



HAL
open science

L'industrialisation de la terre crue : enquête sur la construction d'une filière

Louise Chrétien

► **To cite this version:**

Louise Chrétien. L'industrialisation de la terre crue : enquête sur la construction d'une filière. Architecture, aménagement de l'espace. 2017. dumas-02454031

HAL Id: dumas-02454031

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02454031>

Submitted on 24 Jan 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

-L'industrialisation de la Terre Crue- ENQUÊTE SUR LA CONSTRUCTION D'UNE FILIÈRE

Louise Chrétien, mémoire de Master Ensa Nantes avec Pascal Joanne et Bettina Horsch



Remerciements

A Pascal Joanne et Bettina Horsch, qui ont encadré ce travail de mémoire,

A Stéphane Forge, qui m'a consacré beaucoup de son temps au cours de notre entrevue et de nos nombreux échanges,

A Erwan Hamard, qui m'a reçue dans ses bureaux pour un entretien très instructif,

A Christian Marenne, qui m'a encouragée dans mes moments d'hésitation,

A ma mère, qui m'a conseillée très justement,

A Sylvain, Zoé, Jérémy, Margaux, qui m'ont prêté main forte dans cette année rythmée,

A Marius, qui m'a transmis sa curiosité admirative pour le matériau terre.

Introduction

L'INDUSTRIALISATION DE LA TERRE CRUE,
Enquête sur la construction d'une filière..

La filière terre-crue en France doit-elle adopter la posture d'une industrialisation du matériau à l'instar du béton de ciment ou ouvrir une autre voie ?

Appliquée principalement à l'habitat, l'utilisation de la terre crue en France comme matériau de construction, séduit de plus en plus les architectes et les maîtrises d'ouvrage. Ils s'émerveillent des ambiances que cette matière peut procurer. On explore sa couleur naturelle, son grain, ses effets plastiques. Mais l'esthétisme n'est pas le seul attrait de ce matériau composite naturel et omniprésent.

La terre se trouve sous nos pieds, un sol formé de trois horizons : la litière ou terre végétale en surface, puis la terre riche en humus utilisée pour la construction, et la roche mère. Lorsque l'on extrait la matière de cette épaisseur, elle est testée et ainsi évaluée prête-à-l'emploi ou à modifier dans sa composition si elle ne présente pas la plasticité du matériau de construction: le 'test de la boule' par exemple, consiste à prendre en main une poignée de terre fraîche qu'on laisse tomber d'une hauteur d'un mètre environ et le comportement de l'éclatement au sol permet de dire si la matière est à même d'être utilisée ou doit être recomposée en lui apportant plus ou moins de granulats et d'eau pour constituer un matériau de construction. Contrairement à la terre cuite, la terre crue ne

demande pas d'énergie pour devenir matériau, simplement un mélange cohérent de grains de différentes tailles.

Elle sèche à l'air libre et devient résistante : ce phénomène est réversible et la matière en devient donc recyclable. Cette faible énergie grise et son caractère recyclable sont deux avantages majeurs qu'on ne retrouve pas dans nos matériaux usuels comme le béton de ciment : la fabrication du liant ciment nécessite une cuisson à plus de 1400°C pour obtenir la calcination de la chaux qui va alors pouvoir durcir avec l'eau et présenter une grande résistance, le durcissement du béton est un phénomène irréversible.

De plus, la terre crue est un matériau à changement de phase. Cela signifie que lorsque la température est élevée, la journée notamment lorsque le soleil chauffe, un mur de terre va emmagasiner cette chaleur et s'en débarrasser la nuit, lorsque la température baisse. Par conséquent, les besoins de climatisation sont réduits (et l'énergie associée) qui représentent 4% des consommations énergétiques des secteurs résidentiels et tertiaire¹. Cet atout est utilisé également en hiver pour optimiser le chauffage à l'intérieur de l'habitat.

Le confort intérieur est tout autant amélioré par la nature poreuse du matériau qui régule l'hygrométrie de l'air ambiant : elle absorbe ou rejette l'humidité.

La terre crue présente donc des avantages singuliers qui permettent de répondre aux enjeux nouveaux qui se posent en ce début de siècle. L'impact écologique d'un bâtiment qui met en jeu sa consommation en énergie lors de son utilisation mais aussi en amont de cette période habitée- autrement dit l'énergie grise (lors de la

production et de la mise en œuvre du matériau)- et en aval soit l'énergie employée à sa démolition et à son réemploi. On voit également émerger la notion de l'impact social d'un édifice et de son chantier, où comme pour le contexte sociétal général, les circuits courts sont favorisés. Or la terre crue est extraite proche du site de projet (entre 0 et 30km le plus souvent) et demande un savoir faire local puisque les techniques mises en œuvre dépendent de la terre et donc de la région (pisé en Rhône-Alpes, bauge en Bretagne, adobe dans le sud-ouest et torchis dans le nord de la France).

Si la terre est si avantageuse, pourquoi n'est-elle pas plus commune dans la culture architecturale française actuelle, d'autant qu'elle fût utilisée pendant plusieurs siècles ?

Ses avantages sont très attrayants, encore faut-il savoir la mettre en œuvre : concevoir structurellement l'ouvrage en terre crue est délicat puisque celle-ci ne travaille qu'en compression pour ainsi dire (très peu résistante aux efforts de traction et de cisaillement). De plus, cohérente grâce à l'eau contenue dans l'argile, ce fluide est aussi son pire ennemi dans la mesure où, en trop forte quantité, il transforme la matière en boue. Il faut donc prévoir une protection en soubassement et en toiture pour éviter les infiltrations et remontées capillaires, principe que l'on appelle "bonnes bottes et bon chapeau". Ainsi, comme le dit Stéphane Forge², il existe de nombreux "contre-exemples" qui nuisent à la réputation du matériau : certains bâtiments en terre sont détériorés avec des fissures dans le mur en pisé mais ceci n'est pas dû à la matière terre directement mais à une mauvaise réhabilitation et à sa méconnaissance. Par exemple, enduire avec un revêtement étanche comme l'enduit de ciment, empêche la respiration du mur pisé qui reste constamment humide et par conséquent

fragile.

Les freins de la filière convergent donc vers des savoirs-faire oubliés, qui provoquent un manque d'acteurs compétents et donc une main d'œuvre rare et onéreuse, à ce jour. Pourquoi ce savoir a-t-il été oublié ?

A ce stade, la comparaison avec la filière béton devient pertinente. Intuitivement, les deux matériaux paraissent proches par leur nature composite (granulats et liant). De plus, l'échelle temporelle révèle un paradoxe entre ces deux matériaux : la terre utilisée depuis des siècles et récemment oubliée, contre le béton, un matériau inventé par les Romains certes mais utilisé que depuis la fin du XIX^e siècle et aujourd'hui extrêmement répandu. Certains parlent même de monopôle du béton. Pourquoi le développement de sa filière a-t-il été si rapide ?

L'avantage premier du béton est sa grande résistance : les bétons courants ont une résistance de 20 à 30 MPa, et les bétons à hautes performances peuvent dépasser 100MPa. En France, par convention, la résistance à la compression du béton est mesurée sur le volume d'une éprouvette cylindrique de 16 cm de diamètre environ et de 32 cm de hauteur. Celle du pisé est de l'ordre de 0,9 MPa³; ainsi un bâtiment en structure pisé ne peut excéder dix mètres de hauteur en principe⁴.

Jacques Bonniel, président du musée urbain Tony Garnier, nous explique l'essor de la filière béton au début du XX^e siècle dans la préface de l'ouvrage *Sacré béton !* en ces termes : "Dans le même temps, il a permis au secteur de la construction, qui fonctionnait encore très largement sur un modèle artisanal exigeant une maîtrise des techniques par un long apprentissage sur le mode du compagnonnage, d'opérer sa révolution technique et de devenir l'objet d'un processus d'industrialisation poussé."⁵

Il en ressort aujourd'hui un matériau largement utilisé pour sa résistance, la disponibilité de la matière première qui est en somme les granulats minéraux naturels, sa facilité d'emploi et donc son coût. En étudiant le développement de la filière béton et son Histoire, on peut expliquer ces conditions attrayantes par la richesse des études, de la communication et de l'industrialisation, qui ont pu avoir lieu autour du matériau béton. Ainsi, on se demande si la filière terre crue,

¹ d'après Vincent Pessey, responsable de Missions, au sein de l'activité Chimie, Matériaux et Energie d'Alcimed, auteur de l'article "Les atouts écologiques des nouveaux matériaux à changement de phase", sur le site <http://www.cleantechrepublic.com>

² entrevue du 7 mars 2017 à Lyon, avec Stéphane Forge, architecte et membre de l'association Tera

³ chiffre publié par l'agence d'architecture Nunc, basé sur une série d'essais pour la recherche menée en partenariat avec l'école ENTPE (Ecole Nationale des Travaux Publics), l'INSA Strasbourg et le CRITT-Matériau Alsace, <http://www.nunc.fr/pise.html>

⁴ "Un bâtiment pisé ne peut pas dépasser dix mètres de hauteur puisque le mètre cube est très lourd, il ne supporterait pas son propre poids", Nicolas Meunier cité par Stéphane Forge entrevue du 7 mars 2017 à Lyon.

⁵ "Sacré Béton !, Fabrique et légende d'un matériau du futur" de Philippe Genestier et Pierre Gras, Lyon Libel, 2015, préface de Jacques Bonniel, p.2

aujourd'hui hésitante, va pouvoir se développer selon ces mêmes axes, et en particulier celui de l'industrialisation.

La question se pose et le débat de l'industrialisation de la terre crue demeure d'actualité entre les différents acteurs de la filière. Les arguments avancés sont nombreux et vont devoir être étudiés. Cependant, on peut dire que ce qui motive l'industrialisation est la facilité de mise en œuvre qu'elle sous-entend : un matériau produit en grandes quantités en usine va être associé à une composition connue et approuvée et à un mode d'emploi tel le DTU qui permet de normer et donc d'assurer la construction. Ainsi, l'emploi du matériau serait facilement pris en main par les constructeurs et la main d'œuvre serait de moins en moins spécialisée et chère. A contrario, d'autres disent que l'essence même de la terre crue est d'être extraite sur place et donc qu'une production délocalisée irait à l'encontre de sa nature. L'économie de moyen dont elle fait preuve réduit les coûts de mise en œuvre. Par conséquent, un matériau n'étant pas obligatoirement normé, il suffirait d'acquiescer, d'enseigner et de communiquer les savoirs-faire pour répandre l'usage des constructions terre crue et convaincre les bureaux d'études et les assureurs de sa pertinence et de sa sécurité. Dans cette optique, le coût engendré serait avantageux grâce à une énergie de production et d'acheminement maintenue faible, l'énergie qui sera en théorie, bientôt plus onéreuse que la main d'œuvre.

D'où cette problématique: la filière terre-crue en France doit-elle adopter la posture d'une industrialisation du matériau à l'instar du béton de ciment ou ouvrir une autre voie ?

La finalité sous-jacente de cette question est

d'enquêter sur la construction d'une filière, d'apprécier l'instant où la matière devient matériau. C'est comprendre les acteurs et leur rôle: le maçon, l'ingénieur, l'Etat, les formateurs, les médiateurs, les industriels et l'architecte dont le rôle est directement lié aux autres. En effet, quand l'architecte choisit son matériau, que se cache-t-il derrière? Une esthétique, un prix, mais pas seulement... L'architecte doit entrevoir tous les paramètres liés au choix du matériau, toute sa culture, c'est en cela que je ne suis ni maçon, ni ingénieur, ni économiste, ni industriel, ni simple habitant.

Interpréter ce jeu d'acteur demande d'embrasser le contexte général dans lequel il s'opère : au même titre que les Révolutions Industrielles ou la période de la Reconstruction, l'enjeu du Développement Durable deviendra-t-il l'un de ces phénomènes catalyseurs dont parlent l'Histoire ? Sommes-nous face à une évolution « soudaine » de la culture constructive, et en cela, moi-même en tant que future architecte, vais-je endosser un nouveau rôle ?

Pour tenter de répondre à la problématique, la rédaction de ce mémoire se compose de trois parties. La première doit être vue comme un état des lieux qui introduit le climat sociétal et constructif ambiant. Du 20^e siècle passé au 21^e qui commence juste, les enjeux influents sur les cultures constructives diffèrent. Nous étudierons cette précédente période consacrée au développement de la filière béton, puis nous expliciterons l'état de faits actuel en ce qui concerne notre matériau terre-crue.

Les freins révélés dans ce premier chapitre fourniront les bases au questionnement dominant de l'industrialisation de la terre. Enfin, je gâche un peu la surprise en annonçant que le scénario

industriel sera refusé pour donner lieu à l'établissement d'un nouveau cadre constructif adapté à notre matériau vernaculaire. En réalité, le discours n'est pas si tranché : le refus n'est pas catégorique mais pondéré avec différents degrés d'industrialisation pour permettre une vision alternative quant au devenir de la filière terre crue. Cette vision fera l'objet de notre troisième et dernière partie qui s'intéresse à l'élaboration d'un cadre réglementaire autour d'un matériau aléatoire comme la terre et aux nouveaux aspects de la maîtrise d'œuvre-en particulier le rôle de l'architecte- qui en émanent.

Sommaire

1/ L'ÉVOLUTION DE LA FILIÈRE D'UN MATÉRIAU FACE AUX ENJEUX CONTEMPORAINS

(p.9>57)

- 1.1 / Le XX^e siècle : l'essor du béton et de son industrie (p.12>31)
- 1.2/ Le XXI^e siècle introduit de nouveaux enjeux pour lesquels la terre crue prend sens (p.32>41)
- 1.3/ Etat des lieux de la filière terre crue actuelle (p.42>56)

2/ L'INDUSTRIALISATION DE LA FILIÈRE TERRE CRUE

(p.59>109)

- 2.1 / La production (p.66>74)
- 2.2/ La réglementation par l'industrie (p.74>81)
- 2.3/ La production du pisé (p.82>96)
- 2.4/ La mise-en-œuvre (p.97>103)
- Conclusion : Proposition de scénario d'industrialisation modéré (p.109)

3/ L'INDUSTRIALISATION REFUSÉE, LA FILIÈRE VA DEVOIR S'ADAPTER

(p.111>141)

- 3.1/ La normalisation selon Hubert Guillaud (p.115>124)
- 3.2/ L'élaboration d'un test chantier par Erwan Hamard (p.124>131)
- 3.3/ La rédaction de *Codes de Bonnes Pratiques* avec Stéphane Forge (TERA) (p.131>135)
- 3.4/ Le nouveau rôle de l'architecte (p.136>141)

1/ L'évolution de la filière d'un matériau face aux enjeux contemporains

*“L'arrivée d'un nouveau matériau sur la scène économique et productive n'est pas une chose banale. Dans l'histoire générale de l'édification, autant dire l'histoire de l'humanité, on ne connaît guère que les exemples du métal et du béton armé qui aient touché de manière si profonde les habitudes constructives des sociétés bâtisseuses. [...] Le béton (surtout le béton armé) et le métal (fer, acier) constituent l'essentiel de la substance bâtie dès la seconde moitié du XXe siècle, sur la planète entière. Les chiffres sont effarants :actuellement les quatre cinquièmes de ce qui se construit annuellement sont en béton et ou en métal.”**

Cyril Simonnet

Étudier l'évolution d'une filière de matériau demande d'analyser le contexte dans lequel elle prend forme. C'est le rôle de cette première partie de mémoire. Dans un premier temps, la description de l'état actuel de la culture constructive française demande de relater l'histoire de la filière béton. Puis nous présenterons succinctement les avantages de la matière terre face aux enjeux apportés par le 21^e siècle liés au Développement Durable et aux nouvelles mesures de confort intérieur. Enfin, à la fin de ce grand 1, nous expliciterons les freins de la filière terre crue actuelle.

L'âge d'or du béton, effigie de la Modernité, correspond au 20^e siècle. Aujourd'hui il est le matériau de construction le plus utilisé en France qui intervient dans 90% des ouvrages* (bâtiments, routes, réseaux, aménagement public, etc). Cette prépondérance du béton explique en partie l'évincement des matériaux traditionnels comme la terre-crue, pour lesquels les savoirs-faire ancestraux ont petit-à-petit été oubliés. Les 19^e et 20^e siècles se consacrent aux nouveaux matériaux porteurs d'un rêve de modernité pour le pays et sa société. L'engouement de cette époque est général, de l'interventionnisme

* Cyril Simonnet «Sacré Béton !
Fabrique et légende d'un matériau
du futur», publié en 2015 p.94

* A. Durand,
président des Grands Ateliers dans *Sacré
Béton !*, article préface intitulé «La filière
béton face aux enjeux contemporains», p.4

d'État aux investissements industriels, les acteurs évoluent et le cadre constructif avec : les artisans-entrepreneurs laissent place aux entreprises industrielles comme Lafarge ou Holcim qui sont capables d'aller de l'extraction de la matière première au béton prêt-à-l'emploi en passant par la recherche scientifique et la normalisation.

Ce nouveau jeu d'acteurs et de règles compose ce que j'appelle la «culture constructive» témoignant des pratiques, des usages, des enjeux de la construction, liés à mon rôle d'architecte. Cette étude historique du matériau béton va donc permettre de faire un état des lieux du cadre constructif en vigueur en ce début de 21^e siècle où notre filière terre-crue tente de se faire une place.

Une deuxième raison de l'intérêt que je porte à la filière béton est son caractère «industrielle». En effet, développée dès le 19^e siècle, on peut désormais parler de l'histoire de la filière béton et il nous est possible de prendre du recul pour comprendre notamment pourquoi une filière s'industrialise et comment. Une première notion du phénomène d'industrialisation est posée et nous permettra d'appréhender notre problématique sur les conséquences de ce processus appliqué à la filière terre-crue (approfondie en partie 2 de ce mémoire).

Enfin, l'analogie de la terre-crue avec le béton est chose courante. En effet, la majorité des acteurs de la construction terre apparente la matière «béton d'argile» avec le «béton de ciment». Ce rapprochement est dû à la nature composite et granulaire que partagent les deux matériaux. Dans un sens, le mot «béton» peut être considéré comme «un terme générique : il désigne un matériau de construction composite fabriqué à partir de granulats agglomérés par un liant. La terre fait également partie de cette grande famille des bétons.»*

Ce point de vue donné ici par Laëticia Fontaine et Romain Anger dans l'ouvrage «Bâtir en terre» en collaboration avec d'autres membres de CRAterre, est partagé par beaucoup. Par leurs similitudes de matières à grains, la terre et le béton partagent les mêmes principes de mise-en-œuvre. Pour la technique du pisé de terre, on verse la substance dans un coffrage qui après séchage sera devenue dure comme la pierre. Pour les briques de terre-crue, la matière passe de l'état plastique (taux d'humidité de 15 à 30%) à l'état solide (l'eau s'échappe au séchage et il y a durcissement). Ce changement d'état est comparable à la prise du ciment que l'on coule à l'état liquide dans

* Laëticia Fontaine et Romain Anger dans «Bâtir en terre : du grain de sable à l'architecture», p.108, éd. Belin, 2009

un moule, pour obtenir un élément dur comme la pierre. Laëticia Fontaine et Romain Anger parlent de «pierre coulée».

Dans ce même ouvrage, les membres de CRAterre soutiennent que la recherche appliquée au béton pourra être bénéfique pour notre matériau terre*. Depuis une vingtaine d'années des progrès ont été faits sur les schémas d'écoulement du sable : on s'intéresse au paradoxe entre son «comportement de liquide» puisqu'il prend la forme de son contenant et son «comportement de solide» puisqu'un tas de sable peut très bien supporter une masse et ne s'étale jamais totalement comme le ferait un fluide tel que l'eau. C'est l'étude des frottements entre les grains, on tente d'estimer les proportions de vide entre ces particules que l'on nomme la «porosité» d'un matériau.

* id. p.113 on peut lire :
"Aujourd'hui, la physique des milieux granulaires secs à mis à jour des phénomènes qui éclairent bien des aspects de la construction en terre, et plus généralement des bétons."

LE XX^E SIÈCLE : L'ÉSSOR DU BÉTON ET DE SON INDUSTRIE

Cette étude historique de la filière béton se base essentiellement sur ma lecture du livre «Sacré Béton ! Fabrique et légende d'un matériau du futur», publié en 2015 sous l'égide du Musée Urbain Tony Garnier à Lyon et des Grands Ateliers de Villefontaine. C'est un ouvrage collectif composé d'articles écrits par différents auteurs, dirigé par Philippe Genestier (architecte professeur à l'ENTPE) et Pierre Gras (historien professeur à l'Ensa Lyon).

Cette première partie n'a pas vocation à détailler l'histoire exacte de la filière béton car ce serait une lecture longue et peu utile pour notre sujet. Notre rédaction rassemble des bribes de faits historiques qui à priori permettent de comprendre l'engrenage général de l'évolution de la filière tout en énonçant les raisonnements liés à la problématique de l'industrialisation d'un matériau.

Nous allons par exemple rencontrer la question de l'élargissement de la main d'œuvre, de l'interventionnisme d'état, du rôle des commandes publiques d'envergure. Par le contexte historique des 19^e et 20^e siècles, nous nous confronterons aux enjeux apportés par les guerres mondiales. Si ce n'est pas une situation actuelle du

* «Sacré béton ! : fabrique et légende d'un matériau du futur» sous la direction de Philippe Genestier et Pierre Gras Lyon : Libel, 2015

Fig.1 : Petite mise au point sur le vocabulaire...

LA CHAUX

Chaux éteinte ou chaux vive (cuite), on peut dire que c'est simplement de la poudre calcaire, qui décarbonatée formera une pâte avec l'eau pour durcir : c'est un liant.

