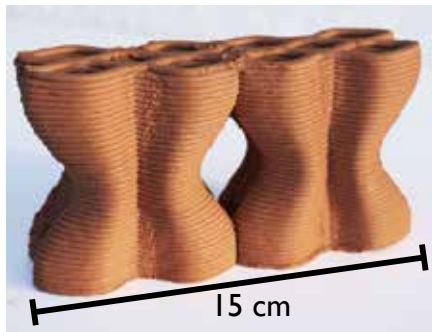
L'exemple de la cellulose montre, qu'à mesure que la quantité de fibre augmente dans le mélange, les caractéristiques du matériau s'améliorent. Néanmoins, certains cas tels que celui du sisal, apportent la preuve d'une corrélation entre difficulté d'extrusion (mauvaise plasticité) et augmentation de la quantité de fibre. Tout l'enjeu est alors de déterminer le bon arbitrage entre les différents facteurs en fonction de l'architecture à imprimer.

Source : Recherches personnelles menées pour et au sein de l'IAAC



Ci-dessus : Ruine lors d'un test d'impression 3D avec de la terre. Lors de la conception, il faut prendre en compte que, lorsqu'elle est humide, la terre est très peu résistante.

Source : IAAC



Ci-dessus : Prototype d'ouverture. La forme retenue est celle qui conformément au matériau terre, peu résistant à la flexion, fonctionne sans simuler de linteau.

Source : IAAC



Ci-dessus : Essai à échelle 1 du porte-à-faux nécessaire à la création d'ouvertures dans le mur.

Source : IAAC



Ci-dessus : Prototype final du projet Porous Wall. (1m x 1m x 20 cm ; 115 kg de matière ; 18h d'impression).

Source : IAAC

bore le mélange de terres et fibres le plus adapté aux enjeux techniques et structurels, dont certains résultats ont été exposés dans le tableau ci-dessous. La campagne de tests se base sur différents mélanges d'argile, de sable, d'eau et de fibres. Parmi les critères discriminants, la plasticité (facilité d'extrusion du mélange à travers la buse) est prioritaire. Le mélange doit être suffisamment fluide pour être imprimé de manière homogène, et suffisamment rigide pour supporter la superposition de couches. Corollaire de la plasticité, le retrait du matériau peut, d'un mélange à l'autre, varier du simple au double. Sous l'effet de l'évaporation, la matière se rétracte et peut dans les cas les plus extrêmes causer la ruine de la structure imprimée. Pour donner un ordre de grandeur, un retrait est acceptable à partir de 2 ou 3% en réduction du volume total, selon la complexité de la géométrie à imprimer.

Ces multiples tests rapprochent indéniablement l'architecte de la matière. Malgré l'automatisation que le numérique et les outils technologiques permettent, la démarche de conception et de production reste très empirique. Dans le cas du projet *Porous Wall*, de nombreux prototypes de différentes échelles ont permis de tester à la fois la dimension esthétique et structurelle du projet. Cela renforce alors l'idée que le numérique et les nouveaux outils qu'il met à disposition de l'architecte peut, dans une certaine mesure, lier étroitement architecture et matérialité. En d'autres termes, la dématérialisation liée à l'informatique permet par ailleurs de construire et expérimenter physiquement davantage.

Ainsi, qu'il s'agisse de projets d'exceptions tels que le musée Guggenheim de Bilbao, où de projets plus expérimentaux comme *Building Bytes* ou *Porous Wall*, la dématérialisation du projet, induite par le numérique ne signifie pas nécessairement la rupture et la perte de contact entre l'architecte et la matière. De cette démarche naît un nouveau vocabulaire de forme. Il peut provenir de l'intuition de l'architecte, modelée par ses doigts, bâtie à grande échelle par des prouesses d'ingénieries et de technologies. Il peut aussi provenir des contraintes mécaniques et techniques de la matière et de l'outil utilisé, et de la meilleure manière d'en tirer parti.

Néanmoins, cette démarche s'oppose dans une certaine mesure à la notion de «*digitally intelligent architecture*». Cette dernière sous-tend l'idée d'une pratique de l'architecture par l'exploration du potentiel des outils numériques. Le terme de «*computational design*» est également employé et insiste davantage sur la capacité calculatoire de la démarche et de l'outil (*compute*, du latin *computare* signifie *calculer*). Les capacités calculatoires de ces logiciels sont telles qu'elles permettent désormais de faciliter la gestion de paramètres complexes (ventilation, éclairage naturel, radiation solaire, consommation d'énergie, performance structurelle¹¹ par exemple). Ces outils, dits CFD (Computational Fluids Dynamics) outre d'automatiser les calculs de flux, permettent d'adapter le dessin de l'architecture en conséquence.

L'empirisme comme vecteur de création est alors ici remis en question. La géométrie du projet est, dans ce cas, déterminée par un certain nombre de paramètres qui dépendent de l'environnement extérieur, de la réponse aux contraintes mécaniques et techniques d'un matériau, de l'outil de mise en œuvre, de l'intuition de l'architecte quant à la pertinence du résultat proposé par l'ordinateur. Cette démarche basée sur les paramètres

¹¹ CHRONIS, A., DUBOR, A., CABAY, E., ROUDSARI, M. «Integration of CFD in Computational Design - An evaluation of the current state of the art» dans *eCAADe 35*, Volume 1, Novembre 2017. pp.601-610

extérieurs du projet porte un nom : le *paramétrisme*.

B. La paramétrisation au service de l'empirisme

Paramètre n. m. : Grandeur mesurable permettant de présenter de façon plus simple et plus abrégée les caractéristiques principales d'un ensemble statistique¹².

*En informatique, variable dont la valeur, l'adresse ou le nom ne sont précisés qu'à l'exécution du programme*¹³.

Empirisme n. m. : Méthode reposant exclusivement sur l'expérience, sur les données et excluant les systèmes a priori¹⁴.

Patrick Schumacher, ancien associé de Zaha Hadid, définit le «paramétrisme» (selon son propre terme) comme un outil supplémentaire dont dispose les architectes pour «se mouvoir avec une fluidité complète à tous les stades et à toutes les échelles»¹⁵ que ce soit pour les phases d'esquisses ou de réalisation finale. Cela permet alors d'appréhender plus simplement des surfaces complexes et leur représentation. Afin d'éclairer davantage cette définition, nous nous baserons tout d'abord sur un exemple indirectement lié à l'architecture mais non moins essentiel par ses répercussions.

En 1972, Dennis Meadows publie *The Limits to Growth*. L'ouvrage se présente notamment comme un récapitulatif des résultats obtenus par le programme informatique World3. Développé par le club de Rome, World3 prend en compte un certain nombre de paramètres sur lequel l'utilisateur peut agir. Parmi les plus influents, nous retrouvons l'agriculture, l'industrie, la population, les ressources non-renouvelables, et la pollution¹⁶. L'utilisateur détermine les différentes valeurs de ces paramètres les uns par rapport aux autres et l'algorithme calcule en conséquence la stabilité du «système Terre». S'il n'est pas ici question de discuter du résultat de l'expérience (nous laissons au lecteur la curiosité de le découvrir par lui-même et d'en tirer ses propres conclusions) il est très pertinent de remarquer que World3 est un exemple de paramétrisation au service de l'empirisme. En effet, il s'agit ici d'un processus itératif dans lequel l'ordinateur permet de rapide-

¹² Dictionnaire Larousse [en ligne]

¹³ Dictionnaire Larousse [en ligne]

¹⁴ Dictionnaire Larousse [en ligne]

¹⁵ PICON, Antoine. *Op. Cit.* pp34-35

¹⁶ MEADOWS, D. H., MEADOWS, D.L., RANDERS, J., BEHRENS, W., *The Limits to Growth - a report for the club of Rome's project on the predicament of mankind*. Editions : Universe Book, New York, 1972.

Ci-dessus : BUGA Wood Pavillon (Bundesgartenschau, Heilbronn) 2019.

Source : ICD/ITKE Universität de Stuttgart



ment simuler le résultat d'une expérience. En fonction des résultats obtenus, l'utilisateur peut alors ajuster finement les variables jusqu'à obtenir une situation satisfaisante.

Les outils de *computational design* présentés dans la partie précédente sont, sur le principe, dans la droite lignée de travaux tels que World3. Plus encore, certaines recherches initiées dans les années 90, telles que celles poursuivies par l'architecte et chercheur John Frazer partagent également les motivations de la création du programme World3.

En effet, John Frazer considère que l'essence de l'architecture repose sur la création de systèmes, et qu'il est donc par définition possible d'approcher ces systèmes de manière cybernétique¹⁷. Pour lui : «une nouvelle architecture est conçue dans le cyber-espace par la coopération globale d'une communauté mondiale qui fait émerger de nouvelles idées, façonne un environnement écologique et qui utilise l'ordinateur comme un accélérateur évolutionnaire»¹⁸.

Cette idée démontre un parallèle entre les travaux menés par le club de Rome et ceux de chercheurs en architecture à l'instar de John Frazer ou Gordon Park. Il y a une trentaine d'années, ces précurseurs ont su ressentir le potentiel de l'outil numérique comme simulateur d'empirisme, comme un point névralgique de la recherche architecturale appliquée à l'environnement et l'écologie.

Cependant, si nous avons proposé d'y décrypter une forme d'empirisme à travers le terme *évolutionnaire* utilisé par Frazer, l'auteur propose lui une définition plus explicite. Selon lui, «l'architecture évolutionnaire explore les processus fondamentaux de la génération de formes en architecture, s'appuyant sur une large recherche scientifique de la théorie de la morphogenèse dans le vivant. Il propose le modèle d'une nature génératrice de force pour l'architecture [...]. L'architecture est considérée comme une forme de vie artificielle, sujette comme le reste du vivant aux principes de morphogenèse, de code génétique, de reproduction et de sélection. L'objectif d'une architecture évolutionnaire est de développer un environnement constructif au comportement symbiotique et à l'équilibre métabolique comparable à l'environnement naturel»¹⁹.

Dans le sillage d'une architecture qui s'appuie sur les principes de la morphogenèse, d'une architecture érigée par un processus de sélection similaire à celui du vivant - ce que nous avons choisi de décrire comme sélection *empirique* - un certain nombre de laboratoires voient le jour. C'est par exemple le cas de l'*Institute for Computational Design* (ICD) dirigé par l'architecte Achim Menges et de l'*Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfens* (ITKE) dirigé par l'ingénieur Jan Knippers. Ces deux laboratoires,

17 FRAZER, J. « The Architectural Relevance of Cyberspace », M. Pearce, N. Spiller, *Architects in Cyberspace*, AD Profile 118, AD 65, novembre-décembre 1995, Chichester, John Wiley & Sons, pp. 76-77

18 « A new architecture is being conceived in cyberspace by the global cooperation of a world community evolving new ideas modelling ecologically responsible environments and using the computer as an evolutionary accelerator » (nous traduisons) *ibid.* p. 77

19 « An Evolutionary Architecture investigates fundamental form-generating processes in architecture, paralleling a wider scientific search for a theory of morphogenesis in the natural world. It proposes the model of nature as the generating force for architectural form. [...] Architecture is considered as a form of artificial life, subject, like the natural world, to principles of morphogenesis, genetic coding, replication and selection. The aim of an evolutionary architecture is to achieve in the built environment the symbiotic behaviour and the metabolic balance that are characteristic of the natural environments » (nous traduisons). FRAZER, J., *An Evolutionary Architecture*, Londres, AA Publications, 1995, p.9

partenaires de l'université de Stuttgart, ont travaillé à reproduire directement des phénomènes structurels observables dans la nature. Ces structures architecturales, dites bio-inspirées, ont donné par exemple naissance à différents pavillons. L'un d'entre eux, le BUGA Wood Pavilion 2019 en est la démonstration.

Pour le BUGA Wood Pavilion 2019 (Heilbronn, Allemagne), l'ICD et l'ITKE se sont basés sur des recherches communes menées depuis une dizaine d'années sur les coques d'oursins. Par ce processus, le laboratoire extrapole des recherches en biologie sur l'anatomie des oursins à l'architecture. En extrapolant la logique structurelle de la coque, il est possible de produire une construction de grande échelle, en ayant recours à des matériaux bruts et peu transformés (ici, le bois)²⁰. En résulte alors une architecture basée sur la recherche et l'intersection de compétences en biologie, résistance des matériaux, informatique,... Le croisement de différentes recherches et techniques produit ainsi une structure performante malgré l'utilisation de matériaux bas-carbone.

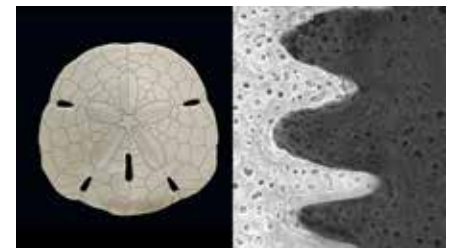
En un sens, cet argument forme la réciproque du raisonnement établi en préface du mémoire. Pour rappel, nous proposons que la ligne directrice qui guide l'architecte parte d'un besoin, d'une nécessité forte, portée par un projet social et une innovation constructive. L'architecture est alors dans ce cas présentée comme génératrice et muse de la recherche qui permet au projet d'aboutir. En d'autres termes, dans les cas présentés en première partie tels que l'école de Diébédo Francis Kéré, de la volonté de créer l'architecture dérive une exploration sociale et technique. Dans le cas du BUGA Wood Pavilion 2019, de la recherche naît l'architecture.

En pratique, l'ICD/ITKE s'inspire de la manière dont des plaques à structure lacunaire s'imbriquent les unes avec les autres pour former la coque d'oursin et permettent de développer avec moins de matière davantage de surface. La pertinence de la démarche tient dans sa capacité à comprendre finement les mécanismes qui permettent aux éléments de la coque de s'assembler entre eux. Nous nous trouvons donc face à un exemple de croisement entre l'utilisation d'un matériau *traditionnel* (tel que défini en introduction de ce mémoire) et du recours à des outils technologiques qui ont permis d'élaborer une structure basée sur la production et l'imbrication de pièces complexes. Cela forme alors la ligne directrice de la recherche : élaborer, à la manière de la coque d'oursin, une structure qui génère une grande surface avec peu de matière²¹.

Animés par cette volonté, les chercheurs élaborent un dôme par facettes, généré par itérations successives grâce à un outil de *computational design*. La variation d'un paramètre géométrique d'une facette induit un nouveau calcul des forces dans la structure par le logiciel. S'il est en théorie humainement possible de le faire sans l'aide de l'informatique, le temps nécessaire à l'étude de chaque itération ne permettrait pas en pratique de réaliser un tel projet. Dans le fond, cela soulève la question de la temporalité. S'il a fallu des millions d'années d'évolution aux espèces pour aboutir à la coquille de l'oursin actuel, seuls quelques mois ont été nécessaires pour élaborer une structure s'en inspirant. Par ce biais, les notions d'échec, de ruine sont fondamentalement bouleversées. Si bien que la transmission traditionnelle

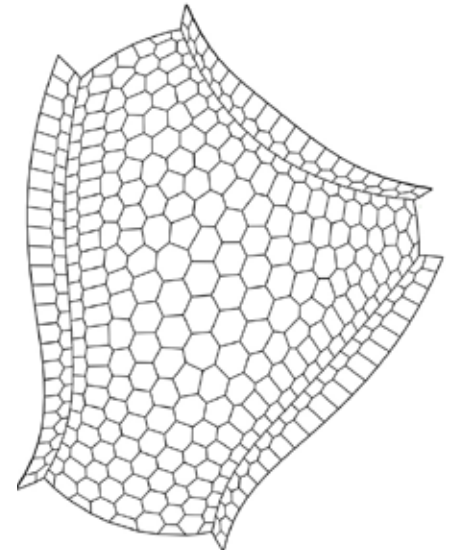
20 BUGA Wood Pavilion, Institute for Computational Design, University of Stuttgart [En ligne] <https://icd.uni-stuttgart.de/?p=22287>

21 LAGA Exhibition Hall, Institute for Computational Design, University of Stuttgart [En ligne] <https://icd.uni-stuttgart.de/?p=11173>



Ci-dessus, à gauche : coque d'oursin. Nous distinguons les plaques accolées les unes aux autres. À droite : Joints liants les plaques.

Source : ICD/ITKE Université de Stuttgart



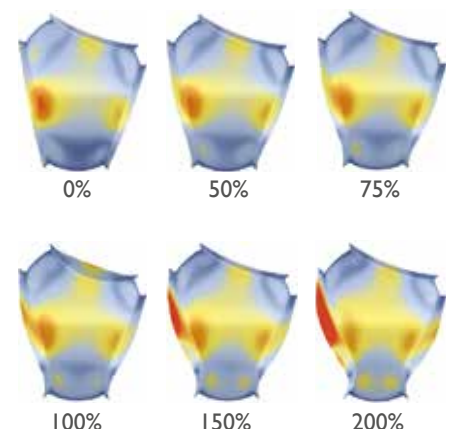
Portée du pavillon : 30 m / Masse surfacique : 36,0kg / m².

Source : ICD/ITKE Université de Stuttgart



Ci-dessus, à gauche : assemblage des plaques de bois les unes aux autres. À gauche : Joints liants les plaques.

Source : ICD/ITKE Université de Stuttgart



Plans schématiques des forces s'appliquant sur les différentes zones du dôme obtenu en faisant varier l'incurvation des arches.

Source : ICD/ITKE Université de Stuttgart

d'architecture et de savoir-faire, améliorée de génération en génération semble désormais obsolète. Nous l'avons évoqué dans la première partie du mémoire avec l'exemple de l'igloo, à propos duquel Jean Gabus écrivait : «Ces maisons de neige [...] ont au contraire une architecture précise, des règles strictes imposées par des siècles d'expérience et de traditions»²². Désormais, il semble que les outils numériques dont nous disposons soient capables de court-circuiter ces siècles d'expérience et de traditions.

Cela interroge alors sur la place réelle qu'occupe l'empirisme dans ce processus de création assisté par ordinateur. En effet, si le projet se base sur l'étude de la coque d'un oursin, l'architecture qui en résulte n'en est pas une transposition littérale. L'architecture découle d'un processus de recherche et d'essais assistés par l'outil numérique. En d'autres termes, il s'agit d'autant d'expérimentations qui ont permis l'obtention du projet final. N'est-ce pas ici une manière détournée de considérer l'empirisme ? L'approche bio-inspirée du processus de paramétrisation et de *computational design* renforce par ailleurs l'existence d'une forme d'empirisme dans ce projet.

En effet, dans le cas de la bio-inspiration, cela peut sembler discutable. Si nous reprenons la définition d'*empirisme* établie en préambule de cette sous partie (pour rappel, *empirisme n. m. : Méthode reposant exclusivement sur l'expérience, sur les données et excluant les systèmes a priori*²³), nous pouvons considérer que l'évolution et la sélection naturelle des espèces forment bien un processus basé sur l'expérience. Ainsi, prendre pour point de départ une structure issue du vivant qui a subi des milliers voire millions d'années d'évolution peut difficilement s'apparenter à court-circuiter les «siècles d'expériences et de traditions». Pourtant, il existe des situations où la notion d'empirisme s'évapore.

C'est par exemple le cas de projets développés à l'IAAC. La branche OTF, que nous avons présentée dans l'exemple du *Porous Wall*, développe une recherche qui puise sa source dans le matériau et l'outil de mise en œuvre. De là, peut ensuite sourdre une architecture innovante et unique.

Le projet *Digital Adobe* réalisé en 2018 à Barcelone est un des représentants de ce processus de construction. Si le projet ne prend pas racine selon des principes de morphogénèse inspiré du vivant, il rejoint néanmoins la catégorie théorisée par John Frazer des architectures approchée de manière cybernétique²⁴. En effet, comme nous allons le voir, le processus de fabrication de *Digital Adobe* «façonne un environnement écologique» et «utilise l'ordinateur comme un accélérateur évolutionnaire»²⁵.

Tout d'abord, l'aspect écologique du projet est de manière générale un des vecteurs de conception du laboratoire. Conscient des problèmes énoncés en introduction, l'OTF développe une recherche prenant comme ligne directrice une réponse au problème climatique. Ainsi pour de nombreuses recherches structurelles, dont le projet *Digital Adobe*, les chercheurs se sont tout d'abord tournés vers l'adobe pour la très faible empreinte carbone du matériau terre et sa disponibilité locale.

Fort de ce matériau, le projet *Digital Adobe* avait pour ambition d'éla-

borer une «structure hautement performante avec comportement climatique/passif»²⁶. Réaliser une telle structure passe alors par le choix de l'outil de mise en œuvre. En effet, nous l'avons vu, la terre est un matériau plus ou moins ductile selon son état hydrique ce qui le rend très compatible avec la fabrication additive (impression 3D). Par ce biais, il est alors possible de paramétrer la construction en adobe et ainsi faire intervenir les outils numériques de *computational design* dans le processus de conception et fabrication.

L'enjeu du projet est alors de créer par l'impression 3D d'adobe, une structure passive «conçue selon le climat local, prenant en considération l'incidence solaire, les températures annuelles et l'humidité»²⁷.

Créer une structure passive demande d'agir sur les différents paramètres géométriques de cette dernière pour l'adapter au climat local (i.e. espagnol). Il faut donc minimiser le réchauffement de la structure en été et le maximiser en hiver. Les recherches pour satisfaire ce «cahier des charges» se focalisent alors sur trois facteurs :

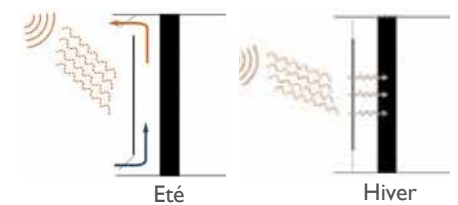
- la convection thermique
- l'incidence solaire
- l'inertie thermique

Le premier facteur, la convection thermique, est traité en partant du même principe que celui présenté en première partie de ce mémoire sur les robes bédouines. Les masses d'air chaud, moins denses, ont un mouvement ascendant. Ainsi, en tirant profit de ce phénomène physique, il est possible de créer un mouvement de convection thermique qui rafraîchit la structure.