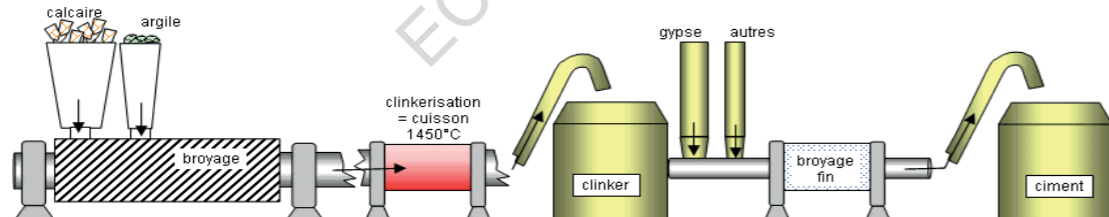


LE CIMENT

Par un procédé de fabrication selon deux étapes de cuisson, on élabore une poudre qui avec l'eau formera également une pâte durcissante d'après un mélange de poudre calcaire (≈80%) et d'argile (≈20%).



Fig.2 : cycle de la fabrication du ciment, source <http://zelione.fr/materiaux/materiaux.html>



21^e siècle ni même une application de notre matériau terre crue, nous verrons l'importance du génie militaire sur le développement du béton. Le secteur militaire rassemble la recherche scientifique, les fonds d'investissements de l'Etat pour expérimenter et la main d'œuvre. La recherche scientifique autrefois menée dans les grandes écoles comme les Ponts et Chaussées, contribue largement à la démocratisation d'un nouveau matériau : elle établit le savoir, elle diffuse ses connaissances via des publications et l'enseignement, et enfin elle participe à l'élaboration d'un cadre réglementaire qui doit se référer en partie aux vérités scientifiques.

Nous verrons dans une troisième sous-partie qui établit l'état des lieux de la filière terre crue en France, que les questionnements sur la main d'œuvre, sur le savoir scientifique, les documents normatifs, ou encore l'enseignement sont les questionnements actuels de la filière terre crue.

Pour comprendre les rouages historiques de la filière béton, il faut différencier le ciment du béton au béton armé. En effet l'un menant à l'autre, c'est finalement à l'aboutissement du béton armé que les architectes ont pu prendre en main le matériau et communiquer son usage aux yeux du grand public. Cette vulgarisation du béton correspond à la période de l'après guerre, soit de la Reconstruction,

LE MORTIER

On ajoute à ce ciment du sable



LE BÉTON

On ajoute à ce mortier du gravier.

A partir de cette base plusieurs adjuvants pourront être additionnés pour augmenter les capacités du matériau. En intégrant des tiges de fer, on obtient le béton armé.



emmenant les architectes à construire vite, rationnellement d'où le Mouvement Moderne et le Style International bien connus chez les amateurs d'architecture. On se propose donc d'étudier l'évolution de la filière béton jusqu'à cette apogée du milieu du 20^e siècle qui marque l'essor de ce matériau. Ainsi, si cette partie de mémoire s'intitule "Le XX^e siècle : essor du béton", il nous faut remonter l'histoire dès le 19^e siècle puisqu'en quelques mots on peut dire que: le ciment des Romains est redécouvert à la fin du 18^e siècle, puis développé par les scientifiques durant le 19^e pour devenir le ciment tel que nous le connaissons, pour enfin aboutir au fameux béton armé dès l'aube du 20^e bénéficiant des progrès de l'industrie sidérurgique du siècle précédent.

Cette distinction entre ciment et béton est entendue par Cédric Avenier dans le livre «Sacré Béton !»; il nous dit... "Durant le Siècle des Lumières, le béton populaire utilisé par les constructeurs ou maîtres maçons va faire l'objet de recherches par les «mécaniciens». Quant au savant ciment, qui réapparaît à la Renaissance grâce à la traduction des ouvrages de Vitruve, il va plutôt être étudié par les chimistes."*

Néanmoins, lorsqu'on parle de la filière béton, les deux matières sont étudiées : "la filière béton regroupe l'extraction des sables et granulats, la production du ciment, le béton prêt à l'emploi et la production d'éléments en béton"*.

De la redécouverte du ciment romain par quelques curieux à l'engouement général...

En premier lieu, il nous faut relater l'épisode historique déclencheur de l'engouement général qui correspond à la redécouverte du liant ciment des romains par les savants scientifiques du 18^e et 19^e siècle.

L'histoire du matériau béton (on ne parle pas encore de filière) remonte à l'Antiquité où l'on avait découvert la chaux. La roche calcaire qui se trouve dans les sols est réduite en poudre. On chauffe alors cette poudre aux alentours de 1400°C pour que le CO₂ de cette pierre scientifiquement appelée «carbonate de calcium», s'évade. On nomme cette substance obtenue de «chaux vive» puisque si l'on ajoute un petit d'eau à notre poudre, une réaction chimique a lieu, de la fumée et des crépitements s'échappent. Avec une grande quantité d'eau, cette transformation est plus lente et la pâte va pouvoir être

*Cédric Avenier dans «Sacré Béton!», article «Béton : les mots et les choses», p.15

* A. Durand, président des Grands Ateliers dans Sacré Béton !, article préface intitulé «La filière béton face aux enjeux contemporains», p4

mise-en-œuvre. Cette «chaux aérienne» ou «éteinte» sèche au contact de l'air ambiant qui contient à nouveau du carbone avec lequel la pierre calcaire va se reformer, c'est le durcissement.

Les Romains ont eu l'idée d'ajouter à ce calcaire pur, des granulats venus de la région de Pouzzoles en Italie. Ce sable offre une meilleure résistance en formant un squelette plus dur que la craie (calcaire).

Finalement lorsqu'on parle de ciment romain, c'est un abus de langage (cf fig.1) faisant référence à cette «chaux aérienne adjuvantée de pouzzolanes» à partir du 1^{er} siècle après J.C. d'où nous viennent les premières traces écrites. Ainsi, on hérite de bâtiments tels que l'emblématique Panthéon à Rome dont la coupole est en «béton romain», c'est-à-dire un matériau fait d'un mélange de chaux et de débris de carrières ou déchets de chantier (briques ou pierres cassées).

Tombées dans l'oubli pendant la période du Moyen-âge, ces pratiques sont redécouvertes. En ce milieu du 18^e siècle, l'innovation la plus flagrante qui pour beaucoup marque le début de l'histoire du

Fig. 3: La coupole du Panthéon est en «béton romain», source : www.smarthistory.org



béton moderne est la construction du phare d'Eddystone au sud de l'Angleterre par l'ingénieur anglais [John Smeaton](#) (1734-1792).

A l'occasion de ce chantier sur la Manche entre 1756 et 1759, il expérimente un nouveau mélange en constatant que la chaux pure (faîte uniquement de pierres calcaires) n'est pas toujours la plus résistante. Bien au contraire, lorsque le scientifique ajoute des impuretés et notamment des argiles, la matière devient plus dure. C'est ce qu'on appellera la «chaux hydraulique» en raison de la quantité d'eau nécessaire à sa prise, c'est le premier ciment. Le phare est donc construit avec des blocs de granit agglomérés par chaux hydraulique qui lui permet de résister aux conditions météorologiques difficiles de cette région côtière au beau milieu de la mer. Il relève sa dédicace et tient jusqu'en 1877.

De cette aventure, plusieurs ingénieurs anglais ou français expérimentent de nouveaux mélanges. Dans le livre *Sacré Béton!*, Pierre Gras nous l'explique. "Malgré l'importance de ses premiers pas, l'emploi du matériau ne connaît pas d'essor spectaculaire. Car ni Smeaton, ni ses compatriotes James Parker ou James Frost, qui mettent en fabrication des liants de bonne hydraulité, ne savent apprécier l'importance de la réaction chimique entre le calcaire et la silice ou l'argile, pourtant à la base de la fabrication d'un ciment de qualité. [...] Mais ce n'est qu'avec Louis Joseph Vicat (1786-1861) que le «mortier de ciment» va trouver, avec la propriété d'hydraulicité du mélange, sa première théorisation."*

[Louis Joseph Vicat](#) est ingénieur des Ponts et Chaussées et fut envoyé en 1812 à Souillac sur la Dordogne pour réaliser un pont. Il utilise alors du ciment pour réaliser ses piles, permettant ainsi à l'ouvrage de résister aux crues et aux forces de courant de la Dordogne contrairement aux ouvrages précédents qui se sont tous effondrés. Il a su mettre en œuvre ce matériau grâce aux lectures qu'il a fait de ces prédécesseurs comme Guyton ou Collet-Descotils. Puis de ce point de départ, il expérimente la cuisson de son ciment directement en lien avec sa composition. Cinq ans après la construction du pont, il publie alors ses découvertes qui seront reconnues par l'Académie Royale des Sciences en 1818.

C'est la première théorisation du liant ciment. Là où Smeaton n'avait que tâtonner, Louis Joseph Vicat met des mots et énonce les premières règles mathématiques de fabrication : il est capable de fabriquer artificiellement des ciments ayant des caractéristiques bien



Fig. 4 : Le phare d'Eddystone fait de granit et de chaux hydraulique résiste aux conditions météorologiques peu clémentes de la Manche, source : www.enkidoublog.com, Lafage

* Pierre Gras dans «Sacré Béton!», article «Portraits d'inventeurs : des paternités multiples», p.40

spécifiques via leur composition granulométrique et leur mode de cuisson. En d'autres mots, par l'expérimentation lors de ses années de chantier, il établit des équations sur l'hydraulicité du ciment, il sait estimer le comportement d'un mélange en fonction des proportions de calcaire et d'argile.

De ce point de départ, l'ingénieur français Vicat continue ces recherches dans une optique toujours scientifique et non commerciale : "S'ensuit un engouement commercial dont il ne cherchera pas à tirer des bénéfices. Au contraire il parcourt les régions françaises et visite plusieurs centaines de carrières pour évaluer la teneur des calcaires et des silices et permettre le meilleur rendement en sortie des fours. [...] Il se contente d'une petite rente que lui accorde finalement l'Etat au titre de sa découverte."*

D'autres seront plus gourmands...

Pour l'auteur Cyril Simonnet*, les recherches de J. Vicat sont le point de départ de la filière béton et de son industrialisation. En effet, si le chercheur ne visualise pas la portée capitaliste de sa découverte, il n'en demande pas moins aux carriers. Il les encourage à développer leur propre matériau en élaborant une formulation spécifique et constante, il les encourage à perfectionner leur équipement.

Du fait, les producteurs adoptent une démarche industrielle: ils investissent dans leur entreprise à la recherche de nouvelles technologies pour augmenter les qualités de leurs produits et bientôt leur productivité.

A l'échelle nationale, on observe un changement vers un schéma d'ordre industriel également puisque les multiples exploitations sont remplacées par des groupes proposant un plus large domaine de services. C'est le passage de l'éparpillement à la concentration selon Cyril Simonnet. "De l'éparpillement à la concentration, c'est bien la représentation du passage de l'artisanat à l'industrie qui est exprimée. Car l'acte I de l'histoire du béton et du béton armé se joue d'abord à l'échelle territoriale, lorsque la cimenterie devient industrie, concentrant dans des fours de plus en plus puissants et performants les centaines de petites unités autrefois réparties dans autant de carrières à proximité des bourgs ou des villes qu'elles alimentaient en matériau."*

Pour imaginer cette évolution dans la production du matériau nous pouvons citer les exemples du ciment Portland et de l'entreprise

* id. p.41

* Cyril Simonnet dans «Sacré Béton!», article «Le béton à l'âge du faire», p.96

* id. p.96

Lafarge. Suite aux travaux de Vicat qui n'a pas voulu profiter de l'engouement commercial qui a suivi ses publications, plusieurs inventeurs y ont vu quant-à-eux la promesse d'un marché fructuant...

L'engouement commercial suite aux traités de Vicat donne naissance aux premières industries cimentières de Ciment Portland au groupe Lafarge.

Les conclusions de Louis Joseph Vicat sont rassemblées en 1856 -soit cent ans après le phare d'Eddystone de John Smeaton- dans son Traité pratique et théorique sur la composition des mortiers. Jusque là, il avait rédigé nombreux mémoires présentant ses découvertes mais uniquement adressés au corps des Ponts et Chaussées, un public bien spécifique.

Comme nous le rappelle Pierre Gras dans son article de Sacré Béton!, le 19e siècle est le «siècle des ingénieurs» par excellence*. Les grandes écoles d'ingénierie, Polytechnique (fondée en 1794 sous Napoléon) ou les Ponts et Chaussées, sont moteurs de recherches et dispensent les enseignements sur les matériaux modernes qui sont l'acier et bientôt le béton. Mais c'est aussi le siècle de l'industrie...

Entre Taylor, l'invention de la machine à vapeur et les hauts-fourneaux de la sidérurgie héritée du siècle passé, l'heure est à l'industrialisation dans les pays occidentaux. On parle de la Révolution Industrielle du 19e siècle. L'organisation de la société jusque là basée sur l'artisanat et l'agriculture se tourne vers l'industrie et la commercialisation de produits. Les usines se multiplient, les brevets d'invention aussi, la

mécanisation est en marche.

C'est pourquoi nous ne sommes pas étonnés que, suite à la publication des traités de Louis-Joseph Vicat, plusieurs industriels saisissent l'occasion de synthétiser leur propre ciment. Ils pourront optimiser sa composition, innover dans les machines de cuisson comme le propose Vicat et ainsi commercialiser un ciment déposé propre à leur société et à leur carrière.

C'est le cas du ciment Portland que nous utilisons encore aujourd'hui, devenu le ciment du langage courant. Le briquetier Joseph Aspdin brevète en 1824 son propre mélange à Portland en Angleterre dont la formulation offre une grande résistance. «Portland cement» est encore une marque commercialisée aujourd'hui.

Ailleurs en France, une petite carrière ardéchoise y voit également l'amorce d'un marché prometteur...

En 1830, Léon Pavin de Lafarge (1806-1877) reprend l'activité de son père Joseph-Auguste Pavin: une carrière d'extraction de roches calcaires et de fabrication de chaux réputée pour la qualité de son matériau. Le jeune industriel utilise les recherches de Louis Joseph Vicat pour améliorer ses fours à chaux qu'il finit par installer au Teil en Ardèche en 1833.

L'auteur Pierre Gras nous raconte rapidement cet épisode.

“L'usine du Teil produit bientôt 3000 tonnes de chaux par an. Dans les décennies qui suivent, l'intimité familiale ne cesse de prospérer, à l'image de la production du ciment. En 1850, la production annuelle française a atteint les 150 000 tonnes. En 1864, le site du Teil livre 110 000 tonnes de chaux pour la réalisation du canal de Suez. De fait, il est le premier chantier d'envergure internationale pour l'entreprise. En 1908, Jules Bied, directeur

du laboratoire de recherche, met au point le ciment alumineux fondu, obtenu par la fusion à chaud d'un mélange de bauxite et de calcaire. La famille Lafarge peut en déposer le brevet. Ce ciment alumineux fondu procure des résistances initiales très élevées. [...] En 1919, l'activité familiale est transformée en société anonyme sous le nom de Société anonyme des chaux et ciments de Lafarge et du Teil. Dans l'entre-deux-guerres, Lafarge deviendra le premier cimentier français et l'un des leaders mondiaux.”*

C'est donc d'une entreprise familiale à rayonnement régional que l'un des plus grand groupe cimentier au monde se crée. On comprend dans ces derniers propos empruntés à Pierre Gras que la dimension industrielle de ce groupe est donnée par la demande d'un important volume de matière, culminant en l'année 1864 grâce à l'édification du canal de Suez. Par ailleurs, l'impulsion de développement de 1830 provient des publications de la communauté scientifique dont se saisissent les entreprises privées. Dès lors les bénéficiaires de l'entreprise croient jusqu'à pouvoir investir dans un bureau de recherche au sein de leur structure : c'est le ciment alumineux fondu de Jules Bied dans le cas de Lafarge en 1908.

Les usines de production naissent un peu partout sur le territoire français dont la toute première est celle de Dupont et Demarle à Boulogne-sur-Mer en 1848.

L'aboutissement de ce phénomène se concentre et de croissance des entreprises cimetières prend véritablement forme lors des projets publics d'envergure où il leur faut fournir un volume démentiel de matière. C'est le cas du canal de Suez pour Lafarge.

La petite exploitation de chaux ardéchoise remporte le contrat du Canal de Suez en 1864 où 110 000 tonnes de chaux devront être fournies. Qualifié de «chantier du siècle» pour lequel la cimenterie Lafarge doit doubler sa production annuelle de béton, l'exploitation de chaux doit nécessairement s'agrandir et prendre une dimension largement plus grande que celle de l'artisanat. Si Lafarge doit produire une immense quantité de ciment, l'entreprise chargée de le mettre en œuvre devra en faire autant. Ainsi, de manière inédite, on intègre la machine à vapeur sur le chantier pour couler vite le ciment de Lafarge.

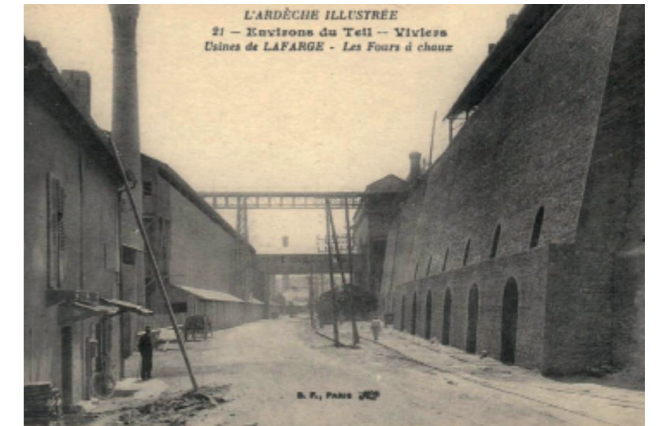


Fig. 5 : L'usine du Teil de Lafarge investit en 1833 dans de nouveaux fours à chaux, source : www.usinenouvelle.com

* Pierre Gras dans «Sacré Béton!», article «Portraits d'inventeurs : des paternités multiples», p.51

* id.

C'est la mécanisation sur chantier.

Cyril Simonnet met des mots sur ce phénomène : "Manipulation veut dire : travailler le matériau avec la main, la main outillée, soit dans le cas de l'artisanat conduite par une action consciencieuse (le ciseau du tailleur de pierre par exemple), soit dans le cas de l'industrie par un organe mécanique dictant et rythmant le modus operandi ouvrier (une machine pneumatique à enfoncer les pieux par exemple). A ce titre, les grands chantiers de génie civil constituent un laboratoire exemplaire. [...] L'introduction de la machine sur le chantier contribue à cadencer la gestuelle ouvrière, à déposséder l'artisan du contrôle de l'acte de travail en tant que tel."*

L'intégration de machines à rythme industriel sur le chantier accélère la mise-en-œuvre. La durée d'édification va pouvoir être estimée, ainsi que son prix. En revanche, on assiste à une déqualification de la main d'œuvre, l'artisan du bâtiment devient ouvrier d'une industrie. C'est un véritable changement dans l'organisation de l'acte de construire. "Les métiers du bâtiment avant 1900, sont des métiers qualifiés, les prescripteurs (architectes) conçoivent des édifices qui correspondent à ce que savent et peuvent faire les artisans du bâtiment."*

L'acte de construire au XIXe siècle se maintient largement sur le modèle du compagnonnage où les artisans qualifiés sont mis en valeur et manipulent les matériaux d'usages comme la pierre, le bois ou la ferronnerie qui nécessitent une main d'œuvre qualifiée. Par conséquent, si les intérêts de la construction et de l'industrie semblent en adéquation, ce mariage implique le rapprochement de deux populations de travailleurs bien distinctes : les artisans du bâtiment à l'époque, ne sont pas les ouvriers de l'industrie. Ils jouissent d'une aura du fait d'être qualifié. Ils ne travaillent pas pour le patron d'une grande usine ni pour un travail à la chaîne. C'est l'émergence des premiers syndicats du bâtiment, les artisans tentent de défendre leur savoir-faire de plus en plus dévalorisé.

Le phénomène de l'élargissement de la main d'œuvre atteint son apogée lors de la Seconde Guerre mondiale qui marque le véritable essor du béton et de son industrie.

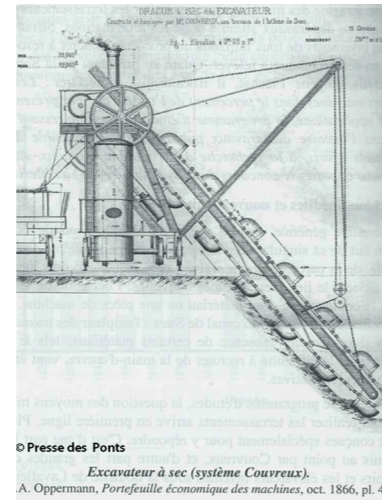


Fig. 6 : L'excavateur à sec (système Couvreur) s'invite sur le chantier du Canal de Suez tout comme la machine à vapeur pour couler le béton, source : livre «Le chantier du canal de Suez (1869-1869)», Presses de l'Ecole Ponts et Chaussées, éd. In Forma

* Cyril Simonnet dans «Sacré Béton!», article «Le béton à l'âge du faire», p.99

* id. p.99

Au cours des chantiers de guerre, le béton est véritablement étudié pour ses capacités à résister aux balles, à l'eau, au poids de l'armement. Les ouvriers seront les militaires ou les civils prisonniers, ils vont participer à ces constructions et donc former la main d'œuvre du béton pour les années à venir. Formés lors du conflit mondial, ils n'auront plus peur d'utiliser le béton en rentrant.

C'est ce qui c'est passé pour le Mur de l'Atlantique, un mur parcourant les côtes de France à la Norvège commandé par le Troisième Reich d'Allemagne en 1943 qui emploie "près de deux cents entreprises de travaux publics allemandes [...], environ 350 françaises et des milliers de cimenteries."*

Pour cette construction, on utilise le béton à prise sous l'eau, rapide et résistante à l'eau de mer, qui fût inventé dès 1908.