Le deuxième moyen dont les chercheurs disposent consiste à minimiser la quantité de chaleur rayonnée en été et la maximiser en hiver. La structure doit donc favoriser l'ombre en été, et favoriser l'apport solaire en hiver. Pour cela, un système de renflement est étudié. Il tire profit d'un angle d'incidence plus grand en été (72°) qu'en hiver (25°). De cette manière, le renflement est capable de faire de l'ombre à sa partie inférieure. Cependant, la création d'un renflement augmente la surface globale de la structure, et partant, augmente la zone d'exposition de celle-ci. Dans la solution retenue et illustrée ci-contre, le fait de créer en renflement avec des angles de 30° augmente la zone d'exposition de 15%, après un rapide calcul trigonométrique.

Or, du fait de la différence d'incidence entre les saisons cela est doublement bénéfique. En été, malgré l'augmentation de surface, l'ombre que le renflement fait sur sa partie inférieure divise la zone d'exposition. Ainsi, cela permet de perdre 42% d'exposition solaire par rapport à une surface plane. En hiver, nous l'avons montré, le renflement augmente la zone d'exposition de 15% et maximise l'apport calorifique.

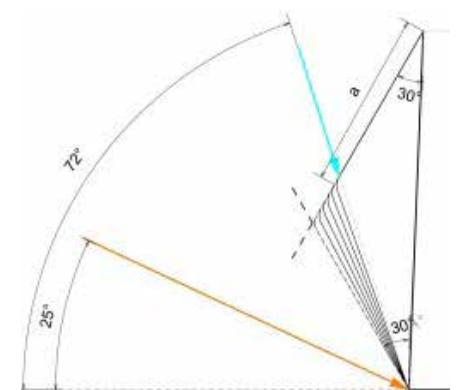
Enfin, l'inertie thermique de la structure est le dernier facteur sur lequel il est possible d'agir. Nous l'avons explicité dans la partie précédente,



Ci-dessus : En été, le soleil chauffe par rayonnement la façade. A son contact, l'air canalisé le long de celle-ci se réchauffe et monte, entraînant avec lui une partie des calories emmagasinées par la façade. Le phénomène de convection thermique rafraîchit alors la structure.

En hiver, nous cherchons à réchauffer la structure. Il faut alors empêcher la canalisation de l'air en obturant les entrées et sorties de l'air.

Source : IAAC



Ci-dessus : Principe du renflement. Nous distinguons en bleu l'incidence solaire en été (72° par rapport à l'horizontale) et en orange l'incidence solaire en hiver (25° par rapport à l'horizontale).

Source : IAAC

22 GABUS, Jean, *Op. Cit.* Consulté pendant l'exposition Ichoumani

23 Dictionnaire Larousse [en ligne]

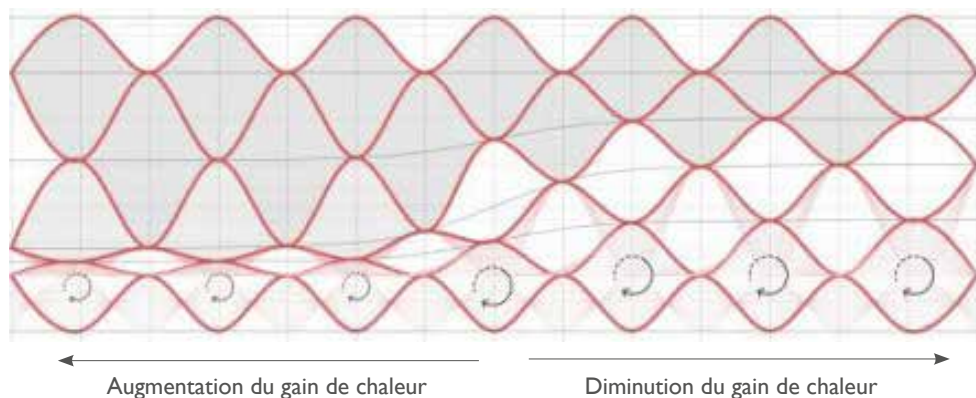
24 FRAZER, J. *Op. Cit.* pp. 76-77

25 FRAZER, J. *Op. Cit.* p.77

26 «highly performative structural and passive/climatic behavior» (nous traduisons). CHANG, Y., *Digital Adobe - Additive Manufacturing with adobe towards passive habitats*, IAAC Blog, Aout 2018 [En ligne] <http://www.iaacblog.com/programs/digital-adobe-additive-manufacturing-adobe-towards-passive-habitats/> (consulté le 12/01/2020)

27 «The wall is designed according to the local climate, taking into consideration the solar incidence, the yearly temperatures and the humidity» (nous traduisons). *Idem*

Ci-contre : Schéma plan de la structure répondant au cahier des charges établi par les chercheurs. La partie basse du schéma correspond à la face exposée de la structure, les flèches modélisant le phénomène de convection thermique. Les zones grisées sont remplies de terre non compactée pour augmenter l'inertie thermique de la structure.



Source : IAAC

Ci-contre : Photo de la structure imprimée suivant la paramétrisation du schéma ci-dessus.



Source : IAAC

la terre permet un déphasage et une inertie thermique intéressants. Or, le recours à l'impression 3D engendre des géométries complexes mais lacunaires (à l'instar du projet de briques de céramique *Building Bytes*). Pour cette raison, cela ne nous permet pas de profiter de l'inertie thermique offerte par une grande quantité de matière. Aussi, afin d'y remédier, certaines alvéoles de la structure imprimée sont comblées de terre.

Le premier enseignement que nous tirons de l'étude de ces différents facteurs est le processus de recherche assistée par la capacité calculatoire de l'ordinateur. Le chercheur s'appuie sur une intuition humaine (l'ombre pour se protéger du soleil) ou un résultat scientifique établi (convection thermique) comme point de départ. A partir de cela, il développe une recherche où l'outil computationnel lui permet de réaliser différents tests. En ce sens, le projet *Digital Adobe* semble réellement agir comme la manière de court-circuiter les siècles d'expérimentations et de traditions auxquels nous faisons référence plus tôt. En d'autres termes, il s'agit d'un exemple concret et créé de toute pièce de paramétrisation au service de l'empirisme.

Le second enseignement que nous pouvons en tirer rejoint une conclusion établie pour le projet BUGA Pavillon 2019. Le choix d'un matériau de construction bas carbone, le choix de son outil mise en œuvre paramétrique et le travail sur les différents facteurs thermiques induisent une géométrie spécifique du projet. L'esthétique du projet est une conséquence des différentes recherches menées individuellement puis mutualisées et assemblées dans le projet *Digital Adobe*. Nous pouvons alors conclure que dans ce cas aussi, la recherche est vectrice d'architecture.

Il est important de noter que ce mur est un prototype d'architecture et n'a donc pas pour vocation d'être immédiatement répliqué à large échelle. L'idée est néanmoins de considérer le potentiel de l'outil paramétrique associé à la terre crue. Encore une fois, nous insistons sur ce point : faire de la recherche un point de départ d'une architecture est une manière de faire échos à la pensée d'Albert Einstein citée en préambule du mémoire. « Si nous voulons résoudre les difficultés qui nous assaillent, notre manière de penser doit évoluer au-delà du niveau auquel nous avons réfléchi le jour où nous avons créé ces problèmes ». Ainsi, nous pouvons voir à travers la



Ci-dessus : Projet construit de Digital Adobe. Nous distinguons le système d'ombrage créé par les renflements, qui se retranscrit sur l'esthétique de la façade. Au final, l'IAAC développe un mur de 2 mètres de large par 5 mètres de haut avec une épaisseur variable (0,7m à la base, 0,2m au sommet).

Source : IAAC

recherche une manière de dépasser, « d'évoluer au-delà du niveau auquel nous avons réfléchi » pour peut-être découvrir des solutions encore inconnues.

C. Automatiser la pensée

Nous l'avons répété à de nombreuses reprises, le numérique est un outil pour les architectes et les ingénieurs, un assistant pour dessiner, pour dimensionner, voire pour prendre des décisions. Ce mémoire a aussi été l'occasion de montrer que, de manière générale, l'outil occupe une place prépondérante dans l'architecture. L'outil permet à l'architecte d'agir sur la matière et la transformer. Cependant, depuis quelques années déjà, le trinôme concepteur/outil/matière évolue et tend vers un binôme outil-concepteur/matière.

En 1956, le mathématicien américain John McCarthy (1927-2011), conceptualise la notion d'*Intelligence Artificielle* (IA). Il s'agit de la capacité de programmes informatiques à copier le fonctionnement de certains traits du cerveau humain. La traduction automatique d'une langue à une autre compte parmi les formes d'*Intelligence Artificielle* les plus couramment utilisées, et une des premières à avoir été développée. Il faut cependant attendre les années 1990 pour permettre aux recherches sur l'*Intelligence Artificielle* de s'épanouir grâce à l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs.

Dans les vastes recherches en IA, celles sur les capacités d'apprentissage et d'adaptation de la machine comptent parmi les plus prometteuses, en particulier appliquées à l'architecture. Ces recherches permettent à l'*Intelligence Artificielle* de donner une réponse sans avoir recours à des paramètres prédéfinis par l'utilisateur. La machine devient capable d'invention ou d'innovation, à partir du moment où elle est passée par une phase d'apprentissage encadrée par l'humain.

Ainsi, appliquée à l'architecture, la pertinence de l'IA dépend de « la capacité des concepteurs à transmettre leurs intentions à la machine. Pour devenir un assistant fiable, la machine doit être formée, impliquant que les architectes relèvent deux défis principaux : sélectionner dans le vaste domaine de l'IA, les outils appropriés, et choisir un niveau d'abstraction pertinent et des qualificatifs mesurables, qui puissent être communiqués à la machine»²⁸, selon Stanislas Chaillou, chercheur en *Intelligence Artificielle* et architecture. En d'autres termes, pour que l'*Intelligence Artificielle* puisse générer de l'architecture, il faut que l'Homme le lui enseigne.

Pour répondre à cet enjeu, les recherches théorisées en 2014 par Ian Goodfellow chez Google Brain, sur les réseaux de neurones génératifs adverses (*Generative Adversarial Neural Networks*, GAN) sont particulièrement intéressantes. Les GAN ont la capacité de générer automatiquement des images qui n'existent pas mais qui semblent réelles. Par exemple, produire des clichés de visages humains de personnes qui n'existent pas.

Cela passe à travers un processus d'apprentissage très similaire à la manière dont l'Homme lui-même est formé. Les réseaux de neurones génératifs adverses (GAN) fonctionnent selon un binôme *générateur* (l'élève) / *discriminateur* (l'enseignant). Au préalable, l'utilisateur humain fournit une base



Portraits fictifs générés par un GAN. Le programme se base sur des visages de personnes réelles. Il en extrait des récurrences, des motifs (patterns), des similarités, qui lui permettent ensuite de construire de nouveaux visages, totalement artificiels.

Source : Nvidia

de données au GAN, dans notre exemple, des photographies de personnes qui existent réellement. Le *générateur* du GAN cherche ensuite à produire une image qui ressemble à cette base de données. Il crée un portrait fictif. Le *discriminateur* du GAN juge en retour la vraisemblance de l'image produite par le *générateur*. En d'autres termes, le *discriminateur* estime si l'image produite provient de la base de donnée initiale ou si elle a été créée par le *générateur*.

Plus le GAN est entraîné, plus il sera compliqué pour le *discriminateur* de discerner si l'image a été produite par le *générateur*, ou si elle provient de la base de données. Cela signifie que le *générateur* est capable de produire de lui-même des images de plus en plus réalistes.

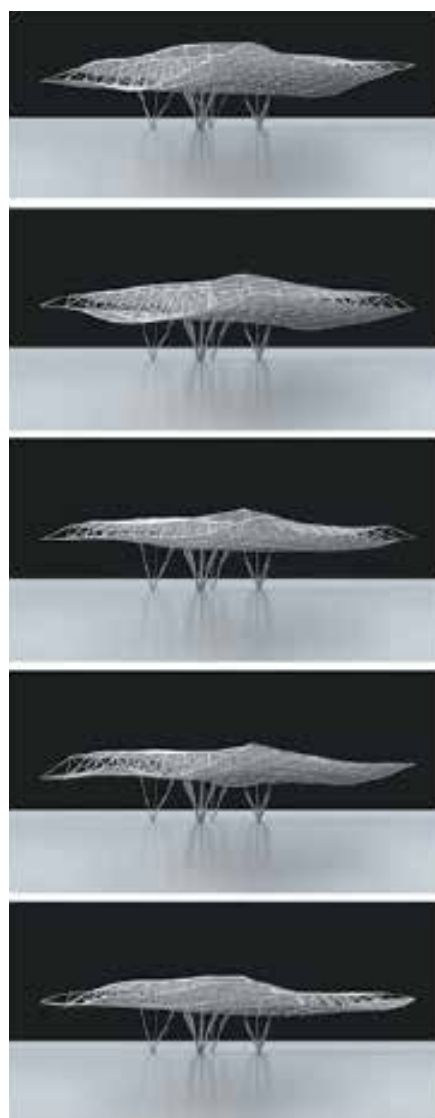
Ainsi, loin des débats passionnés autour de la place de l'Homme dans un univers où le potentiel de l'*Intelligence Artificielle* explose, nous pouvons nous poser la question de l'apport de l'IA dans la palette de l'architecte. Le GAN, qui peut générer des images automatiquement, représente un apport du numérique pour l'architecture. Nous l'avons établi précédemment, le numérique et le *paramétrisme* nous permettent de nous détacher dans une certaine mesure du processus empirique inhérent à l'architecture vernaculaire. Les GAN permettent d'aller plus loin dans cette direction.

Avec le *paramétrisme*, la modification d'un paramètre en entrée de la part de l'utilisateur engendre une et une seule modification en sortie, à la manière d'une fonction bijective, pour faire référence aux mathématiques.

Avec les GAN, la modification d'un paramètre en entrée de la part de l'utilisateur engendre plusieurs modifications en sortie, nous passons d'une fonction bijective à une fonction injective. Si les recherches sur le sujet sont encore jeunes et progresseront encore dans les années à venir, certains chercheurs ont déjà obtenu des résultats concrets pour l'architecture.

C'est par exemple le cas des chercheurs Caitlin Mueller et Renaud Danhaive du *Digital Structures Lab MIT* de Cambridge qui ont travaillé en 2018 sur la génération automatique de structures²⁹. Si la trame structurelle régulière s'est longtemps imposée comme la référence pour résoudre les problèmes de structure dans les bâtiments, les progrès de l'*Intelligence Artificielle* facilitent désormais le recours à des structures irrégulières, plus adaptées aux contraintes du bâtiment. En particulier, les chercheurs ont ici développé une structure en treillis, dont les tirants sont disposés par *Intelligence Artificielle* afin de minimiser la quantité de métal employé. Toutefois, il est important de comprendre que l'intérêt d'une telle démarche réside davantage dans la recherche de la forme que d'une réelle prouesse structurelle. Il n'est pas question ici de calcul de structure aux éléments finis. L'*Intelligence Artificielle* permet ici une exploration esthétique tout en gardant une cohérence structurelle par mimétisme, sans effectuer de calculs statiques longs et onéreux.

Les formes obtenues sont parfois contre-intuitives et ouvrent alors un nouveau champ d'exploration pour l'architecte. S'éloignant des schémas traditionnels, l'IA permet de faire des *sauts* dans l'imaginaire créatif du concepteur et devient force de proposition. Ainsi, la machine dépasse ici le stade d'assistant à la conception pour agir comme véritable partenaire de création. Bien entendu, cette recherche présente dans l'état un certain



Ci-dessus : Exemples d'images de structures aux performances semblables générées par utilisation d'une *Intelligence Artificielle*.

Source : MUELLER, DANHAIVE

29 MUELLER, C. DANHAIVE, R. Digital Structures Lab MIT, Exposition Pavillon de l'Arsenal - Intelligence Artificielle et Architecture. 02-04 2020

nombre de limites, à commencer par la pertinence structurelle de chaque treillis proposé .

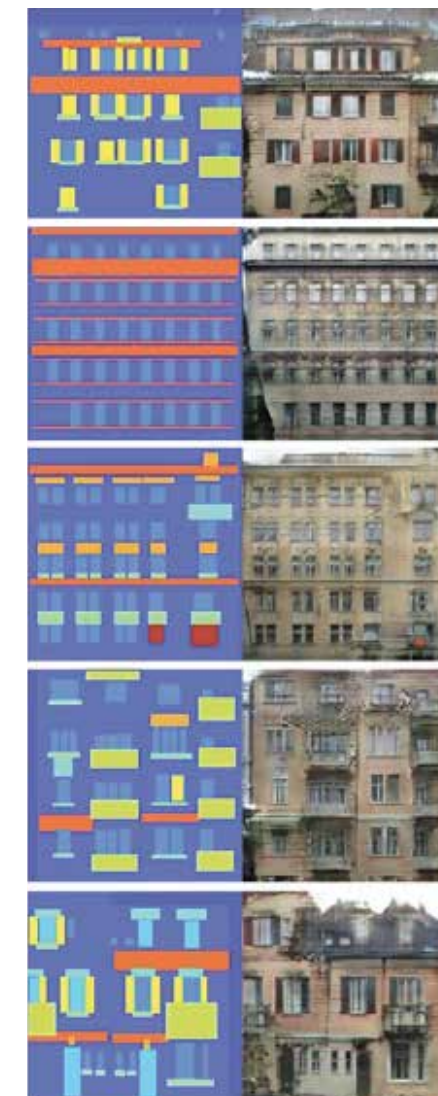
Néanmoins, cela doit nous amener à réfléchir sur la position du concepteur (qu'il soit architecte ou ingénieur) face au rôle grandissant que la machine occupe. En effet, si nous caricaturons la situation, nous pouvons légitimement avancer que le seul travail du concepteur est de fournir les bonnes données en entrée à la machine. En retour, il reçoit un catalogue de propositions, et par extension, délègue le processus créatif à l'intuition de la machine.

Cela est d'autant plus marquant dans le projet *Pix2pix*, mené en 2018 par des chercheurs de l'UC Berkeley Artificial Intelligence. Le projet permet d'entraîner un GAN à texturer la façade d'un bâtiment à partir d'un schéma très simple indiquant la position des éléments qui la structure (fenêtres, balcons, pilastres,...)³⁰. L'utilisateur transmet en entrée des éléments géométriques simples (rectangles de diverses dimensions) et reçoit en sortie une image de façade texturée, fonction de la manière dont le GAN a été entraîné. Si cela peut être pour le moment considéré comme une manière très limitée de faire de l'architecture, nous attirons l'attention sur la capacité de la machine à renforcer considérablement le vocabulaire technique voire esthétique de l'architecte. En effet, la simple création d'un carré bleu de la part du concepteur engendre une réponse automatique de l'IA qui génère une fenêtre avec sa matérialité, menuiserie, corniche, effet d'ombre et de profondeur dans le bâtiment,... Si cette approche relève davantage du domaine du décorateur que de l'architecte, elle nous informe néanmoins sur le potentiel de la machine et de l'*Intelligence Artificielle*.

Les recherches sur l'*Intelligence Artificielle* appliquées à l'architecture n'en sont encore qu'à leurs balbutiements. Néanmoins, la rétrospective que nous avons proposée dans ce chapitre sur l'influence du numérique et des nouvelles technologies sur l'architecture montre que seule une cinquantaine d'années séparent les travaux de Négroponte à la capacité de générer automatique de l'architecture. Nous insistons encore une fois sur le fait que, le propos n'est pas ici de céder à l'intimidation ni à la fascination de ces nouvelles possibilités, mais plutôt de prendre la mesure de l'*Intelligence Artificielle* pour ce qu'elle est. Le prolongement d'outils numériques qui, pour le moment du moins, sont incapables d'automatiser la sensibilité et l'intuition humaine, ainsi qu'un champ d'exploration de nouvelles typologies d'architectures et de manières d'habiter.

Enfin, un parallèle avec le jeu d'échec, peut nous permettre de prendre du recul sur l'apport réel de l'IA à l'architecture. Si l'ordinateur est - depuis 1997 avec la victoire du supercalculateur d'IBM, *Deep Blue*, sur le champion du monde d'alors, Garry Kasparov - capable de surpasser l'Homme, nous ne pouvons pas nier que l'engouement pour ce jeu persiste et des tournois sont toujours organisés à travers le monde entre êtres humains. Le fait que la machine surpasse l'humain dans cette discipline ne l'a pas rendue obsolète et vide de sens. Au contraire, observer des matchs entre ordinateurs permet de découvrir de nouvelles stratégies et élargit le répertoire de techniques des plus grands champions humains. Matthieu Cornette, grand maître international et champion de France d'échecs explique que l'ordinateur est capable de proposer des idées totalement inédites auxquelles les humains n'auraient vraisemblablement jamais pensé. Le *saut technologique*, permis par

30 ISOLA P, ZHU, J.-Y., ZHOU, T., EFROS, A., Image-to-Image Translation with Conditional Adversarial Networks, UC Berkeley artificial intelligence, Novembre 2018



A droite, *input*. Le concepteur donne en entrée des rectangles de différentes couleurs et dimensions.

A gauche, *output*. L'*Intelligence Artificielle* génère une image fictive, fonction de la manière dont elle a été entraînée.

.Source : *Pix2pix*

développement de l'ordinateur et de l'intelligence artificielle, bouleverse et transcende alors les siècles de stratégies mises au point par les humains³¹.

A propos des craintes que fait courir l'IA sur le devenir des ingénieurs et architectes, le cas du jeu d'échecs montre que l'ordinateur n'a pas remplacé l'humain dans cette discipline. Si des compétitions entre IA existent, elles servent de point de comparaison entre une Intelligence Artificielle et une autre, et permettent, nous l'avons dit, d'enrichir le répertoire des joueurs humains. En d'autres termes, si l'IA est aujourd'hui considérablement plus forte que l'humain, elle ne le remplace en aucun cas et devient au contraire un partenaire d'entraînement.