Dans l'ouvrage «Sacré Béton!», un témoignage d'époque est proposé où l'on comprend très bien l'envergure d'une telle opération. Des voies de chemin de fer ont été construites dans le seul but de transporter les granulats ou le béton sur le chantier. Les paroles rapportées sont les suivantes...

"On prépare dans des bétonneuses, des centaines de milliers de mètres cubes de béton. Des milliers d'ouvriers sont mis à l'œuvre, en général des Français, mais aussi des Flamands, des Wallons, des Danois, des Espagnols et des Marocains. [L'organisation] s'occupe de faire venir les matériaux de construction comme le ciment, le fer, le gravier, le sable. Elle assure le transport depuis l'Allemagne de milliers de tonnes de lourds engins de travaux publics, de fers ronds, de palplanches et de matériaux à transformer sur place. Le tout est d'abord stocké en différents endroits... On l'apporte ensuite à la demande jusqu'aux chantiers, tantôt par des camions, tantôt par des chemins de fer à voies étroites construits à cet effet... L'organisation Todt se charge également de recruter, d'entretenir et de nourrir des masses de travailleurs et d'assurer leur transport jusqu'à leur lieu de travail."

L'auteur André Guillerme conclut ce témoignage : "Au total deux à trois millions de personnes «cultivent» le béton armé, ce matériau mixte si mal maîtrisé par les Français. 30 000 français sont enrôlés dans les chantiers de jeunesse en 1943 en Allemagne."*

Effectivement, à l'aube du 20e siècle il semble persister un écart entre le développement des filières béton allemandes et française.

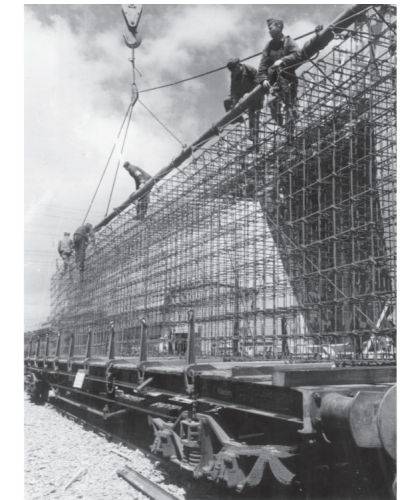


Fig. 7 : La construction du Mur de l'Atlantique en 1943, un des grands chantiers de guerre qui crée la main d'œuvre pour l'après-guerre, source : wikipedia.org

* André Guillerme dans «Sacré Béton!», article «France Allemagne : deux manières d'armer le béton», p.32

* id. p.32

André Guillerme parle de deux manières d'armer le béton. "Deux manières d'armer le béton s'affrontent pendant la guerre. Maître d'œuvre et maître d'ouvrage finissent par s'entendre sur les multiples chantiers du Mur de l'Atlantique notamment, où une acculturation technique forme les ouvriers français aux pratiques des travaux publics allemand et dont le savoir acquis servira la reconstruction et l'industrialisation du bâtiment."*

Les travaux publics allemand en béton on débute dès la fin du 19^e siècle. Les ingénieurs militaires français pendant ce temps continuent leur recherche sur le béton armé. Cependant les ouvriers de l'armée qui mettent en œuvre leurs découvertes dès 1880 ne sont pas complètement convaincus. On continue de construire en bois dans ce secteur militaire. Alors qu'en France, il faudra attendre la Seconde Guerre Mondiale pour que le nouveau matériau soit adopté par les institutions, le Ministère de la Guerre allemand ordonne la construction en béton dès cette fin de 19^e siècle des murs, des casernes, des autoroutes et des aérodromes (début 20^e).

Pour ces autoroutes allemandes édifiées à l'entre-deux-guerres ce ne sont pas moins de "cinq millions de mètres cubes de pâte homogène, calibrée, dosée, contrôlée, industrielle, [qui] sont étalés chaque année." De même, on construit des aérodromes qui nécessitent une piste d'atterrissage solide pour l'arrivée des bombardiers. Cela représente une grande quantité de matière et de main d'œuvre.

En 1867, l'Allemagne se dote d'un premier cadre réglementaire concernant la construction en béton armé, c'est la [Monierbrochure](#), diffusée largement et très vite adoptée, elle participe activement au développement de l'usage du nouveau matériau en Allemagne.

C'est donc à travers les commandes de l'Etat, autoroutes, canaux, réseaux de canalisation, ponts et ouvrages d'art, etc, qu'un très grand volume de matière devra être fournie encourageant ainsi la production industrielle et l'élargissement de la main d'œuvre. Cyril Simonnet parle du "durcissement du territoire"*

Pour que les ouvriers soient formés, il a nécessairement fallu un savoir en amont décidant d'utiliser ce matériau de telle manière : c'est la recherche scientifique.

Le génie militaire est le premier secteur à s'intéresser au béton dès les années 1880. Et en ce «siècle de l'ingénieur», la recherche se faisait sous le commandement de l'Etat dans les grandes écoles

* id. p.30

* Cyril Simonnet dans «Sacré Béton!», article «Le béton à l'âge du faire», p.95

comme les Ponts et Chaussées où le savoir acquis était «directement» enseigné.

Les lieux de savoirs universitaires ont le rôle d'apprendre, de capitaliser les connaissances et de les diffuser.

Charles Rabut (1852-1925) est l'un des premiers à enseigner le béton à l'école des Ponts et Chaussées. Le contenu de ses leçons restent approximatif car on ne connaît pas encore bien le matériau. En effet, profitant du savoir acquis lors du développement de la sidérurgie les ingénieurs appliquent les modèles qu'ils maîtrisent en analogie à la matière métallique à savoir avec une fibre neutre à la composition homogène.

Néanmoins ces précurseurs donnent l'envie à leurs étudiants de persévérer sur le sujet du béton. Ainsi des quelques étudiants de la classe de Charles Rabut, plusieurs vont se faire connaître pour leurs découvertes majeures.

"Avec son profil de bon élève et d'ingénieur-administrateur modèle, Charles Rabut est, pour sa part, à l'image du «siècle des ingénieurs» par excellence qu'est le XIX^e siècle. Polytechnicien, ingénieur des Ponts, cadre de la Compagnie des chemins de fer de l'Ouest, professeur de mécanique appliquée, il possède tous les titres pour briller dans cette société du Second Empire avide de performances techniques. A l'Ecole des Ponts et Chaussées, où il prend en charge le cours de mécanique appliquée à partir de 1897, il introduit l'étude du béton dans les programmes, bien qu'il n'existe encore aucun manuel fiable. Ses étudiants s'appellent Freyssinet, Caquot, Limousin, Mesnager..."*

Eugène Freyssinet est connu pour être l'inventeur du béton précontraint qui marquera de manière inédite les ouvrages de génie civil (Pont de Plougastel en 1925, gare maritime du Havre en 1933, etc). Il fait partie de cette nouvelle génération d'ingénieurs des ponts à qui le béton a été enseigné dès les années 1880 qui feront des avancées notables dans la recherche appliquée au béton armé au début du 20^e siècle.

Ces lieux de savoirs avaient donc le rôle d'apprendre, de capitaliser les connaissances et de les diffuser.

* id. p.100

A travers ces publications, le nombre de praticiens aptes à maîtriser le béton a augmenté. C'est la création des bureaux d'études.

Il y a donc en parallèle de cette recherche universitaire dépendante de l'Etat, des inventeurs du secteur privé qui expérimentent de leur côté. Dans cette catégorie, nous avons les bureaux de recherches intégrés aux entreprises industrielles.

Parallèlement à la recherche universitaire soutenue par l'Etat, l'industrie innove tout autant. C'est le cas du système Hennebique.

François Hennebique (1842-1921) est fils d'entrepreneur et dirige l'entreprise familiale où il exploite et expérimente le béton armé. En 1892 il dépose un brevet sur une alliance métal-béton, où les éléments acier sont placés explicitement en fonction des contraintes dans la matière. Des étriers sont placés aux extrémités des tiges longitudinales pour répondre au mieux aux efforts tranchants. On économise la matière acier et du même coup on améliore les capacités de notre bâtiment.

Outre ces avantages, c'est le dynamisme de l'entreprise via ces politiques de publicité, de communication et d'organisation de congrès internationaux qui font de la firme Hennebique un acteur incontournable de la construction en béton armé, comme nous le dit Cyril Simonnet.

«Dès lors, Hennebique part à la conquête d'un nouveau marché grâce à un système habile de dépendance établi avec de nombreuses entreprises de construction qui profitent de ses compétences tant théoriques que commerciales. La «maison Hennebique» devient ainsi incontournable. Le dynamisme de son patron est incontestable : il organise les premiers congrès internationaux du béton armé, crée une publication (la revue *Le Béton Armé*, 1898) tirée à 10.000 exemplaires, mandate des agents dans le monde entier [...], s'attache la collaboration d'architectes réputés comme Rabut ou Boileau. Ses talents publicitaires sont évidents, dès 1892, la publication



Fig. 8: Le pont de Plougastel introduit le béton pré-contraint d'Eugène Freyssinet, source : www.efreyssinet-association.com

d'une brochure vantant les mérites du béton par rapport au métal et intitulée «*Plus d'incendies désastreux !*» lui a valu un afflux de commandes, ce qui lui a donné l'idée de commercialiser le procédé plutôt que de construire lui-même, transférant par la même occasion les risques éventuels dans la mise-en-œuvre. Hennebique invente le bureau d'études, qui deviendra bientôt la figurante dominante de la maîtrise d'œuvre en France.”*

Au passage on remarque que le caractère ignifuge du béton séduit tout autant que ces capacités de résistance mécanique.

Le système Hennebique permet de concevoir en amont du chantier la technique constructive, on estime la quantité d'acier et de béton nécessaire dans le bureau d'études. «Dans la gestuelle du maçon traditionnel, par exemple pour monter un mur de brique, les vertus «technique» et «productive» ne sont pas dissociées : la «solidité» du mur repose à la fois sur la cohérence mécanique de l'appareil et sur un certain soin dans la pose des unités et du mortier; les deux choses sont liées.» On retrouve le principe de base de l'industrie : la séparation des tâches. Pour un ouvrage en béton, la technique est déterminée en amont par le concepteur et la production de ce dessin sur le chantier.

L'exemple de la maison Hennebique nous donne un nouvel argument en faveur de l'industrialisation. Les groupes industriels ont les fonds monétaires suffisants au développement de leur propre laboratoire de recherche, d'où la création des bureaux d'études, le plus souvent intégrés à ces structures. On peut ainsi retenir que la quête de connaissances sur un matériau favorise une démarche industrielle. En effet, en cette fin de 19e alors que le réseau de cimenterie française atteint stade de développement bien avancé, on se méfie encore des réalisations en béton. L'expérimentation des petits entrepreneurs laisse sceptiques la plupart, on a peur des fissures, des écroulements qui sont nombreux. Deux conséquences émergent de cette méfiance. La première encourage le développement des démarches industrielles qui sont en mesure de garantir les caractéristiques de leur produit, elles proposent un service de bureau d'études. La deuxième impose l'élaboration d'un cadre constructif pour surveiller toutes ces expérimentations et protéger la population de leurs sinistres.

En 1894, le système Cottancin exprime très bien cet effet de tentatives d'innovations nombreuses mais pas toujours pertinentes qui devront être contrôlées.

* Cyril Simonnet cité par Pierre Gras, dans «Sacré Béton!», article «Portraits d'inventeurs : des paternités multiples», p.47

Devant toutes ces tentatives d'emplois du béton armé, l'instauration d'un cadre réglementaire paraît indispensable.

Paul Cottancin (1865-1928) de l'École Polytechnique propose un système d'ossature métallique dans un béton avec une grande quantité d'acier pour affiner l'épaisseur des voiles. Ces tiges métalliques sont fines, pliées sur elles-mêmes pour former une toile dense.

Anatole de Baudot (1834-1915) successeur de Violet-le-Duc se passionne pour cette technique et l'utilise pour la coupole de l'église Saint-Jean de Montmartre, avec des voûtes et des parois très minces.

C'est un échec : "plusieurs édifices s'étant effondré à Paris, l'administration a commandité des expertises et arrêter tous les chantier en béton".* (id.p.47) La construction de la coupole est arrêtée pendant un long moment. Au final, Baudot et Cottancin sont évincés de la scène et le chantier reprendra avec de nouveaux architectes. "Cette aventure coûtera cher au système Cottancin, qui tombera dans l'oubli après 1914. Elle conduira cependant à l'adoption de la première réglementation française sur le béton armé, en 1906. Elle ouvre également la voie à d'autres procédés, moins complexes à mettre en œuvre, comme l'étrier, symbole de la firme Hennebique, qui fera la fortune de cette entreprise."

La nécessité de réglementer la construction béton se fait sentir étant donné tous les accidents qui ont lieu. Il s'agit donc de sécurité. "Les usages publics et civils du nouveau matériau doivent être réglementés dans les domaines de compétences du ministère des Travaux publics pour éviter les

fraudes et les malversations, pour vérifier les calculs et tirer gloire d'architectures d'ingénieurs nouvelles."*

Outre des mesures de sécurité, la réglementation facilite la mise-en-œuvre : on ne fait plus des pieds et des mains pour convaincre que notre technique est viable, on accélère la phase de conception et de dimensionnement en appliquant des règles reconnues. Les entrepreneurs n'ont plus besoin d'être extrêmement savants pour prendre en main le nouveau matériau, ils s'informent sur les documents officiels à disposition.

Au delà des arrêtés préfectoraux interdisant telle ou telles pratiques constructives, le cadre réglementaire du béton s'enrichit grâce aux progrès de la recherche scientifique. Ce savoir nous apporte les prescriptions indispensables à l'élaboration d'instructions ministérielles : une des causes de fissure est l'hétérogénéité de la composition par conséquent on exige un béton plus uniforme, de même contre la fissuration on impose des joints de dilatations tous les 50m, en 1934 on découvre que la contrainte admissible peut être augmentée d'un quart ce qui réduit du même coup les armatures acier et donc le coût de construction, et on impose un taux de ciment dans le mélange pour assurer une résistance. Donc la normalisation de la filière se fait par la recherche scientifique.

Nous verrons en troisième partie de ce mémoire qu'aujourd'hui alors que les bases réglementaires sont établies depuis longtemps, ce sont les groupes industriels de la filière qui cadrent la construction béton. Ils financent les projets de normes (recherches et homologation) qui sont rendues incontournables par la pression de ces mêmes acteurs organisés en lobbying.

Finalement, le bilan des années 1940 est encourageant pour que la filière se développe

considérablement. La main d'œuvre a été formée pendant la guerre.

Les industriels ont développé leurs activités pour répondre aux commandes de matériaux lors des grands chantiers. Ils ont amélioré leurs machines et la mécanisation s'invite sur les chantiers. Par conséquent, le temps de mise en œuvre est réduit, il peut être estimé plus finement tout comme son prix.

Les chercheurs ont érigé les bases d'une connaissance scientifique sur la matière composite et son enseignement est prodigué dans les écoles.

Maintenant que la filière béton est équipée d'une large main d'œuvre et d'un cadre réglementaire, les architectes vont pouvoir exercer l'architecture du béton armé.

Les conditions sont rassemblées pour que la période de la Reconstruction s'opère autour de ce nouveau matériau. La Reconstruction correspond à l'époque d'après guerre où les soldats reviennent dans la vie civile où la majorité du bâti a été détruite. Quelques années après on assiste au *baby boom* qui attise la pression démographique. Le manque de logements devient la priorité de l'Etat.

Alors que le béton armé était jusqu'alors consacré aux ouvrages de génie civil, on applique ces vertus au domaine de l'habitat en 1945. L'Etat soutient cette pratique : en ces temps on est persuadé que le béton donne les solutions aux enjeux contemporains, il apporte la salubrité, l'accès au logement à toutes les classes sociales en raison d'un coût de moins en moins élevé. Il est le symbole de la modernité, d'un monde meilleur basé sur une société urbaine et industrielle.

L'Etat planifie la Reconstruction et soutient l'emploi du béton. C'est l'interventionnisme d'état.

Pour opérer, les architectes enfourchent leur balai et se saisissent de la question. Vaste sujet qu'est le béton armé, ils innovent à leur tour dans de nouveaux systèmes constructifs (tel Jean Prouvé). Ils établissent une écriture propre au béton, et proposent la préfabrication comme outil de conception.

En effet si les avantages attribués en premier lieu au béton sont sa forte résistance, son inflammabilité et sa durabilité, les architectes

* André Guillerme dans «Sacré Béton!», article «France Allemagne : deux manières d'armer le béton», p.24

* id. p.32

y voient un immense terrain de jeux proposant les formes les plus saugrenues. Tout comme la terre crue, le béton offre plusieurs techniques, on peut le couler, maçonner en petits éléments parpaings, enduire, etc.

Par ses caractéristiques physiques de résistance à la compression, puis à la traction grâce au ferrailage, on rêve de grandes portées, de portes-à-faux, de points d'appui restreints...

En plus du vaste espace qu'elle promet, l'écriture architecturale du béton armé permet d'allonger les linteaux et les jambages, élargissant ainsi considérablement les ouvertures. Le soleil et la lumière sont les fondamentaux du mouvement hygiéniste. De même, la surface lisse et étanche du béton rend les murs imputrescibles, les parasites et les insectes en tout genre ne peuvent traverser le pan de pierre artificielle.

Alors de nombreux architectes s'essaient et aboutiront à l'établissement du Style International et du Mouvement Moderne, dont le référent en France reste Le Corbusier (1887-1965).

Nous n'allons pas décliner toutes ces expérimentations ni énoncer un cours d'histoire de l'Architecture Moderne mais certaines de ces recherches architecturales méritent d'être mentionnées. Elles nous aident à comprendre la marche vers la démocratisation du nouveau matériau, l'engouement qui touche les architectes.

Le premier exemple qui me paraît éloquent est celui d'[Auguste Perret](#) (1874-1954) qui très tôt s'approprie le béton et en vantent ces louanges "monolithisme, grande inertie, résistance à l'incendie, aux tremblements de terre, rapidité d'exécution."*

Les granulats qu'ils le composent sont facile à trouver, et sa résistance permet " la réduction à l'extrême du nombres de points d'appui, donc moins de sujétions; les aménagements, les transformations sont facilitées."* Ce matériau résistant, qui peut être coulé, donne à l'architecte une immense liberté, nouvelle. Selon Auguste Perret, c'est la rapidité de réalisation due à l'invention des ciments à prise rapide qui a permis au béton de prendre le-dessus sur l'acier au lendemain de la Première Guerre Mondiale.

Précurseur, il explore le béton dès le début de sa carrière, à la toute fin du 19e siècle. Il utilise pour ses constructions des planchers sur poutres en béton armé mixés avec les matériaux communs de l'époque qui sont la pierre, la brique et le bois pour la charpente. On

* Auguste Perret cité par Joseph Abram dans «Sacré Béton !» p.63, d'après le livre «Les agglomérés» d'Auguste Perret, Encyclopédie française, Tome XVI, 1935 p.7

* id.

y lit très bien l'articulation des différents matériaux.

"Or c'est précisément le caractère monolithique du béton (et donc sa capacité à faire disparaître toute notion d'articulation) qui fascine Auguste Perret. Cela le conduira bientôt à théoriser la supériorité de ce matériau sur tous les autres, comme porteur d'une technique universelle, providentielle pour résoudre les innombrables besoins de l'humanité."* Il mise sur l'avenir prometteur du béton et crée avec ses frères Gustave et Claude l'agence-entreprise «Perret Frères / architectes / constructeurs / béton armé» qui proposent tous les tâches nécessaires à l'acte de construire. La grande diversité de ses projets montre que le béton s'adapte aussi bien au logement, qu'à la salle de spectacle, en passant par le garage de la rue Ponthieu (1903) qui introduit l'esthétique du béton apparent.

Un deuxième exemple qui nous intéresse pour notre sujet est celui de [Tony Garnier](#) (1869-1948). Né à Lyon en 1869, il est originaire de la région emblématique du pisé de terre. Durant toute sa carrière il vante les mérites du béton au détriment de la terre crue rompant ainsi avec les pratiques locales ancestrales. Plusieurs raisons justifient son choix en faveur du nouveau matériau...

Tout d'abord, Tony Garnier est séduit par la liberté architecturale que procure le béton. Entre les grands volumes et les larges ouvertures, la lumière pénètre dans l'habitat qui devient moderne et sain. De même, avec les planchers en béton, on est capable de pourvoir le bâtiment d'un toit-terrace qui deviendra très vite un symbole de modernité.

"La forme architecturale devenue possible par la plasticité du béton, malléable comme l'argile avant de devenir dur comme la pierre."

De plus, cette facilité de mise-en-œuvre offre une dimension sociale sans précédent : l'architecte est convaincu qu'en industrialisant la production et la construction en béton, la société sera apte à répondre convenablement aux nouveaux enjeux du 20^e siècle, où le manque de logements en ville est de plus en plus pesant. En effet, dès la fin du 19^e siècle l'exode rural accroît la pression démographique dans les villes, les agriculteurs précaires fuient les campagnes à la recherche d'un travail dans les usines de l'agglomération qui engagent tant et plus.