Ainsi, la comparaison entre jeu d'échecs et l'architecture à travers le prisme de l'intelligence artificielle est riche d'enseignements. Par le phénomène du *saut technologique* que nous avons évoqué, il est possible de bouleverser profondément les acquis que les architectes ont développés pendant des millénaires. Pour reprendre l'exemple de la terre comme matériau de construction, la frise (pp.34-35) démontre l'étendue de l'expérimentation humaine sur le matériau terre. Certaines des techniques que nous connaissons et employons encore aujourd'hui sont pourtant riches de plusieurs milliers d'années d'évolution et d'innovation via ce que Sennett décrit comme un *saut intuitif*.

L'avènement du *paramétrisme* et les manières innovantes d'associer les outils technologiques d'impression 3D au matériau terre constituent la première étape d'un nouveau saut, le *saut technologique*. Il est alors tout à fait envisageable que l'Intelligence Artificielle nous permette de découvrir de nouvelles manières de mise en œuvre de la terre, tout comme l'IA a contribué à la mise au point de stratégies inédites pour les joueurs d'échecs. Plus encore, nous avons choisi de développer en particulier le cas de la terre, mais ces *sauts technologiques* pourront tout autant se vérifier sur d'autres types de matériaux, à l'instar du bois dont les recherches pour le pavillon BUGA de l'ICD/ITKE ont déjà montré un fort potentiel.

L'exemple de Caitlin Mueller et Renaud Danhaive sur la génération automatique de structures semble poursuivre dans cette logique de *saut technologique*. L'ordinateur est en mesure de proposer des solutions structurelles auxquelles architectes et ingénieurs n'avaient pas pensé. Tout comme pour le joueur d'échecs, l'IA peut devenir un partenaire de conception pour l'architecte, et mettre en lumière des solutions structurelles, esthétiques ou techniques qui n'auraient peut-être jamais été envisagées autrement. A la manière du joueur d'échecs, il conviendra alors à l'architecte et à l'ingénieur d'adapter les enseignements de la machine, de croiser les *sauts technologiques* permis par les outils numériques avec les *sauts intuitifs*, sources d'un patrimoine constructif vernaculaire foisonnant, parfaitement adapté à son environnement. En cela il sera possible de tendre vers une architecture en lien avec le contexte social que nous connaissons, une architecture pérenne, à la hauteur des enjeux environnementaux et climatiques actuels.

³¹ Cornette, M. *Les plus belles idées de l'ordinateur en 2020* [En ligne] <https://www.youtube.com/watch?v=yXJGOJj4KSM> (consulté le 00/05/2020)



Œuvre de James Turrell dans laquelle la posture du spectateur est fondamentalement bouleversée. Ce dernier n'est plus placé devant mais dedans, et devient parti intégrante de l'œuvre.

Source : N/C

Synthèse -
L'ingénieur et l'architecte, une relation à redéfinir pour une architecture innovante, capable d'expérimenter

Note au lecteur : Sur la base des réflexions préalablement exposées, les lignes qui suivront, plus personnelles, seront l'occasion de s'interroger sur la répartition des compétences au sein du couple ingénieur/architecte pour l'inscrire de manière pertinente dans le monde. Ce chapitre sera ainsi l'occasion de développer la place que devrait occuper l'architecte et l'ingénieur dans le projet de diplôme, parallèle à ce mémoire.

Après 5 ans de bi-cursus, il me semble plus complexe de définir le rôle de l'ingénieur-architecte à présent qu'au début de ma formation. Mes expériences tant scolaires que professionnelles m'ont démontré qu'il existe autant de manières d'être ingénieur et architecte qu'il existe de manière de faire l'architecture. Ainsi, il semble que la capacité de construire relie ces deux disciplines. Peut-être est-ce ici un point de départ pour tenter de définir le rôle de l'un et l'autre.

A travers la notion de *capacité* se cache la notion de *savoir*, de *compétences*. Or, la répartition des compétences entre architecte et ingénieur agit sur la genèse du projet et partant, pose la question de l'origine du processus créatif. Selon le philosophe Gilles Deleuze (1956–1995), avant même d'émerger, l'idée est déjà conditionnée par le passé, les influences, le domaine d'activité de son auteur. «Une idée, elle est déjà vouée, tout comme celui qui a l'idée, est déjà à tel hauteur, domaine. Je veux dire que une idée, c'est tantôt une idée en peinture, tantôt une idée en roman, tantôt une idée en philosophie, tantôt une idée en science. Et c'est évidemment pas le même qui peut avoir tout ça»¹. En d'autres termes, la *page blanche* n'existe pas. Appliquée à l'architecture, développer une création pertinente, demande à l'ingénieur ou à l'architecte, de remettre en cause les présupposés qu'il tient de sa formation et de ses expériences. En d'autres termes, cultiver un imaginaire propice à l'innovation demande à son auteur d'être capable de *blanchir* la page.

Peut-être est-ce là le rôle de l'ingénieur-architecte ? Un constructeur capable de mettre en parallèle les logiques de l'ingénieur et de l'architecte pour prendre davantage de recul sur le projet, et partant, avoir plus de facilité à *blanchir* la page.

Sans apporter de réponse tranchée, il semble néanmoins que le numérique facilite le croisement de compétences des différents acteurs et permette de transcender le projet architectural. En effet, avec l'explosion du BIM (*Building Information Modeling*) les rôles de l'architecte et de l'ingénieur sont en pleine mutation. Pour rappel, le BIM est une méthode qui permet de regrouper tous les corps de métiers autour d'une maquette numérique du projet. Si les architectes sont formés à ces outils, ils doivent à présent composer avec des bureaux d'ingénierie spécialisés dans ces méthodes. Ainsi, la diffusion de ces outils et, par extension, du *savoir* à des ingénieurs spécialistes interroge sur la pérennité du rôle de *chef-d'orchestre* de l'architecte. En effet, le travail de synthèse qui a désormais lieu numériquement autour d'une maquette digitale, ne nécessite plus nécessairement l'expertise de l'architecte. Plus encore, face à la puissance de l'outil informatique, il semblerait vain d'aller à l'encontre de cette tendance qui permet de centraliser et synthétiser des systèmes d'information complexes. Pour autant, faut-il craindre que le numérique remplace l'architecte ?

Plutôt que *remplacer*, le verbe de *déplacer* serait plus propice. En effet,

¹ DELEUZE, G. *Conférence des mardis de la fondation Fémis*, 17/05/1987. [En ligne] <http://www.webdeleuze.com/>

considérer que l'émergence d'outils technologiques réduit le domaine d'expertise de l'architecte serait nier les nouveaux territoires à explorer qu'ils apportent avec eux. Un champ d'expérimentation s'ouvre à la profession qui, si elle s'en empare, sera en mesure de piloter l'ensemble des disciplines qui gravitent autour de ces systèmes intelligents.

Les laboratoires tels que l'ICD/ILEK de Stuttgart, le Digital Structures Lab du MIT ou encore de l'IAAC symbolisent le foisonnement de nouvelles techniques constructives que le numérique amène. Cela permet d'aborder la construction autour d'une approche innovante, technique et rationnelle de l'architecture. Il est important de préciser que les travaux de ces laboratoires appartiennent au domaine de la recherche, et n'ont pas pour vocation d'être appliqués à grande échelle dans un futur proche. Néanmoins, considérer les recherches développées comme une source d'inspiration pour l'architecture est une manière pertinente de favoriser le croisement des compétences.

Ainsi, inciter les architectes à expérimenter en laboratoires leur permettrait, peut-être, d'oser prendre le risque d'intégrer ces recherches à des projets de grande échelle. La recherche entretiendrait alors un lien plus étroit encore avec le milieu et sa dimension sensible. Formés aux enjeux sociaux voire politique de l'architecture, les architectes pourraient enrichir de l'intuition et du ressenti humain une réflexion basée sur la rationalisation de la nature, permise par la collecte massive de données et la puissance de calcul de l'informatique.

L'architecte doit dès lors évoluer de sa fonction de *chef d'orchestre* pour s'approprier pleinement le paradoxe dans lequel l'architecture se trouve actuellement. Si la recherche et la technologie ont permis des prouesses d'ingénierie, elles ont aussi conduit à éloigner considérablement l'humain de son milieu naturel.

Dans le même temps, en réponse aux crises environnementales et sociales actuelles, l'humain est en quête du lien primaire qui l'unit à son environnement, à la manière de ce que Claude Lévi-Strauss exprimait dans *Le Regard Éloigné*. «Nous apprenons [...] à mieux aimer et à mieux respecter la nature et les êtres vivants qui la peuplent en comprenant que végétaux et animaux, si humbles soient-ils, ne fournissent pas seulement à l'homme sa subsistance, mais furent aussi, à ses débuts, la source de ses émotions esthétiques les plus intenses, et, dans l'ordre intellectuel et moral, de ses premières et déjà plus profondes spéculations»². Le terme esthétique résonne tout particulièrement derrière son étymologie latine *aisthêsis*, la capacité de sentir, de percevoir à travers les sens et le corps.

Comment faire en sorte que, plus qu'une donnée quantifiable thermique, les rayons de soleil d'un matin d'hiver deviennent grâce à l'architecture un moment de plaisir, sinon d'émotion pour l'habitant ? Le chant des oiseaux, le bruissement des feuilles sous le vent, le fracas d'un orage ne sont-ils pas autant de vecteurs d'architecture ?

Le couple ingénieur/architecte doit alors faire évoluer sa manière de penser l'architecture, cultiver plus encore le paradoxe dans lequel il se trouve sans en supprimer un des deux termes pour le rendre plus accessible. S'il n'existe peut-être aucune solution idéale, s'en approcher passe peut-être par une conscience permanente du paradoxe actuel, et par l'in-

² LEVI-STRAUSS, C., *Le Regard éloigné*, Paris, Plon, 1983, p. 16.



tersection des savoirs qui nourrissent ce paradoxe. Peut-être qu'alors il sera possible de dessiner une architecture plus vertueuse. Concrètement, l'expérimentation à toutes les échelles semble être nécessaire pour imbriquer plus fortement les compétences de l'architecte et l'ingénieur. Cela demande de remettre en question nos acquis, de tenter de *blanchir la page* à tous les niveaux de création du projet et interconnecter ces différents niveaux entre eux. Reconsidérer le rapport de l'architecture à la matière, aux outils employés, à la société sont autant d'éléments à expérimenter de concert pour architectes et ingénieurs. Finalement, peut-être est-ce là le rôle de l'ingénieur-architecte : remettre en question, explorer et interconnecter toutes les échelles du projet d'architecture.

Ainsi, le projet mené en parallèle de ce mémoire tente de prendre en considération les différentes échelles de réflexion et de les lier les unes avec les autres.

De fait, le projet de diplôme découle d'une vision à large échelle qui s'appuie sur le constat établi en introduction : face à l'épuisement des ressources et à la crise climatique qui menace des populations entières, l'architecture doit se réinventer. En conséquence de cette volonté quasi politique, le choix du site doit s'inscrire dans une démarche sociale et constructive innovante.

Le traitement des terres excavées pour les tunnels de métro du *Grand Paris Express* se présente comme une opportunité d'interroger le rapport qu'entretiennent le site et le projet. En effet, pour trier et revaloriser cette quantité colossale de déblais (400 millions de tonnes de terre³), de nombreux points de traitement ont vu le jour en Île-de-France. Parmi ces derniers, nous trouvons d'anciennes carrières, telle que celle de la Fosse-Maussoin, à Clichy-Sous-Bois (93). La structure lacunaire du sous-sol - engendrée par l'exploitation du gypse (nécessaire à la création du plâtre) - est désormais comblée par les déblais du *Grand Paris Express*.

Vestige de la forêt de Bondy décimée par l'étalement urbain, la végétation de la Fosse-Maussoin s'éclaircit davantage pour laisser place, entre 1860 et 1940, à l'exploitation de la carrière. Le sous-sol du site a été creusé pour en extraire le gypse. La matérialité du sous-sol a donc été excavée puis extrudée ailleurs pour permettre la création de nouveaux bâtiments.

Aujourd'hui, il se passe le processus inverse. Une partie de la terre excavée du *Grand Paris Express* est à présent stockée dans le sous-sol de la Fosse-Maussoin et comble le vide engendré par l'exploitation de la carrière.

Ainsi, le site porte encore les marques de nombreux changements brutaux qui se sont succédés. Ces événements le lient profondément à sa matérialité, et en particulier à la terre.

Une approche sensible semble alors indispensable pour saisir tout le potentiel de la Fosse-Maussoin. Dans la lignée de la pensée de Lévi-Strauss dans *Le Regard Eloigné*, la matérialité du projet doit participer à la quête du lien primaire qui lie l'humain à son environnement. Le choix de la terre comme matériau de construction apparaît dès lors comme une manière pertinente de prolonger la dimension sensible du site dans le projet.

Ainsi, l'analyse du contexte social et environnemental du projet à

Ancienne carrière de la Fosse Maussoin en 2013. Les galeries ont depuis été dynamitées, pour faciliter le remblaiement avec les terres excavées du *Grand Paris Express*.

Source : Loul



En haut (décembre 2011) : photo satellite du site de la Fosse-Maussoin (délimité en rouge), entièrement recouvert par la végétation en. Au milieu (avril 2014). En bas (juillet 2019).

Longueur transversale : environ 480 mètres.
Longueur longitudinale : environ 580 mètres.

Source : Google Earth

³ Exposition Terres de Paris, Pavillon de l'Arsenal. Sous la direction de l'agence d'architecture Joly & Loiret

des échelles très variées démontre l'importance du rôle de l'architecte dans sa capacité à cerner et établir les enjeux clefs auxquels le projet devra répondre.

Cela marque un deuxième temps dans la conception du projet. Cette étape concrétise le processus créatif et renforce le croisement de compétences entre l'architecte, l'ingénieur et le chercheur.

En effet, ce mémoire a été l'occasion de montrer que l'innovation, qu'elle provienne de l'humain, de l'outil ou de la matière, rythme l'évolution de l'architecture. Ainsi, après avoir convoqué différentes strates et analyses du contexte environnemental et social, et sans avoir la prétention de révolutionner la discipline, le projet tente de s'inscrire dans la lignée des exemples d'architectures innovantes présentées dans les chapitres précédents.

Dans un contexte de raréfaction de la nature au profit de l'étalement urbain, la Fosse-Maussoin se présente comme un îlot de végétation au cœur de la ville. Il semble ainsi important de l'envisager comme un carrefour à l'intersection de différentes échelles, celle du quartier pour les riverains, celles d'éco-systèmes complets pour la faune et la flore. Le projet de diplôme mené en parallèle de ce mémoire doit alors être capable de remettre en question la manière dont notre territoire s'étend sur la nature. En cela, nous devons envisager les lieux sur lesquels nous agissons comme des espaces mutualisables, et les réinventer pour qu'ils puissent répondre à plusieurs fonctions

En conséquence, considérer l'ancienne carrière de la Fosse-Maussoin comme un parc, une respiration, à l'échelle du quartier semble nécessaire pour lutter contre l'étalement urbain mais insuffisant. Ainsi, le parc doit devenir une entité capable de polariser différentes fonctions ce qui permettrait, par exemple, de le lier à un programme de centre funéraire. En effet, l'émergence de *forêts de la mémoire* qui permettent aux proches de disperser les cendres du défunt auprès d'arbres⁴, ou les résultats probants et plébiscités sur la transformation des corps en engrais⁵ présagent de nouveaux champs d'exploration pour l'architecture mortuaire et les espaces végétalisés.

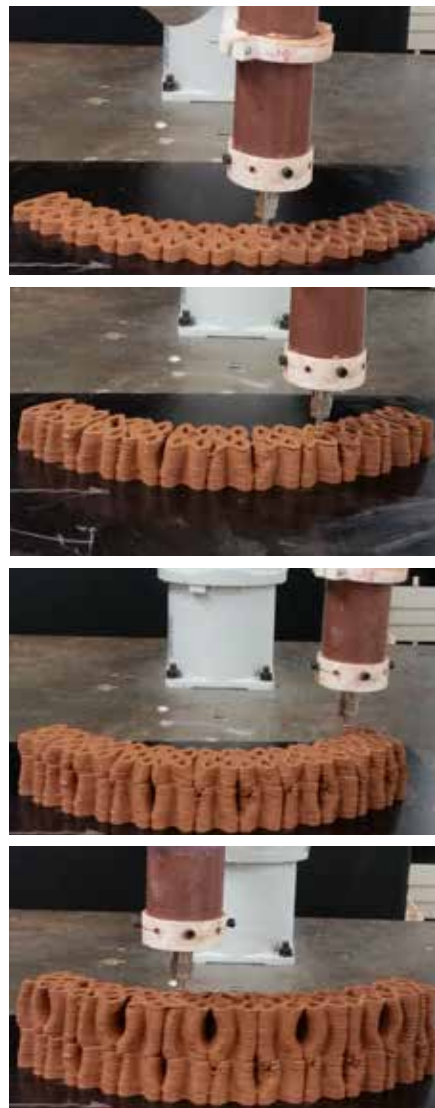
Afin de soutenir et renforcer ces considérations environnementales et sociales, la démarche constructive du projet doit, elle aussi, être remise en question. Cela passe par divers facteurs, mais il semble que le choix du matériau de construction soit l'un des plus déterminant.

Nous l'avons évoqué, utiliser la terre comme matériau de construction s'inscrit parfaitement dans le contexte historique et matériel du site de la Fosse-Maussoin. Cependant, les exemples de constructions en terre présentés dans le mémoire tels que ceux du Mzab, de Martin Rauch ou de l'IAAC démontrent qu'il est possible d'utiliser un même matériau de diverses manières. Tout l'enjeu du projet sera de tirer profit au maximum de la matière, de la détourner, pour en exploiter tout le potentiel.

Par ailleurs, le stage que j'ai eu la chance de réaliser au sein de l'Institute for Advanced Architecture of Catalonia donne au projet de diplôme une profondeur et une échelle d'étude supplémentaire. A travers les expé-

⁴ IYER, R. HATTON, E. *Memory forests: designing the future of cemeteries*, Landscape, Australia [En ligne] <https://landscapeaustralia.com/articles/memory-forests/>

⁵ GHOSH, P. *Human compost funerals «better for environment»*. BBC News, Seattle. [En ligne] <https://www.bbc.com/news/science-environment-51389084>



rimentations que j'ai pu réaliser ou auxquelles j'ai pu assister, le stage vient compléter par la pratique les exemples de démarches constructives innovantes exposées dans le mémoire. De cette manière, la recherche effectuée à l'IAAC constitue une source d'inspiration conséquente pour le développement du projet de diplôme.

En effet, cette période passée à l'IAAC a ainsi permis d'amorcer un travail d'allers-retours entre les dessins du projet de diplôme et la mise en pratique de ces derniers par l'expérimentation en laboratoire. De l'étude des prototypes réalisés découle un ajustement du dessin du projet, et permet d'affiner les expérimentations suivantes. Les photographies ci-contre sont ainsi le début d'une campagne de tests visant à ciseler finement le dessin d'un mur de terre crue imprimée 3D, à la structure ajourée. Ce premier prototype est encore très perfectible (dimension et position des ouvertures à déterminer avec plus de pertinence en fonction de l'espace que le mur génère et protège, alternance et rythme plus ou moins régulier, lien entre le mur et le plancher ou d'autres éléments structurels du projet), mais donne un bon aperçu du potentiel de l'impression 3D. L'outil technologique permet de produire des volumes aux qualités remarquables. En particulier, cela confère au matériau terre une certaine légèreté et finesse, si bien qu'il peut sembler que le prototype est tricoté à la manière d'un vêtement, par un filament de terre. Plus encore, le recours à l'impression 3D génère une texture stratifiée unique, signature de cet outil de fabrication.

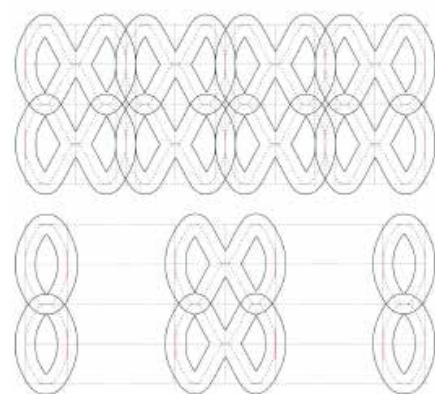
Même si la phase d'expérimentation en laboratoire s'est arrêtée brutalement suite aux mesures sanitaires liées à la Co-vid, l'immersion au sein de l'IAAC m'a permis de réaliser la richesse esthétique, structurelle et constructive de l'association de la terre avec l'outil d'impression 3D. Il est ainsi possible d'envisager le bâtiment imprimé en terre comme un seul et même élément continu. Ainsi, ce premier prototype démontre qu'avec un outil suffisamment mobile, il est envisageable de considérer la partie imprimée du projet comme un seul et même élément continu.

Cela ouvre alors des perspectives intéressantes quant au lien à établir entre les supports nécessaires pour rendre le robot entièrement mobile et le projet lui-même. En effet, dans le souci de construire en économisant les ressources, il est peut-être antithétique d'élaborer une structure capable de soutenir les rails du robot, pour ensuite la retirer. Plus que de participer à sa production, une telle structure doit alors être partie intégrante et faire corps avec le projet. Dans la lignée d'un mémoire qui prône l'innovation par le détournement de l'outil et de la matière, qui place la conception et l'expérimentation comme une manière d'économiser les ressources et l'énergie, qui plebiscite une architecture de contexte, vernaculaire en un sens, le projet de diplôme doit tendre vers un optimum du processus constructif.