Enfin une dernière raison confirme cette préférence pour le matériau béton : son caractère ignifuge et qui résiste à l'eau. Que ce soit l'incendie de Londres en 1666, l'incendie de Lisbonne en 1755, ou encore celui de Rennes en 1720, la population est marquée par des

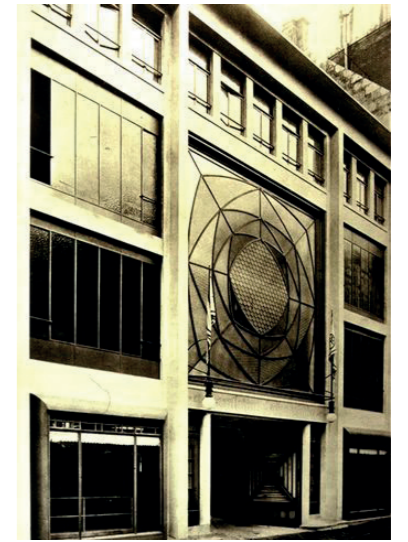


Fig. 8: Garage de la rue Ponthieu en 1903, Auguste Perret mise sur le béton apparent, source : utopies.skynetblogs.be

* Christian Marcot dans «Sacré Béton!», article «Tony Garnier : la passion du béton», p.77

traumatismes de l'époque passée que le béton paraît pouvoir éviter. A Lyon, c'est le problème de l'eau qui inquiète.

En 1856, la grande crue du Rhône dévaste le tissu urbain de la rive gauche en centre-ville construit en pisé de terre. S'ensuit un arrêté préfectoral interdisant les rezs-de-chaussée et soubassements en terre crue.

Pour beaucoup des spécialistes d'architecture, Tony Garnier est le véritable précurseur de l'écriture du béton armé, prédécesseur de la génération future des «architectes modernes». Le Corbusier lui écrira une lettre en 1919 pour le féliciter de son point de vue "visionnaire".

Dans son article de Sacré Béton !, Christian Marcot avance que Tony Garnier "contribuera fortement à l'installation d'une nouvelle modernité architecturale dont le béton s'appropriera, voire fondera, le «style». Le Corbusier écrit d'ailleurs à Garnier [...]. Sa lettre montre l'influence de Garnier sur les nouvelles générations d'architectes qui fabriqueront «l'Architecture Moderne». Au cœur des enjeux s'installe la question du matériau qui incarnera cette modernité. A ce titre, l'élaboration d'une cité industrielle correspond à un moment de transition entre l'émergence des nouveaux bétons armés et l'héritage lié aux bétons agglomérés."

La cité *industrielle* («projet papier» achevé en 1917) est l'œuvre fondamentale de l'architecte lyonnais, elle projette un plan urbain de Lyon où les quartiers de Gerland et du sud-est lyonnais sont voués à s'étendre rapidement vu le dynamisme de l'activité industrielle naissant sur le territoire. Ces «banlieues» attirent les populations rurales alors que le tissu urbain des arrondissements principaux est saturé. Il faut construire des logements pour les ouvriers appartenant aux classes populaires. L'administration de la ville du

maire Edouard Herriot (mandat de 1905 à 1940) demande une planification pour organiser cette arrivée massive de citoyens.

Tony Garnier propose cette planification en ayant en tête les pensées du moment à savoir l'hygiénisme, l'égalité sociale, le basculement d'une société qui s'urbanise. Il conceptualise les toits-terrasse, les grandes avenues saines et accessibles, les infrastructures sportives et culturelles, les logements en immeubles collectifs de plusieurs étages...

Ces habitats seraient constitués de trois matériaux béton : le béton de gravier pour l'élévation des sous-sols et des rez-de-chaussée, le béton de mâchefers pour l'élévation des murs et des étages et enfin le béton de ciment armé pour les planchers.

Selon Christian Marcot dans «Sacré Béton!», "ces trois techniques permettent de réunir, à travers l'architecture, les nombreuses recherches effectuées sur ce matériau au cours du 19^e siècle et les perspectives qui se dessinent pour lui au 20^e siècle. Ce système renvoie à une organisation complexe de la construction dans laquelle les pouvoirs publics, les architectes, les ingénieurs, les entreprises et les artisans se retrouvent pour commander, concevoir et construire une nouvelle société de progrès née de l'industrie."

Le béton de gravier utilisé pour les soubassements est composé de graviers du Rhône, de sables et de chaux hydraulique. Ce rez-de-chaussée est alors enduit de ciment qui lui procure une étanchéité. La technique du béton de gravier connue depuis les travaux de l'industriel François Coignet pour leur qualité d'étanchéité se développe, la disponibilité de ces composants lui donne une réalité économique attrayante. Le mâchefer est une technique répandue en région lyonnaise et stéphanoise du milieu du 19^e jusqu'au

milieu du 20^e siècle, il découle de la technique du pisé. On pilonne entre deux banches, des résidus de fer et des scories de houille issues de la combustion des hauts-fourneaux ou des machines à vapeur, en somme les déchets ferreux de la sidérurgie et de l'activité minière (très répandue à Saint-Etienne). "Comme pour le béton de gravier, tous les composants sont disponibles à proximité. Les scories se trouvent aux portes des usines et des gares, deux éléments symboliques de l'ère industrielle. S'ensuit un succès dû aux qualités de solidité, de résistance et d'économie du procédé. Ce procédé est alors perçu comme le principe d'une véritable révolution devant ouvrir l'ère des constructions économiques, en cohérence avec les aspirations politiques et sociales du moment."

L'évincement de la terre crue face aux matériaux industrialisés demeure un frein pour le développement de la filière aujourd'hui. Face à un siècle de pratique du béton, qu'on peut qualifier de «monopôle du béton», les savoirs-faire d'antan ont été oubliés. Contrairement au béton ils n'ont pas fait l'objet de recherches ou de capitalisation du savoir soutenu par l'Etat. Mis de côté pendant un siècle, la méconnaissance du matériau terre persiste.

* Christian Marcot dans «Sacré Béton!», article «Tony Garnier : la passion du béton», p.69

Fig. 9: La crue du Rhône à Lyon du 1er juin 1856 donne lieu à l'interdiction de construire en pisé en rez-de-chaussée, source : www.leprogres.fr



LE XXI^E SIÈCLE INTRODUIT DE NOUVEAUX ENJEUX POUR LESQUELS LA TERRE CRUE PREND SENS

Comparés le béton et la terre est une chose courante.

En réalité, une différence majeure entre le «béton d'argile» et le «béton de ciment» est à prendre en compte : si leur composition de type granulaire est semblable, c'est la nature du liant qui est fondamentalement dissemblable.

La granulométrie du béton se compose de cailloux, de gravier et de sable «collés» par un liant ciment. Ce dernier est à prise hydraulique c'est-à-dire qu'il se présente sous forme de poudre et durcira avec l'eau qu'on lui ajoute. Ce durcissement relève de la chimie : la poudre ciment est décarbonatée, on a cuit les matières premières naturelles qui sont le calcaire et l'argile, on les a concassées puis chauffées à plus de 2000°C pour que le carbone et l'eau s'évadent. Lors de cette cuisson, d'autres transformations ont lieu qui remanient les atomes en de nouvelles molécules.

Ainsi, lorsqu'on mélange cette poudre à l'eau, des transformations chimiques s'opèrent. On se rappelle de nos cours de Seconde au lycée où il nous ai demandé d'écrire l'équation de la réaction chimique avec des substances de départ vouées à disparaître qu'on nomme les «réactifs» qui se transforment en remaniant les atomes pour donner de nouvelles substances dites «produits». La durée que prend cette transformation chimique est ce qu'on appelle communément le temps de séchage ou la «prise du ciment».

Le durcissement du ciment dans le béton est donc un phénomène irréversible.

La terre est également composée de cailloux, de gravier et de sable. Mais sa composition granulométrique ne s'arrête pas là, elle compte des particules beaucoup plus petites qui sont les silts puis les argiles. La proportion de chacun de ces grains varient pour chaque terre, on parle de «spectre granulométrique» de la matière terre cure qui conditionne le choix de la technique de mise-en-œuvre (torchis, adobe, bauge, pisé, Brique de Terre Compressée BTC, enduits)

L'argile, au même titre que le ciment pour le béton, est le liant de la terre. Pareillement on ajoute de l'eau à cette poudre mais ce durcissement de l'argile relève de la physique : à l'air ambiant

l'eau finit par s'évaporer pour atteindre un taux d'humidité minimale et optimale dans le mur, cette faible quantité qui demeure crée la cohésion par le biais de ménisques d'eau «coincés» entre les plaquettes d'argile. En effet les grains d'argile, invisibles à l'œil nu, sont de l'ordre du micromètre et ne sont pas sphériques mais surfaciques : ils forment des feuillets appelés «plaquettes» qui par frottement ce maintiennent entre eux.

Ces ponts capillaires qui lient les plaquettes et donnent la cohérence à l'argile sont de très faible résistance. Un «rien» suffit à les rompre. Lorsqu'on ajoute de l'eau par exemple, ces points capillaires sont «noyés», les particules d'argile deviennent volatiles dans cette nouvelle quantité d'eau. C'est pourquoi la matière terre est dite recyclable, son durcissement est réversible.

Cette différence majeure explique pourquoi "le mélange d'une poudre de ciment et d'eau conduit à une masse cohésive, même sous l'eau, alors que le mélange d'eau et d'argile ne forme qu'une boue".* Comme nous l'avons mentionné en introduction, c'est ce caractère réversible qui séduit aujourd'hui les amateurs de terre-crue : sans réaction chimique, la terre est directement prête-à-l'emploi et pourra être recyclée sans aucun apport d'énergie pour revenir à la Terre. C'est le cycle de la terre-crue.

Au final, c'est bel-et-bien le caractère irréversible du durcissement du ciment qui a séduit les praticiens béton capable alors de résister à l'eau puis sous l'eau, dans des conditions météorologiques extrêmes ou encore sous les bombardements...

Au XX^e siècle, l'aspect irréversible de la prise du ciment fascine. Au XXI^e siècle, c'est le durcissement réversible de l'argile qui attire.



Fig. 10: Les ménisques d'eau entre les plaquettes d'argile créent la cohérence du liant de la terre, source : «Bâtir en terre : du grain de sable à l'architecture»

* «Qu'est ce que la matière liante ?», article internet proposé par Amaco, sur http://www.amaco.org/webapp/website/blank_page_content.html

Extraite de divers sols, la terre est une matière aléatoire dont la composition n'est pas maîtrisée de A à Z par la main de l'homme contrairement au ciment de Vicat ou au béton de Lafarge. Ainsi ces comportements demeurent en partie un mystère pour la communauté scientifique et son emploi n'est pas encore réglementé.

Si son usage reste occasionnel aujourd'hui en France, on se captive de plus en plus pour ces vertus face aux enjeux de notre siècle à peine débutant qu'est le 21e siècle.

Ces enjeux peuvent être énoncés à la suite de ce chapitre sur la filière béton en décrivant les recherches actuelles de ce même matériau. En effet, les prises de consciences liées aux notions de Développement Durable demande aux acteurs de la filière béton de se pencher sur un nouvel aspect concernant leur matériau, la durabilité non pas dans le sens de résistance au temps et à ses aléas mais dans le sens aggro-saxon de «soutenabilité».

La recherche actuelle de la filière béton témoigne des nouveaux enjeux du XXI^e siècle en lien avec le Développement Durable avant tout.

Il semble que la recherche technique et industrielle du secteur béton aborde la contrainte du développement durable en se préoccupant du caractère «performantiel» du matériau, soit l'accroissement de la durée de vie d'une construction béton. En ce point, il perpétue le principal intérêt historique du béton qui est sa résistance/robustesse.

La recherche autour du béton est très vaste.

Nous nous intéressons exclusivement à celle qui traite du Développement Durable. En cela, les axes d'études actuels sont multiples et peuvent être définis pour tout matériau de construction : la «durabilité» de la matière, l'énergie consommée pendant l'utilisation du bâtiment, le cycle de vie du matériau soit l'énergie consommée lors de sa fabrication et de sa réutilisation, et enfin l'enjeu sanitaire (qualité de l'air intérieur, confort thermique, etc). De plus, pour toute recherche autour d'un matériau, on peut discerner deux échelles : microscopique et maintenant nanométrique en ce qui concerne le béton qui étudie la structure moléculaire du matériau (avec ou sans additif) et l'échelle macroscopique pour la mise en œuvre ou l'organisation de la filière.

La «durabilité» du béton est vue selon deux caractères : sa qualité de robustesse ou sa qualité dite de «soutenabilité» en écho au terme anglosaxon (Sustainable Development). La première qui consiste à favoriser la pérennité d'une construction béton, étudie la structure nanométrique de la matière pour la rendre toujours plus résistante aux conditions météorologiques et autres usures subies par le bâtiment (on parle «d'environnements agressifs»). Cet axe de recherche est soutenu exclusivement par la recherche technique et industrielle du secteur béton. L'idée est de se dire qu'augmenter la durée de vie des structures bétons compenserait l'impact environnemental de sa fabrication (et de sa destruction).

La «soutenabilité» du béton est abordée de différentes manières qui sont davantage de l'ordre macroscopique que microscopique. En effet, si l'on s'intéresse à la structure moléculaire d'un matériau, il est considéré comme «durable» s'il peut être qualifié d'isolant ou de «matériau à changement de phase». C'est à dire s'il n'est pas conducteur de chaleur, ou si par un changement

d'état opérant dans sa constitution, il est capable d'emmagasiner l'énergie qui sera rediffusée plus tard. Le béton «pur» n'est ni l'un ni l'autre : sa conductivité thermique est élevée et par son durcissement irréversible dû à la chimie du ciment, il n'a pas la propriété de changer d'état physique. Pour ces raisons, la recherche sur la composition de la matière béton à devenir «soutenable», se porte sur les additifs qui lui confèrent ces propriétés comme la paraffine.

On préfère intervenir sur le bâtiment lui-même en facilitant la mise en place des isolants ou la réduction des ponts thermiques, soit procéder sur une échelle macroscopique : en ce sens, certains fournisseurs de béton prêt-à-l'emploi ou les fabricants d'éléments préfabriqués proposent des systèmes et dispositifs innovants (exemple des parpaings en béton cellulaire de *Cellumat*[®], isolants par les bulles d'air qu'ils emprisonnent).

Comme nous venons de le voir, la filière béton adopte une démarche industrielle.

De ce fait la recherche est d'autant plus active que les partenaires qui la motivent progressent dans une optique industrielle : l'innovation constante où l'on doit investir. Mais ce caractère industriel -et donc privé- des investisseurs, freinent tout autant cette recherche puisqu'elle doit s'inscrire dans l'intérêt de la firme en question.

C'est ce que nous expliquent Fabrice Bardet et Victor Villain dans leur chapitre «La place historique des partenaires économiques»* du livre *Sacré Béton!*. Dans les différentes études publiées, on remarque que la plupart des rédacteurs-chercheurs travaillent ou ont travaillé pour un groupe industriel. Ainsi, lorsqu'on tente de se focaliser sur la «soutenabilité» du matériau béton, il devient difficile de progresser sans se confronter aux intérêts du grand groupe.

Les auteurs vont même plus loin en dénonçant le lobbying porté par le Conseil mondial des entreprises pour le développement durable (BCSD, *Business Council for Sustainable Development*) qui propose leur propre définition du Développement Durable, notamment lors des Sommets de Rio de Janeiro en 1992 et de 2012. A l'inverse, lorsqu'une publication est écrite par des chercheurs qui ne sont pas apparentés à un groupe industriel, la définition qu'ils utilisent quant-à-eux est celle du GIEC (*Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat*) qui est plus objective et plus rigoureuse.

Dans ce même article, les auteurs dénoncent la prépondérance

* Fabrice Bardet et Victor Villain dans «Sacré Béton!», article «Bétons et durabilités: les perspectives de la recherche dans les revues scientifiques», p.188

de la recherche appliquée au béton au détriment des matériaux «alternatifs» comme la terre crue, appelés les «éco-matériaux».

“Les matériaux «alternatifs» comme la terre crue sont moins souvent représentés dans les articles proposés par les revues techniques spécialisées du fait, sans doute, de l'accroissement des études menées sur le béton «vert». [...] Ainsi, alors qu'en 2002, seulement deux articles étaient consacrés au béton incorporant des cendres volantes, dix années plus tard, ce ne sont pas moins de 48 articles qui portent sur la même thématique. Tous bétons confondus, pour la même période, les articles passent de 49 à 892. En revanche, les articles portant sur un matériau alternatif comme la terre sont relativement peu nombreux. En 2002, ils sont au nombre de 8 pour passer à 87 en 2012. [...] Globalement, les articles portant sur les matériaux alternatifs sont en croissance, avec par exemple un taux très favorable pour la terre, mais ceux qui concernent les bétons ont une croissance nettement plus rapide.”*

Encore une fois, nous assistons à l'évincement de la terre crue face au matériau industrialisé qui bénéficie d'une recherche soutenue dont les fonds sont levés par le capital du groupe industriel et acceptée par la pression des lobbys.

Le secteur de la construction se dote de nouveaux outils pour évaluer l'impact écologique d'un bâtiment. On instaure de nouveaux labels pour témoigner de l'efficacité énergétique de l'ouvrage : label Minergie, HQE (Haute Qualité Environnementale), BBC (Bâtiment Basse consommation), etc.

On amende le cadre réglementaire de réglementations thermiques: RT 2012, 2015 et bientôt 2025.

On invente des indicateurs, indicateurs de confort où les ambiances architecturales, l'éclairage, l'acoustique ou la ventilation sont les fondamentaux du bien-vivre de l'habitat contemporain. On compte également les indicateurs évaluant l'impact écologique du projet comme l'Analyse du Cycle de Vie-LCA (Life Cycle Analysis).

L'indicateur LCA évalue le matériau selon trois domaines qui sont d'ailleurs les trois piliers du développement durable : l'économie (coût du matériau, de la construction, de la maintenance), l'écologie (épuiement des ressources, émissions de CO₂, recyclabilité), et social (acceptation sociale, esthétique, pollution sonore, ou encore vulnérabilité de la zone par des catastrophes naturelles). Ces efforts atteignent une échelle internationale : en mars 2017, le réseau international «Life Cycle Data Network» publie une base de données regroupant les analyses de cycle de vie de plus de 60 matériaux.

Ces outils sont destinés à l'évaluation des performances énergétiques d'un matériau et plus largement de notre bâtiment, en tant qu'architecte je dois faire le choix de cette matérialité en ayant les informations en main pour décider du parti pris que je soutiendrait. C'est aussi l'avis du couple d'auteurs Fabrice Bardet et Victor Villain : “Selon une approche systématique, cet indicateur [LCA] se veut d'abord un outil d'aide à la prise de décision pour les acteurs de la construction”, dont fait parti l'architecte.

Etant donné l'énergie que demande la fabrication du ciment et la mise-en-œuvre du béton, certains questionnent la pertinence de ce matériau icône du 20^e siècle dans ce nouveau contexte du 21^e siècle. Ainsi, ces mêmes auteurs concluent leur article dans une tonalité sceptique...

“Le béton traditionnel est-il encore le roi des matériaux de construction à l'heure de la «soutenabilité»? Ou bien le béton renouvelable serait-il bientôt la panacée ? Ou bien encore est-ce que la construction artisanale en terre qui finira pas recueillir les suffrages dans les sociétés acquises à l'horizon du «développement durable» ?

Tant d'incertitudes demeurant sur l'efficacité des grilles d'analyse qui sont déployées pour répondre à ces interrogations, qu'on ne voit pas bien ce qui devrait pousser aujourd'hui les industriels des matériaux de construction à abandonner leurs positions économiques pour d'improbables gains en matière de soutenabilité. Les publications qui se développent depuis 15 ans ne permettent pas de discerner les perspectives de renversement des équilibres passés.

De ce point de vue, on aurait tort de s'étonner que les revues canoniques de la science du béton ne semblent pas engagées pour ménager les conditions de l'émergence de matériaux alternatifs, tout occupé quels sont-logiquement, à bien y regarder- a prolongé les dynamiques de recherche anciennes consacrées à la robustesse des bétons. L'enquête suggère au contraire que l'émergence de revues alternatives nouvelles a d'ores et déjà permis de rouvrir des fronts de la recherche abandonnés pendant des décennies, pour identifier de nouveaux matériaux de construction «verts». Mais il apparaît en revanche que la capacité de capitalisation de ses recherches nouvelles fait aujourd'hui défaut. Faut-il incriminer les scientifiques ? Ou bien les responsables politiques, qui ne fixent pas de cadres légaux ou réglementaires à l'établissement des conventions de calcul de la «soutenabilité» des modes de construction ?”

La production du ciment représente à elle seule, 5% des émissions de CO₂ mondiales.*

C'est dans cette nouvelle réalité que la terre crue entre en jeu avec ces qualités environnementales de plus en plus séduisantes.

* Fabrice Bardet et Victor Villain dans «Sacré Béton!», article «Bétons et durabilités: les perspectives de la recherche dans les revues scientifiques», p.192

« Bâtir en terre : du grain de sable à l'architecture », Laëticia Fontaine et Romain Anger, 2009, ed. Belin, p.32

Les avantages de la terre crue sont nombreux, mis en valeur par le projet *Armadillo Box*...

La terre, présente sous nos pieds, est une substance omniprésente qu'il suffit d'extraire pour en faire un matériau de construction. Ce passage de la matière au matériau ne demande donc aucune dépense énergétique. Crue, on ne la cuit pas contrairement au ciment qui atteint une température de cuisson supérieure à 2000°C.

Inversement, par un durcissement réversible du matériau, il est recyclable : sa destruction pour revenir à la Terre ou sous forme de construction encore une fois ne demande aucune énergie non plus. Ainsi, l'analyse du cycle de vie de la terre crue témoigne d'un impact écologique immensément faible.

Outre ces atouts écologiques, elle augmente considérablement le confort intérieur du bâtiment. C'est un matériau avec une grande inertie thermique et capable d'emmagasiner de la chaleur pour la rejeter 12 heures après, c'est un «matériau à changement de phase». Puis, par sa perspirance et porosité, elle joue le rôle de régulateur d'hygrométrie. Ces rôles régulateurs de température et d'hygrométrie assurent une qualité constante de l'air ambiant à l'intérieur du bâtiment : trop chaud ou trop humide, l'élément terre absorbe; trop froid ou trop sec, la terre restitue.