A la manière des sauts intuitifs et technologiques présentés, la conception du projet tentera d'approcher l'innovation en confrontant l'outil technologique aux conditions matérielles et environnementales de la Fosse-Maussoin. Dans la mesure où il s'agit d'un projet d'étudiant, les expérimentations resteront théoriques. De fait, il est possible que les solutions retenues dans le projet tiennent parfois davantage d'un idéal constructif, que d'une réalité concrète. Par ailleurs, compte tenu de l'aspect technologique et expérimental des outils de fabrication, le projet de diplôme anticipe des méthodologies constructives qui pourraient se démocratiser d'ici 10 ou 15 ans, renforçant ainsi l'aspect hypothétique et abstrait de certaines décisions. Néanmoins, dans un souci de cohérence, les libertés prises par le projet ne sont jamais

Premier test d'impression 3D d'un mur du projet de diplôme. Cette expérience s'inspire du projet *Porous Wall* mené par l'IAAC sur la période de mon stage. Le projet de diplôme adapte la logique structurelle qui donne naissance aux diverses ouvertures du *Porous Wall*, pour répondre à ses propres besoins. La solution retenue a ensuite été testée à petite échelle à l'IAAC.

Source : Photo personnelle



Vue en plan du chemin d'impression de différentes strates, qui ont permis le projet *Porous Wall*. Ce chemin d'impression a ainsi servi de base à l'élaboration du prototype présenté ci-dessus.

Source : IAAC

gratuites et s'inscrivent dans une volonté permanente d'innovation et de pertinence vis-à-vis du contexte environnemental, matériel et social.

Ainsi, dans la continuité des expérimentations sur une structure imprimée 3D capable de générer des ouvertures, le projet prolonge le concept du prototype réalisé à l'IAAC et tente d'établir une manière optimale de produire une structure avec une ouverture à plus grande échelle, une voûte. A la lumière des démarches constructives, telles que celles entreprises dans le *restaurant Noel* de Junya Ishigami, le projet de diplôme est l'occasion de réfléchir à la meilleure manière de détourner le matériau terre. Cela permet d'en extraire le maximum de ses capacités, tout en optimisant l'emploi de ressources et d'énergie pour réaliser le projet. L'esthétique du projet naît alors en partie de la confrontation des échelles, du rapport entre les ouvertures de grandes et de petites dimensions.

Cette esthétique est renforcée par l'attention que le projet se doit d'apporter aux visiteurs quotidiens ou exceptionnels d'un lieu si particulier qu'est le centre funéraire. Dans une société qui applaudit de sa fenêtre à 20h les personnes aux métiers souvent peu reconnus, pourtant qualifiés d'essentiels, il incombe à l'architecte de traiter avec un profond respect les travailleurs funéraires. De fait, le projet de diplôme doit concevoir les espaces que certaines personnes arpenteront quotidiennement pendant des années, espaces qui seront l'occasion de témoigner de la reconnaissance de la société envers ces professions peu désirées.

Concevoir l'architecture pour les personnes qui la fréquentent permet ainsi de revenir à une échelle plus sensible, dont l'approche constructive et technique nous aura parfois éloigné. Dans un site à la topographie marquée et au rapport à la nature fort malgré la proximité de la ville, il convient de faire du projet de diplôme une architecture capable de cultiver le paradoxe énoncé précédemment. Une architecture fondée sur des prouesses ingénieuses et technologiques, qui parvient malgré tout à maintenir l'être humain proche de son milieu naturel. Pour cette raison, le lien entre le projet, la végétation existante, et la végétation qui viendra recouvrir le paysage lunaire créé par le remblaiement de l'ancienne carrière sera considéré avec autant de soin.

Le mémoire aura ainsi permis au projet d'ouvrir considérablement ses horizons, d'envisager de nombreuses échelles de travail. Si cela reste sans doute perfectible, toutes les dimensions auront été questionnées pour permettre d'élaborer un projet cohérent, doté d'une ligne de conduite telle qu'établie en préface de ce mémoire. Un projet qui naît d'une nécessité forte, porté par une innovation sociale et technique. Le projet de diplôme se veut donc capable de mettre en évidence une démarche novatrice qui tente de lier intimement les dimensions sensibles, sociales, politiques, environnementales et constructives.



Échafaudages *Gmündertobelbrücke*, Suisse - R. Coray (1907-08). Malgré leur éphémérité, les structures d'échafaudages sont, dans certains cas, de véritables prouesses techniques, et constituent un architecture à part entière.

Source : ETH Zurich



Restaurant Noel (Yamaguchi, Japon) - Junya Ishigami. En creusant dans le site du projet, l'architecte détourne la terre est en un coffrage pour le béton.

Source (de haut en bas) : BMIAA ; Designmag.com ; Architectura viva

Global Warming Potential (GWP)

Rammed earth (RE)	23 g CO ₂ per kg
Aggregates	5 g CO ₂ per kg
Portland cement (OPC)	836 g CO ₂ per kg
Stabilized RE (5 to 10% OPC)	64 to 106 g CO ₂ per kg
Ordinary concrete (25 MPa)	138 g CO ₂ per kg

Comparaison du potentiel de réchauffement climatique pour du béton d'argile et du béton de ciment Portland.

Source : Van Damme Henri (MIT), Houben Hugo (CRATERRE-ENSAG)

ANNEXES

1) Stabilisation de la terre crue au ciment

Nous l'avons évoqué, les propriétés mécaniques de la terre dépendent partiellement des éléments stabilisateurs. L'un des plus couramment utilisés est le ciment. Stabiliser le matériau terre par le ciment peut dans une certaine mesure décrédibiliser l'aspect écologique de la terre comme matériau de construction.

En bref, ajouter une petite partie (5 à 10%) de ciment afin de stabiliser la terre engendre une production de CO₂ assez proche d'un béton classique, cela malgré une résistance à la compression bien moindre ! Afin de déterminer précisément l'efficacité de la stabilisation et son impact environnemental en rapport avec le gain en performance mécanique, 2 outils sont utilisés.

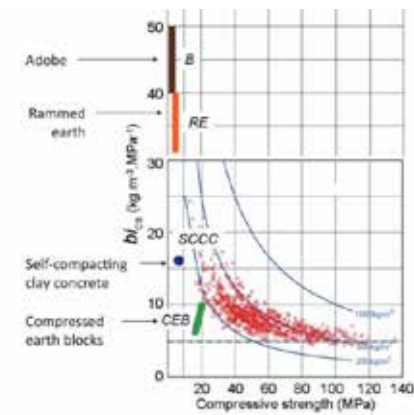
L'indice d'intensité liante (binder intensity index) qui répond à la question « combien de ciment je dois incorporer pour obtenir une résistance à la compression de 1MPa ? ». Il s'écrit comme le rapport de la masse volumique de ciment b (en kg de ciment/m³) sur la force de compression s (MPa) tel que : $bi = b/s$.

L'indice d'intensité carbone (carbon intensity index) répond à la question : « combien de CO₂ dois-je émettre pour obtenir une résistance à la compression de 1MPa ? ». Il s'écrit comme le rapport de la masse volumique totale émise de CO₂ (kg de CO₂/m³) sur la force de compression s tel que : $ci = c/s$.

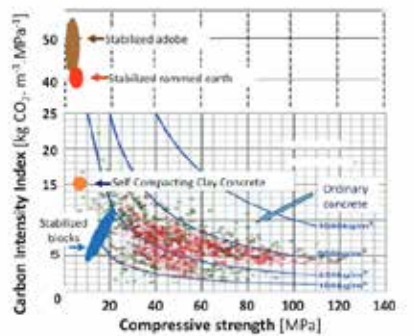
Par le biais de ces indices, on peut obtenir les graphes ci-contre. Le nuage de point rouge correspond à une multitude de variétés de béton réalisé à partir de ciment Portland. Pour résumer trivialement ce premier graphique, les « meilleurs » matériaux sont ceux les plus proches de l'abscisse, puisqu'ils demandent une quantité moindre de ciment pour une résistance à la compression nominale. Ainsi, il convient de remarquer que la manière la plus écologique d'utiliser le ciment est encore de faire du béton. Cette conclusion est d'autant plus frappante lorsque l'on s'attarde sur le second graphe.

Comme le précédent, les « meilleurs » matériaux, ceux qui émettent le moins de CO₂ pour une résistance à la compression nominale, sont ceux les plus proches de l'abscisse. Nous réalisons alors que la terre stabilisée au ciment agit comme un béton avec des performances environnementale et mécanique moindre.

Cette première conclusion nous amène à penser que, pour la raison de démarche constructive soutenable (au sens du rapport Brundtland en 1987 à l'ONU) que nous cherchons à mettre en œuvre dans le projet de diplôme, il ne sera pas envisageable de stabiliser la terre au ciment. Si nécessaire, nous nous appuyerons sur une structure en béton de ciment, ou d'un autre matériau que la terre tel que le bois par exemple. Enfin, si nous devons stabiliser le matériau terre, nous nous tournerons vers des méthodes de stabilisation par molécules naturelles, puisque ce champ a également été



Grphe comparatif indice d'intensité liante. Source : Van Damme Henri (MIT), Houben Hugo (CRATERRE-ENSAG)



Grphe comparatif indice d'intensité carbone. Source : Van Damme Henri (MIT), Houben Hugo (CRATERRE-ENSAG)

l'occasion de nombreuses recherches¹.

2) Stabilisation de la terre crue par molécules naturelles

Si la stabilisation par le ciment est aujourd'hui répandue, de nombreux biopolymères existent. Cela a été scrupuleusement étudié, à l'échelle moléculaire, afin de comprendre comment la fraction argileuse dans le matériau terre interagit avec les molécules d'origines végétales utilisées pour stabiliser le matériau terre.

Une étude menée dans le cadre du PNRCC (Programme National de Recherche sur la Connaissance et la Conservation des matériaux du patrimoine culturel) par le laboratoire CRATERRE démontre le rôle de plusieurs colloïdes minéraux présents dans la terre tels que les oxydes de fer, l'aluminium et le silicium dans la stabilisation de la terre par molécules naturelles.

Ainsi, afin de mettre en évidence l'impact des oxydes et de l'argile sur les stabilisateurs naturels, une partie de la recherche s'est portée sur le triptyque kaolinite (argile)/hématite (oxyde de fer)/amidon anionique (biopolymère). Les chercheurs ont montré que les oxydes de fer (plus petits et plus abondants que la kaolinite) recouvrent la surface de l'argile.

Les surfaces d'argile présentent une charge permanente négative tandis que les oxydes présentent une charge variable (positive à pH acide, négative à pH basique). De cette manière, l'efficacité de polymère servant à stabiliser le matériau terre dépend du pH de la solution. Illustrons ce point par un exemple. A pH basique, l'amidon anionique (polymère chargé négativement), l'argile (charges permanente négative) et l'oxyde (charge variable, négative en pH basique) se repoussent fortement car tous de même signe. En revanche, avec un pH plus acide, les oxydes de fer se chargent positivement et attirent les molécules d'amidon. Ainsi, pour que la stabilisation soit la plus efficace possible, il convient de surveiller le pH de l'eau².