Devant cet ensemble de qualités, la matière terre suscite à nouveau l'intérêt. Laëticia Fontaine et Romain Anger décrivent ce constat de la manière suivante.

“La construction et la destruction de la maison de demain ne devront requérir quasiment aucune énergie, rendant en outre obsolètes les besoins en chauffage et en climatisation. L'enjeu est d'importance, puisque le secteur du bâtiment en France est le premier consommateur d'énergie primaire (45% de l'énergie totale consommée), largement en tête devant l'industrie (28%) et les transports (26%). Il est responsable de près d'un quart (23%) des émissions de CO₂, au même niveau que l'industrie (24%), les transports arrivant en tête (35%). Or toutes ces valeurs devront être divisées par quatre d'ici 2050 : la terre constitue-t-elle la solution idéale pour bâtir demain ?”*

La consommation énergétique du secteur du bâtiment se décompose en plusieurs causes : la fabrication des matériaux, le

« Bâtir en terre :
du grain de sable à l'architecture »,
Laëticia Fontaine et
Romain Anger, 2009, ed. Belin, p.32

transport de ces produits, leur mise-en-œuvre, puis pour l'essentiel de la facture énergétique il y a les besoins en chauffage et climatisation du bâtiment, et pour finir il y a la dernière étape de déconstruction, de recyclage ou de stockage des matériaux. En cela, les avantages précédemment explicités apportent une réponse affirmative à la question posée par L. Fontaine et R. Anger.

Dans cette optique, des étudiants de l'Ecole d'Architecture de Grenoble soumettent le projet de «l'habitat idéal» lors de la compétition du Solar Décathlon de 2010, dans le cadre d'un partenariat avec l'Institut National de l'Énergie Solaire (INES) et les Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau (GAIA). Le “prototype à énergie zéro”* se nomme *Armadillo Box*.

La réalisation rassemble les principes de l'architecture durable : les déperditions thermiques sont évitées par une isolation complète, les besoins en électricité sont réduits par l'installation d'équipements ménagers de classe énergétique A, un système de ventilation double-flux est intégré à la toiture ventilant ainsi l'air intérieur sans faire rentrer le froid puisque l'air entrant est préalablement chauffé par l'air sortant, les principes de la domotique sont adoptés avec des volets, des rideaux et autres appareils automatisés, un système de récupération d'eau de pluie permet de diffuser une humidité à l'intérieur du logement pour garantir une stabilité de température dans chaque pièce en été comme en hiver, les matériaux bois et terre sont naturels, l'acier est recyclé, enfin l'installation de 97 panneaux photovoltaïques répond à l'ensemble des besoins en électricité de la maison.

* id.

Fig. 11: Armadillo Box,
Projet pour le Solar Décathlon par
les étudiants de l'ensa Grenoble
source : assets.inhabitat.com



Le «cube» habité se structure en trois éléments.

«Core» est le noyau central concentrant les espaces servant (salles d'eau, cuisine, etc). Il a été totalement préfabriqué en usine pour respecter la durée de chantier imposée de 5 jours !

«Skin» est une enveloppe thermique faite de terre pour apporter de l'inertie thermique. Elle est isolée pour contrer les déperditions. *Armaddillo box* articule le low-tech et le high-tech mot d'ordre de leur communication, entre les matériaux vernaculaires comme la terre et le bois, et les technologies de pointe qui constituent le système producteur d'énergie ou capteurs.

Puis, une peau «skin» termine le bâtiment. Elle est faite d'acier recyclé et comporte des brises soleil pour le confort de l'utilisateur face aux surchauffes, ainsi que des capteurs d'énergie soleil.

A l'occasion d'un entretien téléphonique avec l'ingénieur fluide Romain Fèvre en février 2017, cette configuration de «l'habitat idéale» m'est confirmée. Pour ce professionnel, la maison parfaite car confortable, économique et écologique serait une enveloppe en bois contenant une grande quantité de terre à l'intérieur pour les murs à inertie thermique et régulateurs d'hygrométrie. L'ossature bois serait le support à une isolation du bâtiment complet alors que la terre qui n'est pas isolante prend le rôle d'absorption de chaleur et de rediffusion.

Bien d'autres atouts peuvent être attribués à la matière terre : disponible localement, elle s'inscrit dans une économie circulaire dont la portée sociale est de plus en plus séduisant pour les collectivités. C'est «l'intensité sociale» dont nous reparlerons par la suite. Elle permet la revalorisation de la main d'œuvre du bâtiment.

D'autres parts, témoin d'une pratique ancestrale, la terre crue a fait ces preuves quant à la longévité de ses constructions, la durabilité dans le temps.

Elle procure une liberté d'écriture au même titre que le béton puisque ces applications sont nombreuses : petits éléments à maçonner, enduit, remplissages, coulée, coffrée, sculptée...

Néanmoins, comme toutes choses, la terre crue possède des limites. Il ne s'agit en aucun cas de remplacer le béton, l'acier ou la brique cuite, mais d'identifier les avantages et les inconvénients du matériau pour l'employer à bon escient.

* Romain Fèvre,
ingénieur fluide diplômé des Mines,
chef du bureau Epco'Energie
à Villefranche-sur-Saône (69),
entretien téléphonique février 2017

Effectivement, la terre ne travaille qu'en compression. De même que le béton-matériau composite- elle résiste mal aux efforts de traction et de cisaillement. Par conséquence, les planchers de terre sont le plus souvent associés à une structure bois pour les étages que l'on vient remplir avec des «boudins» de terre fibrée appelés «quenouilles». Nicolas Meunier, maçon-piseur en région Rhône-Alpes, certifie qu'un mur porteur en pisé ne peut pas excéder 10 mètres de hauteur, matériau dense et lourd il ne supporterait même plus sont poids propre. Par ailleurs, cette charge horizontale doit être répartie sur une surface suffisamment large et non pas avec une pression ponctuelle générant alors une fissure verticale dans notre mur.

Ainsi, comme ce fût le cas pour le béton armé, on imagine que la terre fonctionne mieux en alliance avec un matériau. Le couple le plus courant est la terre et le bois qui se comportent pareillement en présence d'eau (gonflement, rétractation). C'est ce que nous rappelle Frédéric Moy lors de la deuxième conférence de Bellastock en mars 2017 :

“La terre toute seule, c'est matériau qui -pour moi- ne peut pas exister. Le monomatériau n'existe pas.”*

* Frédéric Moy conférence Bellastock #2,
le 08 mars 2017

Sans aucun doute, la pathologie la plus courante observée dans une construction en terre est le surplus d'humidité, car si l'eau permet la cohésion de la matière, elle est aussi son pire ennemie. Comme nous l'avons vu, noyées, les ménisques d'eau ne maintiennent plus les plaquette d'argiles entre-elles. Les pathologies de ce patrimoine bâti qu'on ne rénove pas toujours avec les bonnes connaissances constituent les «contre-exemples» de Stéphane Forge et Nathalie Le Paih, mentionnés en introduction.

Pour finir sur cette première partie du mémoire qui utilise la question de l'industrialisation de la filière terre pour étudier la construction d'une nouvelle filière, il nous faut établir un état des lieux de cette organisation avec en premier lieu les acteurs qui la structurent, puis les freins qui entravent le développement de l'usage de la terre crue en France. C'est l'objet de la sous-partie qui suit.

Descriptions des acteurs

On peut décrire les acteurs d'une filière selon trois domaines d'action: il y a les associations, les professionnels et les structures institutionnelles. En ce qui concerne la terre crue, "Aujourd'hui, ce tissu compte près de 650 professionnels répartis sur l'ensemble du territoire métropolitain. Il est composé à 46% d'artisans, 16% de maîtres d'œuvre/ bureaux d'études, 16% de formateurs/organismes de formation, 5% de structures de sensibilisation, 9% de producteurs, 3% de structures institutionnelles, 3% de revendeurs et 3% de laboratoires de recherche."*

Notre description se base en grande partie sur le mémoire d'Elvire Leylavergne écrit de 2010 à 2012. Elle est architecte et réalise son travail dans le cadre de sa spécialisation sur l'Architecture de Terre au sein de l'école Ensa Grenoble et de son laboratoire de recherche CRATerre. Son directeur d'étude est Patrice Doat et l'enseignant encadrant du DSA-Terre (Diplôme de Spécialisation et d'Approfondissement) est Hubert Guillaud, directeur de CRATerre dont nous reparlerons par la suite. Du fait, ce document, mis en ligne par l'association Asterre, jouie d'une reconnaissance et constitue très souvent une référence dans l'étude de notre matériau.

1- Les associations

Les structures associatives s'adonnent principalement à la valorisation et à la formation pour la construction terre crue.

La plus connue est l'association de loi 1901 CRATerre qui fut créée en 1979. Ces cinq fondateurs Patrice Doat, Alain Hays, Hugo Houben, Silvia Matuk et François Vitoux sont des étudiants de l'École d'Architecture de Grenoble, puis deviennent architectes, enseignants et chercheurs*. En 1986, leur association devient le laboratoire de recherche de l'ensa Grenoble. Leur domaine d'action est multiple : recherche scientifique sur la matière, rôle architectural d'expérimentation et de valorisation du patrimoine (inventaire des bâtiments, critiques d'architecture, etc), enquêtes et rédactions des savoirs-faire oubliés, ou encore communication. Certaines de

* Elvire Leylavergne, mémoire « La filière terre crue en France: Enjeux, freins et perspectives », encadré par Patrice Doat DSA-terre Ensa Grenoble, 2010-2012, p.20

* source : « construire en terre » 1979 CRATerre Paris Alternative et Paranthèses

leurs actions sont notoires et constituent aujourd'hui des références connues et reconnues dans le monde de la construction. Il y eut notamment les nombreuses expérimentations dans cette région Isère, à l'isle d'Abeau dans les années 80.

A cette même période, c'est l'édification du *Domaine de la Terre* à Villefontaine (en Isère) entre 1981 et 1985, commanditée par une maîtrise d'ouvrage publique de l'OPAC de l'Isère et l'Etablissement Public de l'Isle d'Abeau (EPIIDA). Pour cette occasion, CRATerre rédige les « *Recommandations pour la conception des bâtiments du Village Terre* » et participe à l'exposition « *Des architectures de terre ou l'avenir d'une tradition millénaire* » à Beaubourg.

Pour beaucoup, ce fut l'événement qui marque la naissance de la filière terre-crue contemporaine. Il eut lieu en 1981 au centre George Pompidou, organisé par le Centre de Création Industrielle (CCI), à laquelle CRATerre, le CSTB et l'ENTPE (Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat) apportent leurs connaissances. Cette exposition parcourut le Monde et fût très largement diffusée, d'autant qu'elle s'est tenue seulement quatre ans après la construction du musée à l'architecture très contemporaine (qui fit parler d'elle).

Fig. 12 : le Domaine de la Terre, projet d'expérimentation et de mise en valeur de 1985 source : visite octobre 2016



Suite à cette aventure réussie, on eut l'idée de créer un centre de formation dédié à la terre crue, ce sont Les Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau, fondés en 1991 grâce aux volontés du Syndicat d'Agglomération Nouvelle (SAN), de l'EPIDA, de la Direction de l'Architecture et de l'Urbanisme et l'Ensa Grenoble. Son but est de former étudiants et professionnels, d'informer et de diffuser les cultures constructives, d'innover et de faire de la recherche. Les écoles Ensa, Insa ou ENTPE, viennent profiter des locaux pour manipuler dans le cadre de leurs enseignements qui peut être aussi bien sur la terre que sur le bambou (Ensa Saint-Etienne), ou les structures gonflables (Ensa Paris-Malaquais).

Selon leur site Internet, leur "concept pédagogique se fonde dans la synergie entre six disciplines : Architecture, Ingénierie, Art, Design, Sciences et Industrie". Il y a là un caractère pluridisciplinaire apporté par l'usage de ce matériau que nous retrouverons tout au long de notre enquête.

En 2012, Les Grands Ateliers créent Amaco, un projet intitulé «Atelier MATières à CONstruire». Il diffuse le savoir acquis sur la terre-crue, il a un but pédagogique. Par exemple, il met en ligne les vidéos «Grains de bâtisseurs» d'un format court (5 minutes) qui présentent une caractéristique particulière de la matière en filmant une expérience ou un exercice à faire chez soi. Il donne également des formations comme celle proposée aux professionnels sur la technique de la terre coulée en Juillet 2017 qui est agréée par les OPCA (Organismes paritaires collecteurs agréés).

Après CRATerre, la deuxième association la plus connue est Asterre (Association nationale des professionnels de la terre crue). C'est une 1901 qui fût fondée en 2006 "née du désir de collaboration et du besoin de communication entre des partenaires qui œuvrent depuis plus de vingt ans à la reconnaissance du savoir-faire et de l'architecture en terre crue."* Elle compte des membres actifs (artisans, des producteurs, des architectes...) et des membres associés comme CRATerre, ou plusieurs écoles. Elle se donne plusieurs objectifs dont l'un est la rédaction des Règles Professionnelles de la Terre crue pour décoincer les freins de la filière liés au cadre législatif que nous expliciterons plus tard. L'association se donne également un rôle de «réseau professionnel» dans le sens où elle offre un large carnet d'adresse pour les professionnels et fait la promotion des entreprises membres.

* source: <http://www.lesgrandsateliers.org/3-agenda.htm>

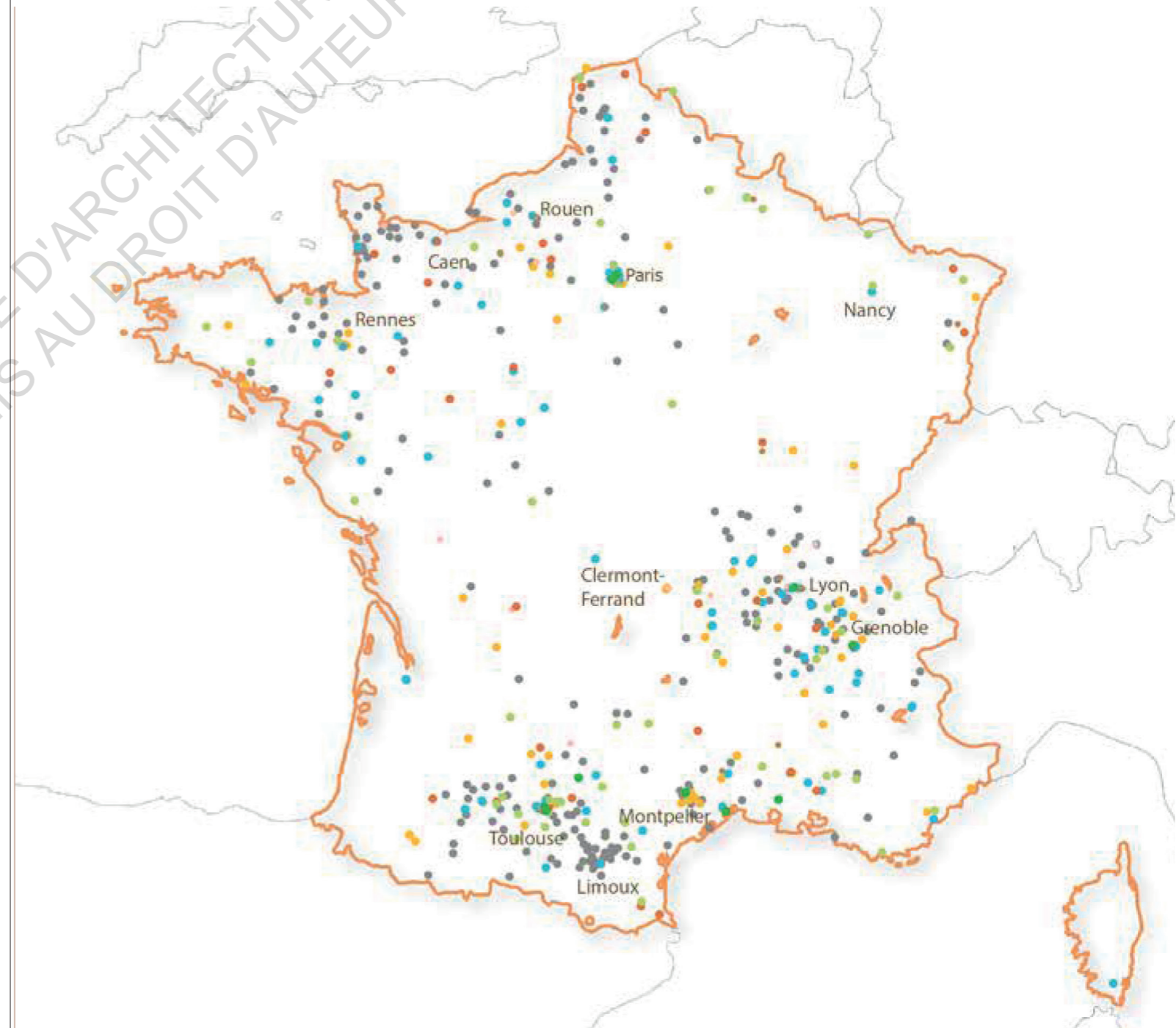
* source: <http://www.asterre.org/association/genese>

Les structures associatives qui œuvrent majoritairement à la démocratisation de la terre crue, proposent plusieurs répertoires (disponibles sur les sites officiels tels CRATerre.org, Asterre.org, etc) qui localisent et dénombrent les professionnels de la filière. Elvire Leylavergne dans son travail, utilise ses données pour les compiler en une cartographie faites en 2012 de la totalité des acteurs de la filière (fig.13 ci-dessous).

Fig. 13 : Répartition des acteurs de la filière terre en 2012 par Elvire Leylavergne, source : mémoire «La filière terre crue en France: Enjeux, freins et perspectives»

Carte des professionnels

- Artisans/Entreprises
- Maîtres d'oeuvre et BE
- Formations
- Sensibilisation
- Laboratoires
- Producteurs
- Revendeurs
- Représentants de professionnels et services de l'Etat



2-Les professionnels

“Les professionnels sont artisans, producteurs de matériaux, architectes, bureaux d'études, formateurs et organismes de formation, chercheurs, directeurs de laboratoires et centre de recherches, revendeurs, représentants de professionnels”.*

La majorité d'entre-eux, soit 80%, sont maçons. Les 20% restant, se concentrent sur le second-œuvre (finition et décoration). Par la nature vernaculaire des savoirs-faire, la plupart ne maîtrisent pas toutes les techniques de mise en œuvre. Jeunes professionnels et artisans plus âgés se côtoient. Les uns, motivés par la dimension écologique et novatrice de la terre, les autres, héritiers d'un savoir-faire rare et ancestral.

Ils travaillent dans des entreprises soit petites, soit pluridisciplinaires. Une tendance à l'élargissement des compétences professionnelles apparaît : de plus en plus, les acteurs (maçons, menuisiers, spécialistes de la paille, agriculteurs, ou architectes de formation) se rassemblent pour mutualiser leur culture. Ainsi, on peut citer comme exemple d'organisations émergentes : les Travailleurs Occasionnels du Bâtiment (TOB) et les Sociétés Coopératives et Participatives (SCOP), qui “conduisent ainsi au décloisonnement des compétences”.*

On assiste au décloisonnement des disciplines, c'est la pluridisciplinarité.

Une branche qui nous intéresse tout particulièrement avec notre problématique de l'industrialisation, est celle des producteurs qui, selon Elvire Leylavergne, sont peu nombreux et surtout hétérogènes. Ce sont des structures qui restent artisanales ou semi-industrielles. Ces dernières sont en fait la majorité; ce sont des briqueteries, donc fabricants de terre cuite. Par conséquent, elles produisent des déchets composés d'argile et possèdent les machines nécessaires aux recyclages de ces matières qu'il faudra concasser, tamiser, broyer, etc. Il semble que les briquetiers soient porteurs d'une dynamique dans la filière en tant que fournisseur du matériau.

Les fournisseurs se maintiennent à des commerces spécialisés dans les éco-matériaux et à rayonnement régional. On peut vérifier ce point en regardant la liste des points de vente des produits commercialisés comme ceux du producteur Akterre, sans doute le plus connu de la filière. Par ailleurs, lorsqu'on recherche bêtement un produit terre

* Elvire Leylavergne, mémoire « La filière terre crue en France: Enjeux, freins et perspectives », encadré par Patrice Doat DSA-terre Ensa Grenoble, 2010-2012, p.20

* id. p.23

sur le site des grands (échelle nationale) fournisseurs de matériaux de construction comme Bigmat, le seul exemple que l'on peut trouver est une terre à enduit chez Point P.* ()

La présentation de ces fournisseurs-fabricants est davantage détaillée en partie 2 de ce mémoire, consacrée aux formes d'industrialisation de la filière.

Le corps de formation est “composé à 35% de centres de formation initiale et professionnelle (ENSAG, ENTP, INSA, IUT, GRETTA, AFPA), à 33% de structures associatives. Les 22% restant regroupent des organismes institutionnels, des producteurs et des revendeurs de matériaux, des architectes, des bureaux d'études et quelques entreprises.”

En ce qui concerne les études d'architecture et plus particulièrement les Ensa, les contenus pédagogiques sont de plus en plus tournés vers le Développement Durable et certains s'intéressent notamment à la terre crue. C'est les cas de : l'Ensa Grenoble-bien sûr avec CRATerre et le DSA-terre, notre Ensa Nantes avec l'UE proposée par Bettina Horsch et Ricardo de Paoli. D'après une enquête que j'ai pu lancer sur les réseaux sociaux, il y a également : ENSAB avec Loïc Daubas, EnsaMarseille dans le studio de Florence Srano où les étudiants participent au Festival Grains d'Isère, l'Ensa Normandie avec François Streiff pour un workshop, l'EnsaStarsbourg propose une licence-pro «construire écologique» avec des ateliers terre-crue et des cours magistraux pour le tronc commun architecte, l'EnsaVersailles avec un workshop en 2ème année, ou encore à l'EnsaLyon où ce sont des workshops avec Amaco ou des cours avec Les Grands Ateliers.

Les structures institutionnelles

Ces structures appuient les actions des associations. Elles aident à la diffusion et au partage des connaissances comme le CAUE (Conseil en Architecture, Urbanisme et Environnement). Parfois elles stimulent les expérimentations et la démocratisation de l'usage de la terre comme pour les Parcs Naturels Régionaux (PNR). Leur rôle le plus évident ou du moins qui touche le plus large public est sans doute les expositions qu'elles commanditent aux associations comme nous l'avons vu avec celle de 1981 au centre Pompidou. Depuis d'autres événements se sont tenus pour œuvrer à la sensibilisation, de plus en plus fréquemment.

* «Enduit monocouche lourd, grain fin terre argile T30» sac 30 kg PAREXLANKO sur pointp.fr

* Elvire Leylavergne, p.23

Cette année 2016 par exemple, il y eut Lyon Capital de la Terre avec l'exposition «ArchéoTERRA» organisée en partenariat avec CRATerre, que j'ai pu visiter au Musée Gallo-Romain de la ville. A cette occasion, les 40 projets finalistes du Terra Awards ont été présentés, une exposition itinérante «Architecture en terre d'aujourd'hui» actuellement installée dans notre école, Ensa Nantes. A Paris, le pavillon de l'Arsenal expose en hiver 2016, «Terres de Paris : de la matière au matériau» qui questionne le réemplois des terres excavées du Grand Paris avec la nouvelle ligne de métro.



Fig. 14: Exposition «ArchéoTERRA» au Musée Gallo-Romain de Lyon, le contenu s'imisce dans cette architecture Moderne remarquable de Bernard Zehrfuss

De plus, ces organismes représentant l'Etat, peuvent être les commanditaires de projets (Domaine de la Terre) ou de travaux d'inventaires, d'étude, de faisabilité de normes. Ce fût le cas en 2012, le ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie demande à Asterre d'analyser les freins de la filière et les solutions. Pour se faire, des acteurs diversifiés se réunissent à six reprises : les trois premières réunions discutent pour révéler les freins, et les trois autres décident des actions qui pourraient y répondre. Les acteurs sont des artisans, des architectes, des producteurs de matériaux, des formateurs, des chercheurs, des structures institutionnelles, et des représentants de réseaux tels la Confédération des Artisans et Petites Entreprises du Bâtiment (CAPEB), Ecobâtir, la Fédération Française du bâtiment (FFB), l'Union des Sociétés Coopératives et Participatives (SCOP).

Acteurs immatériels : les réseaux, les labels et les prix

Pour finir sur la présentation des acteurs de cette filière, il est nécessaire de parler des réseaux. Immatériels, ils permettent aux professionnels de s'unir autour d'un but commun, de développer un langage et de se faire connaître aussi bien par le public que par les organismes nationaux ou internationaux. Cette représentation à une échelle élargie, nous rappelle la notion de «lobbying» mentionnée précédemment pour le béton. Ces réseaux peuvent être régionaux, nationaux ou internationaux. Par exemple, le Réseau Armoricaïn pour la région Bretagne, Asterre comme nous l'avons dit ou Ecobâtir pour

la France, CRATerre ou les différents labels et prix de reconnaissance pour la dimension internationale (label suisse Minergie, ou allemand Passivhaus, le prix Terra Awards).

Ces acteurs orchestrent de nombreuses actions pour tenter de développer la filière terre-cru. Elvire Leylavergne les liste sous la forme d'une carte mentale non exhaustive reliant la mission à l'organisme commanditaire. J'ai pu analyser ce document pour catégoriser ces actions traitées en différents registres :

- la recherche scientifique pour comprendre la matière
- les projets de bâtiments ou œuvre d'art pour expérimenter l'architecture
- les travaux d'inventaire ou la capitalisation des connaissances, du patrimoine bâti pour décrire la filière
- les événements (expositions, festivals) pour se faire connaître du grand public
- l'organisation de réseau, colloque ou assemblée pour que les professionnels se côtoient et partagent leur savoir
- les actions qui tentent de normaliser la construction terre
- les projets qui se tournent vers l'industrialisation

Cet organigramme (fig.15 *ci-après*) est donc le fruit du travail d'Elvire Leylavergne, mais les aplats de couleurs qui classent les actions, sont des modifications du document original que j'apporte. Il permet de mettre en lumière les domaines questionnés dans l'évolution d'une filière, de faire ressortir les priorités et donc les freins. Grâce au «squelette» commenté d'Elvire nous comprenons mieux l'influence de chaque organisme (association/institution, régional/national). Les actions sont, dans les grandes lignes la communication (intra-filière ou grand public), l'enseignement, la recherche scientifique, la capitalisation technique, les politiques de développement local.

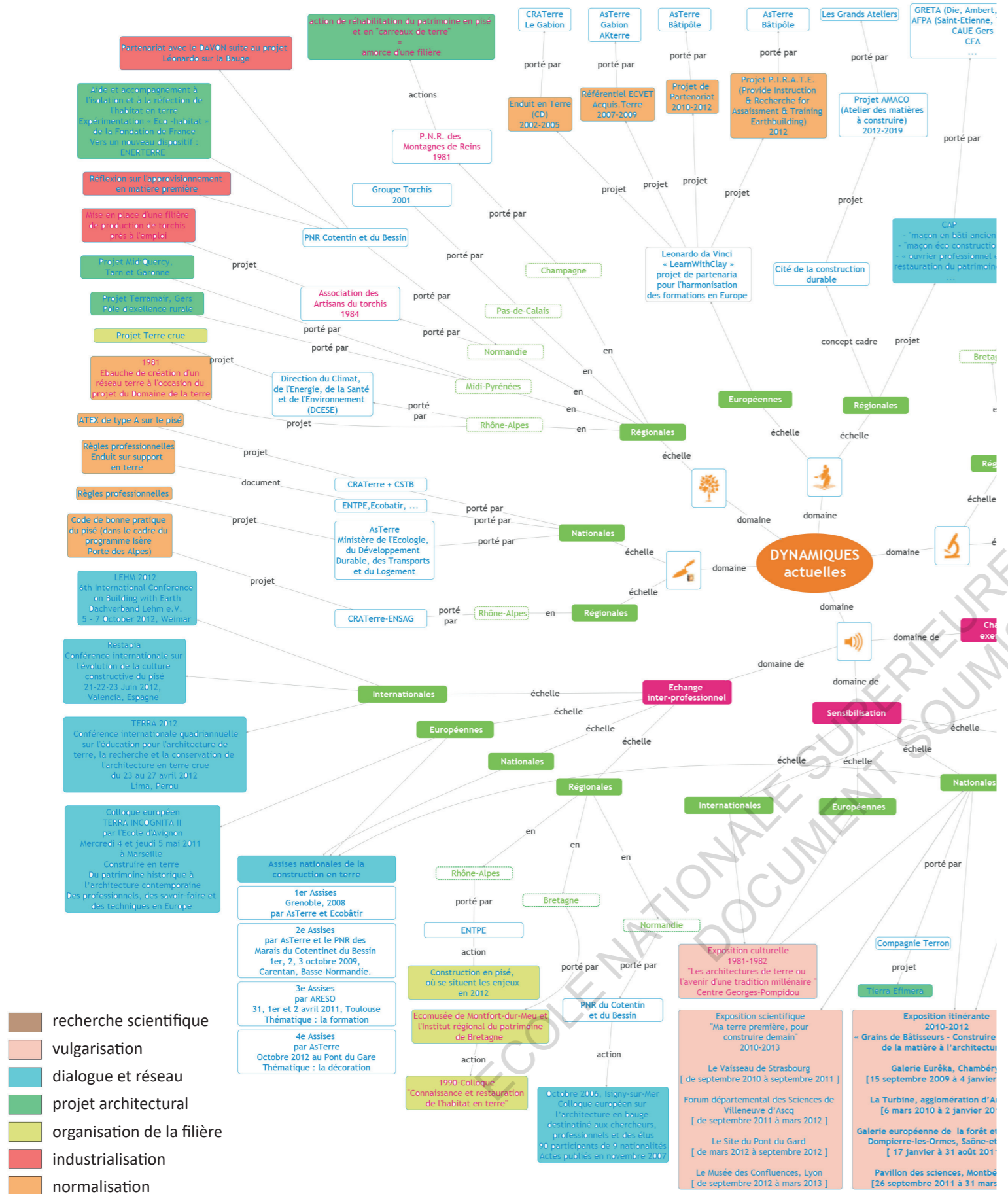


Fig. 15: Inventaire des missions actuelles des acteurs, organigramme d'Elvire Leylavergne (mémoire DSA 2012) et analyse de ma part (2017)

Les freins de la filière terre

Les freins de la filière sont analysés en détail dans ce travail d'Elvire Leylavergne. Ses recherches durent deux ans de 2010 à 2012 et tombent en adéquation avec le rapport d'Asterre, évoqué précédemment, commandité par le Ministère de l'égalité des territoires et du logement et le Ministère de l'écologie et du développement durable. Ils ont pu partager leurs éléments d'étude. Ainsi, leurs conclusions se recoupent et s'accordent sur huit enjeux :

- peu de praticiens compétents
- manque de référentiel technique
- manque de référentiel de compétences
- manque de soutien institutionnel
- manque de collaboration interprofessionnelle
- un réseau difficilement accessible depuis l'extérieur
- des rénovations de patrimoine qui ne sont pas appropriées
- pauvre culture générale

L'objectif de ces rapports s'est fait en trois étapes : décrire la filière avec un état des lieux sur ses acteurs, pointer les problèmes auxquels ils se confrontaient, puis proposer des réponses. Ils distinguent cinq domaines d'un plan d'actions : réseaux professionnels, capitalisation des connaissances, formation, communication, économie.

A présent, sur cette base de 8 enjeux proposés en 2012, nous allons détailler ce qu'ils sous-entendent et amender l'enquête sur les freins de filière en explicitant les liens de cause-à-effet apportés par nos recherches.

Le «peu de praticiens compétents» induit une main d'œuvre rare et par conséquent onéreuse. C'est l'un des principaux soucis de la construction terre crue : elle coûte encore très chère.

Le «manque de référentiel technique» est l'inexistence de documents officiels tels que les Règles Professionnelles (que possède la construction paille), pas de DTU (pour la filière bois), pas suffisamment d'Atex, pas de codes des bonnes pratiques (en cours de rédaction). C'est-à-dire qu'il n'y a pas de textes homologués permettant de décrire une mise-en-œuvre ou un produit. Il paraît

Cette liste ci-contre utilise le vocabulaire* d'Elvire Leylavergne et non pas du compte-rendu Asterre, de plus j'ai modifié l'ordre de présentation de ces enjeux pour un souci de clarté de lecture.

* conférence mars 2015 à l'insa lyon, pour les étudiants de 5e année, mise en ligne par amaco <https://vimeo.com/channels/942029/176280158>

être la cause de bien des soucis...

Le «manque de référentiel de compétences» tient du registre de la formation : il n'existe pas de base de donnée présentant les offres de formations terre, les savoirs à enseigner et à acquérir ne sont pas définis donc on ne peut pas attester le niveau de l'étudiant. Les formations sont pour la plupart non-diplômantes*. Il semble que ce point soit -en somme- une conséquence du manque de référentiel technique dans le sens où aucune description des savoirs-faire n'a lieu. Elvire s'exprime d'ailleurs ainsi : «une faiblesse dans l'offre d'enseignement à tous les niveaux, scolaire, universitaire et professionnel. Peu de référentiels techniques officiels et reconnus existent et rendent crédibles les formations existantes.»* Comme en témoigne Nicolas Meunier (maçon-piseur à Saint-Etienne), sans formation il n'y a pas de bâtiment, et inversement, c'est une impasse : «Dans l'enseignement initial, jamais on ne parlait de ces matériaux [traditionnels]. On apprend effectivement ce qui correspond à la demande, c'est un cercle vicieux : puisque la demande c'est le béton et le parpaing, la formation c'est sur le béton et le parpaing. Et l'inverse est vrai : comme les gens sont formés avec ces matériaux, plus personne ne demande. On se mord un petit peu la queue.»*

Le «manque de soutien institutionnel» est entre-autre dénoncé par les artisans sous l'absence d'un «lobbying terreux». «Il en résulte par exemple des réglementations thermiques ne prenant pas en compte les potentiels d'inertie et de régulation hygrothermique de la terre crue». Ces institutions pourraient notamment combler le manque de formations en demandant l'intégration progressive du matériau dans les écoles. D'autre part, sauf exception (Domaine de la terre), on remarque que les demandes de projet de construction en terre sont le plus souvent dues à la motivation de quelques militants qui peuvent être l'architecte, une association ou la maîtrise d'ouvrage qui est le plus souvent privée pour la filière terre.

Directement lié, c'est le «manque de collaboration interprofessionnelle» qui profiterait d'une logique de filière mieux ficelée. Les professionnels exercent dans leur région, avec leur propre savoir, il est rare qu'un entrepreneur connaisse toutes les techniques de mise en œuvre. Le partage des savoirs interprofessionnels est primordial si l'on veut que la maîtrise d'ouvrage, l'architecte, les bureaux d'étude, les bureaux de contrôle et les entreprises puissent se mettre d'accord et trouver une même finalité. Encore une fois,

* Elvire Leylavergne, «formations sont majoritairement non diplômantes» p.66 mémoire «La filière terre crue en France: Enjeux, freins et perspectives»

* id. p.47

* interview sur le site officiel de l'entreprise Nicolas Meunier, <http://www.construction-pise.fr/Interview>

* Elvire Leylavergne p.47

l'établissement d'un document descriptif des savoirs-faire permettrait de relever ce défi, puisqu'il définit une base et un langage sur lequel les acteurs pourraient partager.

On entrevoit «la limite d'un système associatif», les structures se multiplient ce qui ne clarifie pas la chose et garde un rayonnement d'influence restreint à leur localité. L'exemple donné par E. Leylavergne en témoigne fort bien : "En Basse-Normandie, le PNR des marais du Cotentin et du Bessin, a récemment découvert un organisme «inconnu» menant une réflexion similaire aux siennes, à l'occasion de questionnements sur la mise en place d'un centre de formation sur la construction en terre. Cela traduit une difficulté à connaître les différents acteurs et leurs recherches dans un rayon de moins de 100km."*

Sans logique de filière au niveau nationale, avec une visibilité entravée par ces développements polynucléaires et d'échelle locale, on se retrouve face «un réseau difficilement accessible depuis l'extérieur». Ce qui a deux conséquences. La démocratisation de l'usage de la terre est du fait réfrénée : si un individu s'y intéresse, il se confronte à un cercle fermé fait d'une multitude de structures, il ne sait plus à qui s'adresser. De plus, comme le disent les artisans interrogés, l'impact économique en souffre, on est face à un marché de niche où l'approvisionnement est peu diversifié et commercialisé.

Les deux derniers enjeux de la liste «rénovations de patrimoine qui ne sont pas appropriées» et «pauvre culture générale» vont de paire. Les erreurs de rénovation sont les «contres-exemple» de Stéphane Forge ou de Nathalie Le Paih* qui nuisent à la réputation du matériau terre. Lorsqu'on recouvre un mur pisé perspirant, d'un enduit ciment étanche, l'eau du mur ne peut plus s'échapper, le bâtiment moisit et des fissures

apparaissent. Le passant venu se promener à la campagne n'est donc pas séduit par la chose... C'est bien le fait d'une méconnaissance générale du matériau qui freine la valorisation du patrimoine.

On s'aperçoit alors que le manque de savoir semble être le problème prépondérant. Il y a le savoir «réel» et le savoir «officiel».

«Réel» soit scientifique. En effet on ne connaît pas assez bien la matière pour proposer des schéma mécaniques justes, on ne sait pas faire les calculs de structure ni même d'hygrométrie ou de thermicité, on ne sait pas caractériser chaque terre.

Un savoir officiel c'est-à-dire rédigé, édité, diffusé, accepté, voire normé. La filière ne possède pas les documents de référence technique.

Comme nous l'avons vu pour le béton, les progrès de la recherche scientifique aident à caractériser le matériau et suggèrent les prescriptions à la base d'un cadre réglementaire. Il nous faut donc acquérir ce savoir factuel pour débloquent la filière. Pour ce faire, j'ai rencontré deux acteurs de branches différentes si je puis dire. Il y a Erwan Hamard, ingénieur en génie civil qui après avoir intégré le laboratoire de l'ENTPE à Lyon, écrit actuellement une thèse sur les savoirs-faire oubliés de la terre crue à l'IFSTTAR. Il fait partie de la communauté scientifique cependant son travail ne s'inscrit pas dans une démarche «physique ou mécanique» pour découvrir les caractéristiques de la matière, mais dans une démarche «archéologique», à la recherche des savoirs-faire perdus. Il mène l'enquête sur le terrain de la région bretonne soit de la technique bauge et analyse les informations en recueillies en tentant de formuler les paramètres qui permettraient de caractériser une «bonne terre à bauge». La finalité est d'établir une proposition de

test chantier performant sur lequel la construction terre crue pourra être réglementée.

Le deuxième professionnel que j'ai rencontré en mars 2017, est architecte à Lyon. Il s'appelle Stéphane Forge et fait parti de la «communauté des praticiens». Il est membre de l'association Tera (Terre crue Rhône-Alpes) chargée de rédiger les Codes de bonnes pratiques du pisé. D'autres groupements mènent un travail semblable pour l'élaboration d'un cadre normatif via un guide des bonnes pratiques comme Les Terreux Armoriciens dont Erwan Hamard fait lui-même parti, spécialiste de la Bauge en Bretagne.

Les travaux de ces deux rencontres sont davantage détaillés en partie 3 de ce mémoire concernant la normalisation de la terre crue. Mentionnés ici, ils permettent de mettre en valeur la complexité de la (re)découverte d'un savoir rassemblant une multitude d'acteur aux paternités diverses (ingénieur, architecte, maçon, économiste, industriel, artisan, assureur, etc).

Face aux freins majeurs mis en exergue précédemment à savoir le coût de la main d'œuvre et son cadre normatif inexistant, la question de l'industrialisation se pose. Le débat est actuel. En ayant en tête le propos de la première partie du mémoire sur la filière béton, on peut comprendre pourquoi la question se pose : l'industriel est capable de financer une recherche scientifique et de garantir un produit, c'est une première forme de normalisation, la mécanisation accélère la mise-en-œuvre qui s'élargit devenant ainsi moins chère, l'acte de construire est cloisonné entre un producteur, un fournisseur, un bureau d'études, un architecte et autres qui soutiennent la technocratisation c'est-à-dire la traçabilité des responsabilités, la normalisation encore une fois. Ces questionnements sont discutés dans la partie suivante et leurs contre-arguments sont présentés pour comprendre pourquoi il n'est pas si évident d'adapter l'usage de la terre crue au cadre hérité du siècle passé consacré au béton.

* Elvire Leylavergne p.92

* Propos de Stéphane Forge lors de notre entrevue, Propos de Nathalie Le Paih lors d'un cours magistral à l'Ensa Nantes dans le cadre de l'UE - Terre crue, mars 2017

Pour conclure cette première partie, j’emprunte les propos d’Hubert Guillaud (directeur du laboratoire CRAterre) à travers deux citations qui selon moi décrivent parfaitement les rouages de la filière terre crue actuelle.

“Dotée d’une très ancienne tradition d’architecture de terre, présente dans la plupart de ses régions sous des formes aussi riches que variées, la France perpétuait la construction en terre jusqu’en les années 1950 qui voyaient une nouvelle dynamisation de l’industrie du bâtiment après les époques de crise du deuxième conflit mondial. Le désenclavement accru des espaces ruraux et la pénétration des matériaux et techniques industrialisés, soutenus par l’extension du réseau public de communication et d’échanges commerciaux rendaient désuète la construction en terre basée sur des formes de mise en œuvre intensive et sur l’entraide collective.”*

“Le passage des sociétés traditionnelles et rurales à des sociétés industrielles et urbaines a modifié les rapports au sein des sociétés en fragmentant et complexifiant les échanges. Cette transformation est particulièrement sensible dans les domaines techniques qui ont les premiers subis les effets de la «révolution industrielle» ou de la «modernité». Elle a imposé l’existence de documents de référence, de spécifications ou règles de l’art, de normes qui sont devenues indispensables pour réguler les rapports entre un éventail d’opérateurs tels que producteurs de matériaux et composants de construction, grosses entreprises industrielles et commerciales, société de promotion immobilières, entrepreneurs et artisans, maîtres d’ouvrages et maîtres d’œuvre, bureaux d’études et contrôleurs techniques.”*

.....

* article «Normes et Recommandations»
par Hubert Guillaud,
2005, publié dans
l’Encyclopédie du Bâtiment,
éd. Weka, p.5

* id. p.1

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

2/ L'industrialisation de la filière terre-crue

*“On peut refuser de fréquenter l'industrie, la combattre, on ne peut l'ignorer : ce n'est qu'en face d'elle que se marginalisent certains nostalgiques du retour à la pierre, au pavé, à la bourgade, au travesti; et ils ont leur logique. On peut aussi chercher à la dévier ; pour cela il faut y entrer, lui proposer d'autres directions possibles, ruser, maintenir des malentendus, essayer de la pirater, la pousser au bout de ses limites et voir si cela suffit... ce n'est pas un compte de fée.”**
Lucien Kroll

Contourner l'industrialisation ne signifie pas le retour à la pierre. Ce n'est pas blanc ou rouge, ce n'est pas rose ou noir. Il y a de multiples degrés d'industrialisation.