3) Quantité d'énergie pour produire une coulée d'acier

Illustrons par raisonnement au premier ordre : nous pouvons raisonnablement considérer que la production d'1 m³ d'acier consomme 60.000 kWh³. Une coulée d'acier dans une usine de sidérurgie représente entre 150 et 350 tonnes d'acier liquide⁴. En prenant une masse volumique d'acier de 8 tonnes/m³, nous pouvons alors considérer que la coulée représente entre 19 m³ et 44 m³. D'un point de vue énergétique avec la valeur énoncée précédemment (i.e. 60 000 kWh/m³), cela représente donc entre 1 140 000 kWh (soit 1,14.10⁶ kWh) et 2 640 000 kWh (soit 2,64.10⁶ kWh). Afin de donner plus de relief à ces chiffres relativement abstraits, nous pouvons les comparer à des données sur lesquelles nous avons plus de recul.

Selon EDF, la France a consommée en 2016 la quantité totale de 478

¹ VAN DAMME, H., HOUBEN, H. Should raw earth be improved? An environmental assessment. Terra Lyon 2016

² MOEVUS-DORVAUX, M., COUVREUR, L., FONTAINE, L., ANGER, R., DOAT, P., RONSOUX, L., JORAND, Y., OLAGNON, C., MAXIMILIEN, S. Environmental-clay-based concrete. Terra Lyon 2016

³ FUTURA-SCIENCE. La fabrication de l'acier [en ligne]. Disponible sur : <https://www.futura-sciences.com/sciences/questions-reponses/matiere-fabrication-acier-835/> (consulté le 15/11/2019)

⁴ REICHEL, Alexander ; SCHNELL, Gerald, Op. Cit. p.111

TWh⁵, soit, ramenée sur 365 jours : 1,31 TWh/jour = 1,31.10⁹ kWh/jour. Par habitant (en considérant 70 millions de français) cela représente 18,7 kWh/jour/habitant. Ces chiffres ne tiennent pas seulement compte de la consommation d'un français moyen mais englobent aussi ceux essentiels au fonctionnement économique et industriel du pays. Ainsi, ramené à la quantité d'électricité par habitant, une coulée entre 150 et 350 tonnes d'acier liquide représente une demande quotidienne située entre environ 61 000 et 141 000 personnes, soit l'équivalent de villes de Quimper et Le Mans.

4) Comparaison de la résistance à la compression de différents matériaux

Exemple du cas du pisé (comprimé à 90-95% Proctor standard). Nous trouvons dans l'ouvrage du CRATerre une valeur de résistance à la compression de 2MPa pour une masse volumique de 1800 kg/m³.

Nous considérons arbitrairement que la hauteur totale du mur est de 2,3 m, que sa longueur est de 1 m et qu'il est parfaitement parallélépipédique. Ainsi, connaissant la résistance à la compression de 2MPa du pisé, un rapide calcul nous permet de déterminer qu'il faut un mur de section 1x0,5m² pour reprendre l'effort de 1MPa auquel le mur est soumis. Pour aller plus loin, nous pouvons aussi à cette charge ajouter le poids propre que le pied du mur reçoit en multipliant son volume par la masse volumique. De cette manière, on obtient pour le cas du pisé une épaisseur de 52cm.

5) Comparaison de la résistance thermique de différents matériaux

Exemple du cas du pisé (comprimé à 90-95% Proctor standard). On trouve dans l'ouvrage du CRATerre une valeur référence pour la conductivité thermique de 0,81 W/K.m. Pour un mur d'épaisseur 50cm, on a une résistance thermique équivalente de :

$$R_{th} = \text{épaisseur mur (emur)} / \text{conductivité} = 0,35/0,81 = 0,432 \text{ K.m}^2/\text{W}$$

$$\text{D'où, U-value} = 1 / R_{th} = 2,314 \text{ W/K.m}^2.$$

Dans le cas d'une structure en maçonnerie où les matériaux s'assemblent brique par brique, le calcul est similaire, mais il convient d'abord de faire la somme des résistances thermiques de chaque brique et chaque joint (dans notre cas, de l'argile de conductivité thermique 0,5 W/K.m) pour obtenir la résistance thermique équivalente. Nous pouvons ensuite prendre son inverse et obtenir la U-value (déperdition thermique) du matériau.

⁵ EDF. *La consommation d'électricité en chiffres* [En ligne]. Disponible sur : <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/le-developpement-durable/la-consommation-d-electricite-en-chiffres> (consulté le 15/11/2019)

BIBLIOGRAPHIE

Livres

- CARPO, M. *The Alphabet and the Algorithm*, Cambridge (MA), The MIT Press, 2011
- BANHAM, Reyner. *L'architecture de l'environnement bien tempéré*. Editions : HYX, Orléans, 2011
- FRAZER, J. « The Architectural Relevance of Cyberspace », M. Pearce, N. Spiller, *Architects in Cyberspace*, AD Profile 118, AD 65, novembre-décembre 1995, Chichester, John Wiley & Sons
- FRAZER, J., *An Evolutionary Architecture*, Londres, AA Publications, 1995
- GABUS Jean, extrait de *Vie et coutumes des Esquimaux Caribous*, 1943. Consulté pendant l'exposition Ichoumani, Musée Ethnographique de Neuchâtel (MEN), juin 2019
- GRAMAZIO, F., KOHLER, M., LANGENBERG, S., PETERS, B. « Building Bytes: 3D-Printed Bricks » dans *Fabricate: negotiating design & making*, London, Edition : UCL Press, 2017
- HOUBEN, H., GUILLAUD, H. *CRAterre - Traité de construction en terre*. Editions parenthèses. Marseille, 2006.
- KOOLHAAS, Rem. *Delirious New York*. Editions: 010 Publishers, 1994
- LEVI-STRAUSS Claude, *Tristes tropiques*. Editions : Terre humaine poche, janvier 2009
- LEVI-STRAUSS Claude, *La pensée sauvage*. Editions : pocket, septembre 2008
- LEVI-STRAUSS, C., *Le Regard éloigné*, Paris, Plon, 1983
- MEADOWS, D. H., MEADOWS, D.L., RANDERS, J., BEHRENS, W., *The Limits to Growth - a report for the club of Rome's project on the predicament of mankind*. Editions : Universe Book, New York, 1972.
- MINKE, G. *Buildin with earth - Design and technology of a Sustainable Architecture*. Editions : Birkhäuser, Bâle, 2013
- NOAH-HARARI, Yuval. *Sapiens A brief History of Humankind*. Editions : Signal Books, 2014
- PICON, Antoine. *Culture numérique et architecture – Une Introduction*. Editions : Birkhauser Fr, avril 2010
- POTTIER, Philippe. *André Ravéreau, l'atelier du désert*. Editions : Parenthèses. Marseille, 2003
- POUILLON, Fernand. *Les pierres sauvages*. Editions du Seuil. France, Avril 2008
- RAUCH, Martin, Haus Rauch, Basel, Birkhäuser GmbH, 2011
- RAVEREAU, André. *Le Mzab, une leçon d'architecture*. Editions : Sindbad, 1981
- SENNETT, Richard. *Ce que sait la main. La culture de l'artisanat*, traduit de l'américain par Pierre- Emmanuel Dauzat, Paris, Albin Michel, 2010
- GRAMAZIO, F., KOHLER, M., LANGENBERG, S., PETERS, B. *Fabricate: negotiating design & making*, London, Edition : UCL Press, 2017
- ULRICH, D. *Sustainable Architecture in Voralberg: Energy concepts and construction systems*, Bâle, Birkhäuser, 2010

Articles

- CHRONIS, A., DUBOR, A., CABAY, E., ROUDSARI, M. « Integration of CFD in Computational Design - An evaluation of the current state of the art » dans *eCAADe 35*, Volume 1, Novembre 2017.
- LYNN, G. « Architectural Curvilinearity : the Folded, the Pliant and the Supple », dans *Folding in Architecture*, AD Profile 102, AD 63, mars-avril 1993 (réédition augmentée 2004), Chichester, John Wiley & Sons.

SHKOLNIK, A.; TAYLOR, C. R.; FINCH, V.; BORUT, A., *Why do Bedouins wear black robes in hot deserts ?* Nature, Vol. 283, pp. 373-374, 1980

VAN DAMME, H., HOUBEN, H. *Should raw earth be improved? An environmental assessment*. Terra Lyon 2016

MOEVUS-DORVAUX, M., COUVREUR, L., FONTAINE, L., ANGER, R., DOAT, P., RONSOUX, L., JORAND, Y., OLAGNON, C., MAXIMILIEN, S. *Environmental-clay-based concrete*. Terra Lyon 2016

IZARD, J.-B., DUBOR, A., HERVE, P.-E., CABAY, E., CULLA, D., RODRIGUEZ, M., BARRADO, M. *On the Improvements of a Cable-Driven Parallel Robot for Achieving Additive Manufacturing for Construction*. July 2018

Documents en ligne

Structure Mode, *Fabric formwork for reinforced concrete school buildings* [en ligne] <https://www.structuremode.com/projects/fabric-formwork-community-centre/> Consulté le 24/10/2019

CHANG, Y., *Digital Adobe - Additive Manufacturing with adobe towards passive habitats*, IAAC Blog, Aout 2018 [En ligne] <http://www.iaacblog.com/programs/digital-adobe-additive-manufacturing-adobe-towards-passive-habitats/> (consulté le 12/01/2020)

BUGA Wood Pavilion, Institute for Computational Design, University of Stuttgart [En ligne] <https://icd.uni-stuttgart.de/?p=2228>

EDF. *La consommation d'électricité en chiffres* [En ligne]. Disponible sur : <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/le-developpement-durable/la-consommation-d-electricite-en-chiffres>

FUTURA-SCIENCE. *La fabrication de l'acier* [en ligne]. Disponible sur : <https://www.futura-sciences.com/sciences/questions-reponses/matiere-fabrication-acier-835/>

LAGA Exhibition Hall, Institute for Computational Design, University of Stuttgart [En ligne] <https://icd.uni-stuttgart.de/?p=11173>

3DNATIVES. *FDM ou SLA : quelle technologie d'impression 3D choisir?* 15 janvier 2018 [En ligne] <https://www.3dnatives.com/fdm-ou-sla-technologie-15012018/>

LA BARDONNIE, M. *Terre de Babel*, Le Monde 30 octobre 1981 [En ligne] https://www.lemonde.fr/archives/article/1981/10/30/une-exposition-au-centre-georges-pompidou-terre-de-babel_3039791_1819218.html

Conférence

Conférence inaugurale de l'exposition «Terres de Paris», Pavillon de l'arsenal. Intervenants : Romain Anger, Paul-Emmanuel Loiret & Serge Joly, Martin Rauch. Disponible en ligne : <https://www.pavillon-arsenal.com/fr/arsenal-tv/conferences/hors-cycle/10509-terres-de-paris.html>

DONNADA, J. *Le Musée Guggenheim de Bilbao* [Télévision]. Arte France. 2002. 25 minutes

DELEUZE, G. *Conférence des mardis de la fondation Fémis*, 17/05/1987. [En ligne] <http://www.webdeleuze.com/>

JANCOVICI, Jean-Marc. *L'énergie - Cours des Mines 2019* [En ligne]. Disponible sur : <https://www.youtube.com/watch?v=xgy0rW0oaFI> (consulté le 29/08/2019)

Arte, *Le sable : enquête sur une disparition* ; Denis Delestrac France, 2013, 1h14m