Dans cette deuxième partie, il ne s'agit pas de trancher moi-même sur le débat de l'industrialisation de la terre-crue, mais de présenter une palette d'exemples et d'arguments qui permettent de comprendre les raisonnements sur la définition d'un matériau de construction. A quel moment la matière devient matériau ? Dans mon rôle d'architecte, je fais le choix d'un matériau : que se cache-t-il derrière son prix, son coût de main d'œuvre, sa provenance, sa facilité de mise-en-œuvre, sa facilité d'assurabilité, etc ? Les exemples proposés n'ont pas pour but de tenir une liste exhaustive des innovations mais d'illustrer les raisonnements courants. Ainsi, les pratiques associées à l'adobe, briques de terre crue, et pisé sont les plus évoquées, témoins des démarches industrielles les plus avancées de la filière actuelle.

Cette deuxième partie de mémoire se décompose en deux grands volets : la production du matériau terre puis sa mise-en-œuvre.

Tout d'abord, il faut définir ce qu'est l'industrialisation et c'est un exercice complexe. Ma réflexion a été d'étudier plusieurs définitions et de relever les notions prépondérantes.

* Lucien Kroll dans
« Composants, faut-il industrialiser
l'architecture ? » (p.32), éd. Socorema, 1988.

Dans le langage commun, l'industrialisation est "l'application des procédés de l'industrie à une activité"* et c'est en cela que la notion est difficilement descriptible puisque les caractères industriels appliqués à un secteur sont multiples. Est-ce le fait de produire en masse ? Est-ce le fait d'utiliser des machines ? Est-ce «l'organisation scientifique du travail» ? Est-ce la standardisation ?

Dans son sens premier, le mot «industrie» vient du latin *industria* qui signifie "application, activité, assiduité"*. Nous découvrons la première notion prépondérante qui résulte du «faire» : produire un bien matériel, transformer, appliquer un procédé à une matière première. Que ce soit dans Le Gaffiot, dans Le Larousse, pour l'Académie Française, pour le CNRTL, etc, le mot «machine» n'est pas utilisé. Pourtant l'image courante que l'on a de l'industrie, est bien celle de la machinerie, de la mécanisation, des engrenages de Charlie Chaplin... En réalité, c'est l'objectif d'une productivité élevée et de la rationalisation du travail qu'il faut bel et bien retenir qui nous vient tout droit du taylorisme, apogée du phénomène industriel.

Les expressions courantes comme «l'industrie du crime» découlent de cette définition "activité organisée de manière précise et sur une grande échelle"*. En clair, la définition que nous retiendront est celle proposée par le CNRTL :

"Processus complexe qui permet d'appliquer à un secteur, à une branche de l'économie, des techniques et des procédés industriels qui apportent rationalisation et hausse de productivité"*.

Appliquée au bâtiment, l'industrialisation prend plusieurs sens. Nous n'allons pas faire une dissertation complète sur le sujet, mais révéler une poignée d'éléments qui nous semblent pertinents.

Pour moi, suite au propos précédent, l'organisation du chantier en lots (fondations, gros-œuvre, électricité, peinture, placo, etc) est déjà une forme d'industrialisation dans le sens de la «séparation des tâches» pour faire référence aux théories de Frederick Winslow Taylor et de son «organisation scientifique du travail».

Dans une entrevue que j'ai menée avec Stéphane Forge en février 2017, cet architecte spécialisé dans la terre-crue me dit : "Tu te rends compte que chez les plaquistes, il y a celui qui pose les rails, celui qui

* définition de industrialisation pour le Larousse, éd. Internet www.larousse.fr

* *industria* Gaffiot, p.808

* "Essemble des activités économiques qui produisent des biens matériels par la transformation et la mise en œuvre de matières premières" déf. de «industrie» pour le Larousse, éd. Internet www.larousse.fr

* *id.*

* déf. de «industrialisation» proposée par le CNRTL (Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales), éd. Internet www.cnrtl.fr/definition/industrialisation

pose les plaques et celui qui fait les bandes à joint. Ils sont incapables d'échanger leur poste. Pour moi le bâtiment ce n'est pas ça, ce n'est pas du Charlie Chaplin!"

"Pour moi le bâtiment ce n'est pas ça, ce n'est pas du Charlie Chaplin!"*

Si l'on s'attelle aux discours soutenus par les figures de l'industrialisation du bâtiment tels les architectes Konrad Wachsmann, Walter Gropius, ou Jean Prouvé, les formes constructives proviennent davantage de l'ordre de la répétition et de la mécanisation : ils théorisent la préfabrication, ou la production en série. La thèse de Aleyda Resendiz-Vazquez* sur l'industrialisation du bâtiment, soutenue en 2010, rassemble dans les documents *ci-après* plusieurs définitions d'architectes qui offrent un rapide coup d'œil quant aux idées concernées dans ce processus industriel. Les propriétés courantes sont les suivantes : "série, répétition, normalisation, standardisation, typification, rationalisation, mécanisation, optimisation, continuité technique et financière, intégration des acteurs, organisation du travail et de l'entreprise, volume, innovation, automatisation et robotisation"*.

* Aleyda Resendiz-Vazquez dans sa thèse «L'industrialisation du bâtiment - Le cas de la préfabrication dans la construction scolaire en France (1951-1973)», soutenue en Juillet 2010, Conservatoire National des Arts et Métiers avec les encadrants Sabine Barles et André Guillerme

* *id.* thèse d' Aleyda Resendiz-Vazquez, p.54

* Konrad Wachsmann dans son livre *The Turning Point of Building*, cité par l'Encyclopédie Universalis, éd. internet www.universalis.fr/encyclopedie/industrialisation-de-l-architecture

KONRAD WACHSMANN (1901-1981)

est un architecte allemand. En 1941, il s'associe avec Walter Gropius pour créer la *General Panel Package House Corporation*, une usine fabriquant des éléments préfabriqués. Il est l'auteur de l'ouvrage *The Turning Point of Building* (1961) qui vante les mérites d'une architecture industrialisée, dans le sens d'une production en série pour laquelle la mécanisation est l'outil :

"Le principe de l'industrialisation est identique à l'idée de production en masse. [...] La machine ne peut être comprise que comme outil répétant continuellement un cycle prédéterminé d'activités dont le résultat économique est la production d'un nombre élevé de parties identiques."

FERNANDEZ, 1974 ²⁰	DeI INSTITUTO EDUARDO TORROJA DE LA CONSTRUCTION Y DEL CEMENTO : "Industrialización de la construcción es el empleo de forma racional y mecanizada de materiales, medios de transporte y técnicas constructivas para conseguir una mayor productividad".	Rationalisation de matériaux, de moyens de transport et des techniques de construction Mécanisation
CHOUINARD, 1976 ²¹	De M.G. CEDERWALL, in « Méthodes modernes de conception, d'organisation et de gestion des bâtiments », rapport sur les travaux du troisième cycle d'étude sur l'industrie du bâtiment tenu à Moscou, URSS, 5-10 oct. 1970, Vol. 1, Nations-Unies, New-York, 1971, p. 40. « L'industrialisation c'est un processus de production incluant trois composants : la rationalisation, la mécanisation et la préfabrication croissante auxquelles s'ajoutent trois éléments : la répétition, la continuité et la recherche technique systématisée ».	Rationalisation Mécanisation Préfabrication Répétition Continuité Recherche technique
	De CSTB, par Gérard Blachère, est reprise par le Commissariat Général du Plan : « Les perspectives en matière d'industrialisation », en « Le Logement », Colin, Paris, 1970, p. 114. « L'addition de la mécanisation et de la rationalisation, avec comme corollaire la répétition et la continuité ».	Mécanisation Rationalisation Répétition et continuité
	De CHAUMELY, 1969, in "L'industrialisation au niveau des méthodes », La construction moderne, sept-oct. 1969. pag. 34. [La cite ne correspond pas à la source indiquée] « L'industrialisation du bâtiment est plus affaire de méthode et d'état d'esprit que de techniques »	Méthode
BOUTTE, 1992 ²²	De H. PROVVISOR (1978) dans une note d'information de la Direction du Bâtiment, des Travaux Publics et de la Conjoncture (DBTPC) : « Dans le langage courant, le terme 'industrialisation' désigne le passage d'un mode de production artisanal à un mode de production fondé sur l'emploi de machines. La <u>mécanisation</u> ne représente cependant qu'un aspect partiel du processus d'industrialisation. L'autre non moins essentiel, a nom 'organisation' ».[Le souligné par	Mécanisation Organisation

²⁰ J.A. FERNANDEZ, *Prefabricación. (Teoría y práctica, Tomo I)*. Barcelona: Editores técnicos asociados, 1974. 510 p.

²¹ L. CHOUINARD, *op. cit.*, p. 33-34.

²² F. BOUTTE, *Matériaux pour une réflexion critique sur l'industrialisation de la construction des logements*. Projet de fin d'études, Génie civil et bâtiment, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, nov. 1992, p. 12. Dir. C. QUEFFELEC.

	[l'auteur]	
SARJA, 1998 ²³	De J.LUGEZ, in European Communities Commission. Stuttgart, February 21-23, 1990. "Industrialising can be involving either: -Series production: Productivity results from the repetition of identical operations for the manufacture of products which are themselves identical -Recourse to automation: Products are diversified within a certain range, without any loss of productivity. For this purpose, the production tool is adapted to the order it receives for each of the products to be manufactured".	Série Diversification par l' automatisation
	De A.-S. COMMANDANTE, Philippines, Industrialized housing systems, p. 155-156, in Industrialized building systems in Asia. Low-Cost Building Materials Technologies and Construction Systems Monograph, Series Number 3 June 1988. Regional Network in Asia for Low-Cost building Materials technologies and Construction Systems (DP/RAS/82/012), Manila, 1988. "The term 'industrialised' refers to parts fabricated by machines and organised production in labour. Within this definition of terms, an industrialised building system, therefore, is defined as a set of building parts which are mass-produced"	Mécanisation Organisation Production de masse
PROVISOR, 1972 ²⁴	Du rapport du Groupe des Technologies du Plan Construction [sans référence] : « Plus fréquentent, on identifie l'industrialisation à la préfabrication en usine, au report à l'usine des opérations matérielles, au transfert de la main d'œuvre du chantier à l'usine allant de pair avec l'élimination du travail qualifié ».	Préfabrication en usine. Changement de la main- d'œuvre
	De J. VAYSSEUR [Sans référence] : « L'industrialisation du bâtiment c'est l'application à cette activité de méthodes de gestion et de procédés techniques qui lui permettent de bénéficier, en matière de rendement, de toutes les ressources que la révolution industrielle a mis à notre disposition ».	Rationalisation de la production

²³ A. SARJA (ed.), *op. cit.*, p. 10-11.

²⁴ H. PROVVISOR (sous la dir.), *op. cit.*, p. 3-4.

Fig. 16 : Quelques définitions sur l'industrialisation du bâtiment proposées par Aleyda Resendiz-Vazquez dans sa thèse «L'industrialisation du bâtiment - Le cas de la préfabrication dans la construction scolaire en France (1951-1973)»

Pour ces deux derniers paragraphes, on présente un large fossé entre ma vision sur la séparation en lots du chantier et la préfabrication poussée à l'extrême de Konrad Wachsmann. C'est la notion de degrés d'industrialisation du bâtiment qu'il faut entrevoir.

On peut imaginer un curseur variant d'un degré d'industrialisation à l'autre.

Pour comprendre cette graduation, nous pouvons décrire les méthodes de production du matériau terre-crue. On peut distinguer trois types de production : l'autoproduction, la production artisanale, et industrielle.

L'autoproduction utilise le caractère premier de la matière : disponible in-situ. Dans ce cas, la ressource est gratuite, présente sur le site, elle n'induit aucun coût de transport. En revanche, il faut louer les machines : faire venir les banches, les manitous, et autres. Il faut disposer d'un terrain suffisamment grand pour obtenir le volume nécessaire et pour organiser le chantier avec des zones d'extraction, de malaxage, voir de séchage pour les briques. Mais surtout, il faut pouvoir identifier la terre en question.

Elle doit être utilisable ce qui représente une série de tests à élaborer, soit un travail «en plus» qui prend du temps et donc de l'argent. Par exemple, pour évaluer sa résistance à la compression, on forme des carottes de terre ce qui sous-entend plusieurs éprouvettes à réaliser en fonction de l'humidité de la terre, de la profondeur d'extraction; un temps d'attente pour le séchage, et des manipulations ou calculs pour tester l'échantillon.

Mais à chaque terre, sa technique! Or

comme nous l'avons dit, pratiquement aucun entrepreneur ne sait maîtriser toutes les mises-en-œuvre. Ainsi, si la terre est utilisable, la pratique de mise-en-œuvre associée doit correspondre au savoir-faire du praticien.

Enfin, elle doit être viable... La matière trouvée en ce lieu précis, n'a jamais fait l'objet d'une certification, d'un contrôle, d'une norme produit, d'un DTU, etc. L'ingénieur structure devra conjecturer sur la stabilité de l'ouvrage, le bureau de contrôle et l'assureur devront être convaincu par la viabilité du matériau.

Bien souvent, la terre du site n'est pas utilisable directement, il convient d'y ajouter du sable, des graviers, de l'eau. C'est ce qu'on peut appeler la «production artisanale»: le maçon évalue la formulation idéale selon son expérience, son opinion. Dans ce cas, on fait venir les granulats additionnels sur le chantier pour les mélanger avec la terre extraite et obtenir un matériau de construction adéquat. Cela engendre du transport et une matière première non plus totalement gratuite.

D'autre part, quand le site de projet ne permet pas d'obtenir un matériau terre, on recherche une solution alternative. Le plus souvent, la maîtrise d'œuvre se tourne vers les carrières ou briqueteries alentours qui, même non-spécialisées dans la terre-crue, sont souvent d'accord pour extraire au cas par cas un volume de matière sur leur site d'exploitation. La solution la plus exemplaire serait d'obtenir d'une opération voisine, les terres d'excavation du chantier : le terrassier d'à-côté devient notre fournisseur, mais là encore, il ne peut pas s'avancer sur les performances du matériau qu'il nous donne.

Enfin, il y a la production industrielle. Le fournisseur est véritablement une entreprise

productrice de matériau (ou commercialisant le produit d'un confrère). C'est le dessin conventionnel.

J'achète un matériau dans un point de vente plus ou moins éloigné géographiquement, il est certifié par l'entreprise qui me le vend, il est donc assurable. Sa normalisation est banalisée : de type «norme produit», la technique de mise en œuvre est imposée par un DTU en somme. La description de ce mode d'emploi permet l'élargissement de la main d'œuvre, l'ouvrier plus ou moins qualifié pourra plus aisément mettre en œuvre en suivant les instructions prescrites, sans engager davantage sa responsabilité et l'expérience n'est plus un facteur incontournable. J'ai une garantie de qualité de matière, une constance du fait d'un procédé de production perpétuel et d'un site d'extraction définit, invariant, choisi par l'industriel.

L'idée n'est pas de proscrire tel ou tel type de production, mais de choisir un scénario adapté à chaque typologie de projet. Par exemple pour une maison individuelle, l'auto-production qui coïncide avec l'auto-construction demeure le plus économique. Dans ce cas, il faut que les auto-entrepreneurs soient capables de construire en terre, qu'ils soient savants et bricoleurs. Le chantier prend du temps. En revanche dans le cadre d'un ERP, la maîtrise d'ouvrage ne peut être auto-constructeur. D'autant que pour un bâtiment public, les contrôles sont beaucoup plus rigoureux : l'architecte ne peut pas prendre l'entière responsabilité du projet, les accords ne sont pas «à l'amiable» mais régis par des documents officiels. Ainsi, peut-être que le scénario de production le plus adapté serait celui d'un industriel en mesure de fournir un matériau certifié, viable et assurable.

L'industrialisation n'est donc pas bonne ou mauvaise, mais graduée et adaptée à chaque situation de projet. "L'évolution de l'artisanal à l'industriel est possible mais il est évident que cette tendance doit être justifiée au regard de paramètres de situation particuliers : politique de développement régional, aspects socio-économiques et culturels, dépendance économique et technologique, investissements, procès de travail, etc."*

Cette première réflexion révèle trois enjeux, squelette de notre raisonnement : la proximité de la matière, la réglementation de la construction par l'industrie, la qualification de la main d'œuvre.

* Hugo Houben et Hubert Guillaud, Traité de Construction en terre, CRATERRE, éd. Parenthèses 2006, p901

Proximité de la matière première

Pour comprendre il faut imaginer un curseur sur une frise de localisation de la matière : du plus proche au plus éloigné. Comme nous l'avons vu, si le curseur se trouve au degré d'industrialisation le plus bas, la matière utilisée est au pied du chantier. Les inconvénients sont : la terre présente n'est pas toujours utilisable (ou pas entièrement), le matériau n'est pas connu des entrepreneurs ou des assureurs/contrôleurs, l'extraction demande du temps et de l'espace. Pour ce mode d'auto-production, le rôle de l'industrialisation y est par définition absent, excepté lorsqu'on entend «mécanisation», une branche que nous développerons plus tard, concernant la main d'œuvre.

Quand le curseur est à l'extrémité opposée c'est qu'il existe des entreprises qui fournissent le matériau prêt-à-l'emploi, en vrac, préfabriqué. C'est l'objet de la sous-partie suivante, en terme de «production», ce scénario est impertinent puisque le matériau est délocalisé : sur le plan écologique il est à l'encontre du caractère local de la terre, sur le plan économique concernant uniquement les dépenses liées à l'approvisionnement en matière première, il est également illogiquement élevé vu la gratuité du matériau terre théorique.

Par conséquent, nous développerons deux scénarios qui se trouvent «au-milieu» de cette frise : la production en carrière, la production en briqueterie.

La reformulation en carrière

On rappelle que l'étape «production» entendue ici correspond à l'extraction de la terre qui par définition, est dès lors un matériau prêt-à-l'emploi. Malheureusement ce n'est pas toujours le cas, et après extraction, il faudra reformuler la terre que ce soit en ajoutant une proportion de granulats ou simplement apporter un taux d'humidité adapté à la technique de construction. C'est le malaxage. Il peut être fait par l'extracteur en carrière ou sur le chantier par le maçon...

Pour que le scénario de la production en carrière soit viable, ces lieux doivent être nombreux pour irriguer tout le territoire et ainsi proposer une localisation raisonnablement proche du chantier.

Dans l'hypothèse où des centrales de production de terre se développeraient, on peut imaginer que chaque carrière propose une formulation constante, contrôlée et approuvée. C'est l'exploitant de la carrière qui garantit la qualité de son produit. En fonction de sa localisation et donc de la nature de sa matière première excavée en carrière, il faudrait rajouter les éléments du spectre granulométrique manquant.

C'est une proposition que soutiennent deux étudiants, Quentin Chansavang & Hugo Gasnier, dans le cadre de leur mémoire DSA-terre (EnsaGrenoble) encadré par Patrice Doat (CRATerre). La thèse soutenue est la suivante : "La zone où l'on trouve traditionnellement des constructions en pisé est très limitée. C'est pour cela que se restreindre à cette localisation ne permettra pas au pisé de devenir une alternative aux autres matériaux de construction."* Leur objectif est donc de trouver le moyen pour répandre l'usage du pisé en France.

Par une recherche cartographique, donnée *ci-après (p.69)*, ils constatent que la pédologie du territoire français peut se distinguer selon deux grands ensembles : la partie nord avec une terre limoneuse et la partie sud avec une terre dite «équilibrée».

La terre limoneuse est fine et légère. Pour être utilisable pour du pisé, on pourrait ajouter du sable, du gravier, ou même des granulats plus grossiers provenant de la destruction d'un bâtiment béton. La terre équilibrée propose un spectre granulométrique varié, de petites quantités de sable, argile ou autre, suffiraient à le rendre éligible à la technique pisé. A l'issue de cette analyse, ils énoncent trois possibilités pour répondre à une demande en dehors de la zone pisé originelle (Rhône-Alpes).

La première serait d'exporter depuis une centrale de la terre à pisé prêt-à-l'emploi en big-bag. La qualité de la terre est certaine. En revanche, peu viable écologiquement, cette possibilité devra être employée à bon escient : le projet nécessiteux de matériau pisé ne devra pas se situer trop loin de la centrale pour conserver un coût énergétique soutenable.

La deuxième solution, est celle que nous développons, soit que la reformulation de la terre se fasse en carrière par l'exploitant. Pour

* Q.Chansavang et H. Gasnier, «Une approche prospective du pisé», 2012, disponible sur issuu.com, p.120

que l'acheminement jusqu'au chantier de ce matériau prêt-à-l'emploi ne demande pas trop de transport, il faut que ces producteurs soient présents sur tout le territoire (ou en tout cas proche du site de projet).

Enfin, la troisième solution, la plus locale, est de faire le mélange sur le site de projet. Comme nous l'avons vu, cela exige de la place et un travail de logistique important sur le chantier.

Dans ce cas, pour garantir de la qualité et donc de la résistance (entre-autres) de notre matière mise-en-œuvre, la procédure sera complexe. Beaucoup de paramètres entrent en jeu : le sable ajouté est-il adéquat, l'argile importée est-elle de bonne qualité granulométrique, le mélange est-il homogène, la reformulation peut-elle être constante durant toute l'édification du mur, etc. La maîtrise d'œuvre prend la responsabilité et pourtant elle n'est pas spécialiste de la reformulation de cette terre-là, alors que l'exploitant de la carrière du coin l'est.

Les briqueteries, un producteur potentiel

Cette pratique de faire appel à un exploitant proche pour compléter la terre du site, ou obtenir une terre relativement locale, est sans doute la plus répandue actuellement pour les projets en terre-crue.

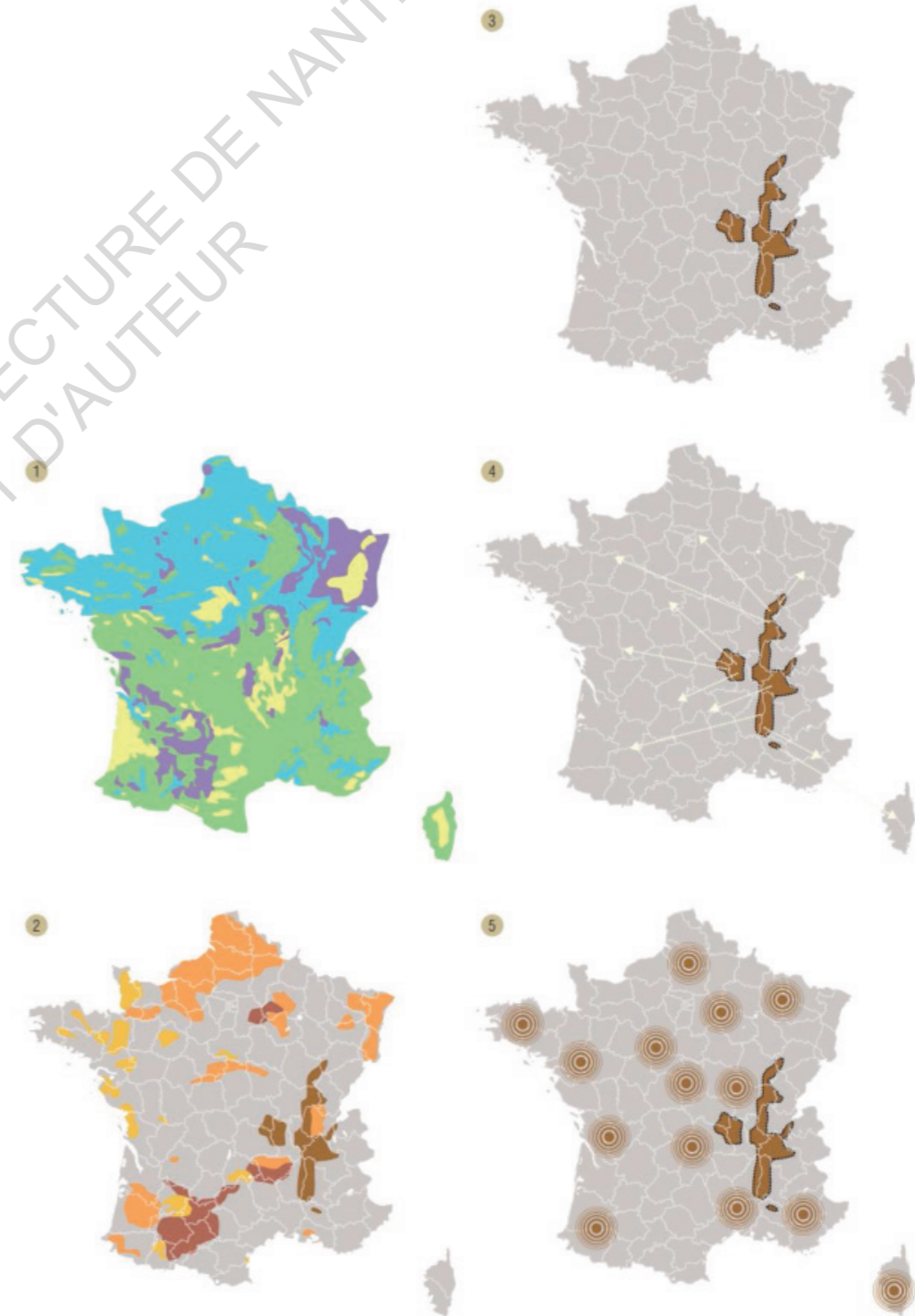
Le discours de Fabrice Tessier (artisan président d'Asterre) lors de la conférence Bellastock n°2 en témoigne*. A l'occasion d'un chantier réalisé à Bègles (33), il explique comment il a pu se procurer le matériau terre. Ce sont 11 logements sociaux en chantier participatif. Ce n'est pas un cas de structure porteuse puisque les murs extérieurs sont en ossature bois et paille, seul les enduits intérieurs sont en terre ainsi que les cloisons de distribution en torchis.

Dans le CCTP, il était imposé de construire et de trouver une terre n'excédant pas un périmètre de 50km. L'entreprise de Fabrice Tessier ne se trouve pas en région bordelaise mais à plus de 300km de là. N'étant pas dans sa région de prédilection, ils ne connaissait pas les fournisseurs, producteurs. Il a donc appelé les briquetiers pour commencer qui, comme les tuiliers, possèdent des stocks de terre qu'il va falloir simplement broyer pour l'utiliser en construction. Deux carrières ont fourni la terre.

* Fabrice Tessier, cycle de conférences «Terre en mars» encadrées par Patrice Doat, le 08 mars 2017 à l'Ensa Paris-Belleville, n°2 proposé par Bellastock

Fig.17 : Localisation des terres et de ses techniques, par Quentin Chansavang & Hugo Gasnier dans ce même mémoire

- 1 / Carte des répartition des sols français, source: INRA Orléans.
 - Terre équilibrée
 - Terre limoneuse
 - Argileuses
 - Sableuses
- 2 / Carte des zones géographiques des techniques de construction en terre crue, source: Bâtir en terre.
 - Pisé
 - Torchis
 - Bauge
 - Adobe
- 3/ Carte stratégie de limitation à la zone de construction en pisé.
- 4/ Carte stratégie exportation des terres à pisé.
- 5/ Carte stratégie développement de centres de production localisés :
 - centres de production



La briqueterie Storme et Pruvost proposait une matière rocheuse. Il fallait la broyer pour obtenir une granulométrie adéquate. Peu argileuse néanmoins, elle fût complétée par la carrière de la briqueterie Les Grès De Gascogne, matière très fine, limoneuse, facilement manipulable. Rappelons que l'enduit et le torchis demandent une matière fine, sableuse pour l'enduit et argileuse pour le torchis. Les figures *ci-contre* illustrent ces deux types en sortie de carrière (avant broyage). Puis la terre passe dans une machine appelée «laminoir» pour écraser chaque boule d'argile, il se forme une pâte.

Ce sont chez les briquetiers, grâce à leur équipement mécanique pour fabriquer briques et tuiles de terre cuite, que ces étapes de broyage/laminages ont pu être réalisées ainsi que le mélange des deux terres.

Les briquetiers ont mis à disposition leur capital d'outils pour produire une terre reformulée et homogène. Les machines n'ont pas été déplacées

jusqu'au chantier, il n'y a pas de transport associé. Par les engins issus de l'industrie de la céramique, le travail de préparation du matériau a été court, efficace. D'autant que cette technologie est réglable, on peut décider de la puissance du broyage, du calibre extrêmu des granulats... Un contrôle de la matière se fait. C'est une fois sur le chantier que ce matériau est mélangé à l'eau et à la paille pour être mise-en-œuvre en torchis, ou à l'eau et au sable pour l'enduit.

Pour ce projet, les problèmes de réglementation ne se sont pas posés. D'une part, les éléments ne concernent pas la partie porteuse du bâtiment. D'autre part, il existe des normes professionnelles pour les enduits terre afin de contrôler leur résistance à l'arrachement (cf. partie 3.1). Le torchis est un remplissage de paroi en ossature bois (déjà réglementée). D'autre part, la maîtrise d'ouvrage ayant elle-même demandé l'usage de la terre, tous les acteurs (dont les bureaux d'étude et de contrôle) étaient enthousiastes et

connaisseurs, il n'a pas fallu convaincre outre-mesure. Je suppose que les tests de résistance au feu ont cependant été obligatoires, mais Fabrice Tessier n'en parle pas, aucune documentation n'explique ce fait.

Suite à la réussite de son projet, F. Tessier se lance dans l'étude de potentialité des briquetiers. En effet, il a pu trouver une terre adéquate à proximité, en très peu de temps et d'efforts. Il élabore une carte (ci-après). Elle localise, dans un premier temps, les briqueteries connues pour fournir des produits terre crue (en vrac, briques, prêt-à-l'emploi, etc). Puis, en moins d'une heure, il répertorie une trentaine de briqueteries non-réputées pour la terre crue certes, mais qui possèdent par leur activité-elles aussi- les carrières et machines, aptent à devenir fournisseur pour notre matériau. Pour lui, l'expérience est concluante puisque ces lieux sont répartis sur tout le territoire ce qui offre une proximité de la matière première cohérente.

On peut imaginer, comme pour le cas de l'exploitant de carrière, que le briquetier s'annonce responsable de la qualité de sa terre pour faciliter la réglementation. Ce serait une forme d'industrialisation dans le sens où une délocalisation s'opère, on va chercher un lieu

Les illustrations *ci-dessous* sont diffusées par l'association Bellastock dans le cadre du cycle de conférences «Terre en mars», ce sont des photographies de Fabrice Tessier

Fig. 18: terre rocheuse chez Storme et Pruvost



Fig. 19: terre argileuse chez Les Grès de Gascogne

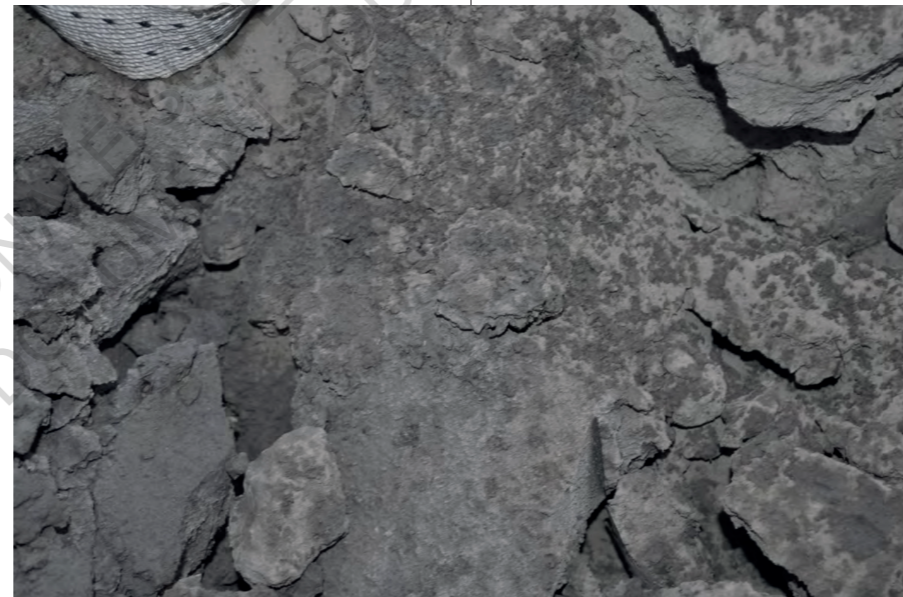


Fig. 20: le laminage de ces terres chez les briquetiers



(un fournisseur) qui possède la machinerie pour produire, ce produit est certifié par cet acteur. Ce n'est qu'une première étape car sur le chantier, la terre devra être mélangée à l'eau et mise-en-œuvre, ce qui restent des paramètres non-contrôlés. On a alors l'image des centrales à béton qui délivrent le matériau en toupie (chacune contrôlée) ou en vrac; à la différence près que dans le cas de la terre, il n'y aura en ces lieux aucune cuisson, et très peu d'importations (la carrière terre n'a pas besoin d'être livrée en gravier, chaux, ciment). Notons que cette conjecture est mon point-de-vue personnel, il extrapole peut-être excessivement les propos de Fabrice Tessier.

En réalité, ce raisonnement se base également sur le discours d'Erwan Hamard, ingénieur chercheur à l'IFSTTAR (nouvelle école des Ponts et Chaussées), que j'ai pu rencontrer lors d'une entrevue à Nantes en mars 2017.

Pour lui, la terre doit provenir du site de projet ou d'un chantier alentours pour utiliser son avantage majeur qui est la revalorisation des terres excavées. Il n'est donc pas question de briqueteries dans cette thèse, mais j'ai fait le rapprochement entre le terrassier du chantier d'à-côté et l'exploitant de ma carrière, il me dit en ces mots...

"Faire la certification, faire de la norme produit, ça veut dire qu'il faut trouver des gens, notamment des terrassiers qui disent : moi je vous livre cinq camions de terre, de la terre de ce chantier là, vous allez pouvoir faire des BTC avec, qui vont tenir à tant de mégapascals, qui ne vont pas avoir de problème d'érosion, qui sous sollicitation sismique vont tenir aussi. On trouvera pas de terrassier, personne ne fera ça. Ils vont bien fournir le matériau mais ils ne pourront pas s'engager sur ses performances. Il est variable ce matériau et à chaque fois il faut faire des essais. Donc c'est bien au maître d'œuvre, de garantir une performance et c'est pas au fournisseur de matériaux. C'est là qu'il y a une grande différence, c'est là qu'il y a une grande nuance. Et c'est en ça que le côté normatif va être différent. Ce qu'on peut imaginer, nous on travaille la-dessus : c'est les normes pour valider la performance des ouvrages. Il faut définir des essais de chantier qui permettent de dire : je prends mes éprouvettes [comme le béton]- c'est un article qu'on est en train de rédiger- je les teste, et je suis capable de dire la résistance de mon mur c'est tant, le module d'élasticité c'est tant."*

Fig. 21 : carte des briqueteries potentielles de Fabrice Tessier, diffusée lors du cycle de conférences «Terre en mars» encadrées par Patrice Doat, le 08 mars 2017 à l'Ensa Paris-Belleville, n°2

* entrevue avec Erwan Hamard à l'IFSTTAR de Nantes, le 21 mars 2017



La question des normes et notamment la différenciation entre «norme-produit» et «norme de moyen» est le sujet de la troisième partie de ce mémoire, elle sera développée plus tard. Néanmoins, cette explication d'Erwan Hamard reflète ici les limites d'un système de «centrale terre-crue». Ce scénario revient à se plier au cadre constructif en vigueur qui normalise le produit et l'associe à une mise-en-œuvre imposée. Il se restreint à la provenance d'une terre en carrière, il évince les pratiques de récupération d'excavation de chantier ou d'extraction sur site.

Voilà une très bonne transition à notre développement suivant qui est la «réglementation par l'industrie». En effet, il existe de plus en plus d'entreprises qui proposent des produits terre-crue commercialisés, livrés sur chantier, et normés. C'est de la norme produit. Ces acteurs ne sont pas seulement fournisseurs comme les précédents, mais fabricants. Ils proposent de la terre en composants préfabriqués en usines ou prêt-à-l'emploi.

Du fait d'un stade de développement peu avancé de la filière en France, la commercialisation de composants terre-crue reste faible. En France, la société la plus connue est sans doute Akterre avec un marché d'envergure nationale. En Allemagne, en revanche, il existe "4 ou 5 producteurs à l'échelle de Claytec, largement premier producteur européen."* Claytec est une société allemande; elle commercialise sur une échelle de plus en plus large, en Belgique, aux Pays-Bas et au Luxembourg, mais aussi en France, produits importés par Akterre.

LA RÉGLEMENTATION PAR L'INDUSTRIE

Le cas de la production de briques

L'exemple type est la Brique de Terre Compressée (BTC) de l'entreprise Akterre. Sa fiche produit est présentée ci-contre pour comprendre les paramètres que peut promettre le fabricant de matériau. Il peut se prononcer sur les conditions de stockage à respecter, sur la couleur ou aspect final, sur la densité du produit, et surtout sur la résistance à la compression et la technique de mise-en-œuvre qui correspond à un DTU (Document Technique d'Utilisation). Ainsi, dans ce scénario, tous les problèmes sont résolus pour construire en terre (cf. Partie 1) : il existe une normalisation, la

* mémoire de master d'architecture de Quentin Chansavang, «Terre & Architecture Contemporaine», 2008, encadré par Hubert Guillaud (directeur de CRAterre), p.45

Fig. 22 : Fiche produit BTC d'Akterre, disponible sur le site officiel



Brique de terre compressée BTC 06.201.A

Utilisation : Les briques de terre crue 06.201.A, permettent de réaliser des cloisons apportant de la masse thermique et régulant l'humidité. Ces briques sont adaptées à la réalisation de murs porteurs et de cloisons massives, ainsi que pour la réalisation de doublages intérieurs. Toutes ces briques se maçonnent de préférence avec des mortiers terre.

Conditionnement: Palettisé cerclé, 150 briques par palette.

stockage: Stocker au sec et sur palette impérativement. Dans de bonnes conditions de stockage, les briques en terre crue peuvent conserver pour une durée illimitée.

Confort thermique hydrique et phonique:

La BTC offre une excellente inertie thermique. Elle permet l'accumulation de la chaleur rayonnante émise par le soleil ou un poêle. Elle accumule la chaleur produite par la flambée d'un poêle de masse. Sa capacité à absorber et restituer l'eau sous forme de vapeur lui confère un inégalable atout pour améliorer votre confort intérieur. Sa masse et sa densité lui permet de se classer comme un excellent isolant phonique.

Résistance à la compression : plus de 6 Mpa.

DTU : réf. XP 13-901 – octobre 2001

Mise en œuvre: Les briques BTC se mettent en œuvre selon les règles de maçonnerie. Les briques doivent être mouillées avant leur mise en œuvre afin d'augmenter l'adhérence au mortier de terre et donc la solidité du mur. Pour le mortier, nous recommandons le pré-mortier en terre spécial BTC AKterre. Les BTC peuvent également être maçonnées au mortier de chaux.

Séchage : Le séchage du mur avant la pose d'un éventuel enduit n'est généralement pas nécessaire car l'eau de gâchage du mortier est rapidement absorbée par les briques.

Finition : Les briques BTC sont généralement maçonnées pour rester apparentes, elles peuvent être peintes ou badigeonnées. Les maçonneries en terre crue sont idéales pour recevoir des enduits en terre.

Consommation :

Ref.	Désignation	sur champs 9 cm	14 cm	29,5 cm
06.201A	Brique BTC 2000 kg/m ³ (29,5x14x9 cm)	24 briques/m ²	33 briques/m ²	66 briques/m ²
10.044.M	Poids de mortier pour BTC, par m ² (doit être complété pour moitié de sable 0-5mm)	10kg A coller sans ajout de sable	25 kg + 25kg sable 0-5	50 kg +50kg sable 0-5
	m ² de mur par palette	6,5 m ²	4,5 m ²	2,25 m ²
10.407HL	AKTA chaux grise	10% du poids de mortier	10% du poids de mortier	10% du poids de mortier

main d'œuvre n'est pas nécessairement qualifiée puisqu'il «suffit» de respecter le DTU associé. La démocratisation de l'usage de la terre crue s'opère, les bâtiments sont plus facilement édiflables, de plus en plus nombreux, ils se répandent dans tout le territoire puisque les points de vente d'Arterre sont nombreux. La filière se développe...

La préfabrication des briques de terre crue est la forme d'industrialisation la plus courante. Hugo Houben et Hubert Guillaud indiquent d'ailleurs que la "tendance à l'industrialisation s'est affirmée il y a environ 25 ans pour la production des blocs comprimés."*

Elles semblent les plus aptes à l'application d'un procédé industriel. Les pavés sont préparés en amont et ne pèsent pas lourd, contrairement au pisé préfabriqué, ce qui représente une manipulation et un transport à faible impact écologique et économique.

Les briques sont sans doute la technique la plus rapide d'exécution puisqu'il s'agit de maçonner des petits éléments préparés et séchés au préalable. De plus, elles permettent une structure porteuse, qui peut être déclinée avec des voûtes, des arcs et même des coupes.

Au commencement -il y a 11 000 ans- la terre pouvait être simplement façonné à la main, sans moule. Puis, la technique la plus traditionnelle et répandue est celle de l'adobe en terre moulée dans un cadre en bois que l'on démoule directement (c'est pourquoi la terre doit être à l'état plastique pour être démoulée facilement sans pour autant s'écrouler). Dans les pays développés, à plusieurs occasions, les procédés de fabrication des adobes ont évolué pour adopter la mécanisation, la production en masse, la production en série... On industrialise. C'est l'exemple de la «pondeuse à adobes» de Hans Sumpf.

Pondeuses à adobe

En 1950*, Hans Sumpf dépose le brevet d'une machine à fabriquer des briques de terre-crue. Il est ingénieur américain, il invente en Californie une «pondeuse» auto-tractée, munie de moules à déplacement hydraulique permettant un rythme de production moyen de 3000 blocs par jour. Cet engin se multiplie aux États-Unis.

Malheureusement, la fabrication par pondeuse demande une très grande superficie d'exploitation puisqu'il faut une piste où la machine progresse et une zone de séchage avant de pouvoir les palettisées

* liste des brevets donnée par google : <https://ipv4.google.com/patents>

(une semaine d'attente). En contre partie, le nombre d'employés dans ce lieu de production est restreint, donc le prix sera économique : lorsqu'on observe les photographies de ces machines, seulement une ou deux personnes sont suffisantes pour la faire fonctionner. Aujourd'hui, l'entreprise Hans Sumpf Company Inc existe toujours, elle génère un revenu annuel de 500 000 \$ et emploie huit personnes*.

Aux États-Unis, plusieurs entreprises utilisant cette machine de production existent. Petit-à-petit, la tendance s'exporte en Europe.

Par exemple, l'entreprise américaine San Tan Adobe Inc s'inspire de cette invention et propose aujourd'hui un très large choix de produit en adobe, de même elle compte que peu d'employés : six personnes pour un revenu annuel de 13 700 000 \$.* La société s'est créée il y a 30ans, aujourd'hui elle est capable de produire 20 000 briques par jour. Il propose quatre types de produits chacun décliné en plusieurs couleurs : les adobes stabilisés à l'asphalte (équivalent de bitume et de gravier), les stabilisés au ciment, la terre en vrac qu'ils appellent «mortier» et enfin une multitude d'enduits. Pour tous leurs biens commercialisés, ils garantissent la résistance à la compression et la couleur* ! Il propose la livraison des adobes par un partenariat avec une entreprise de transport spécialisée : "[Hauling AZ] sont la première société de livraison assistée par chariot élévateur

* données de l'entreprise diffusée sur <http://www.manta.com/c/mmcnwry/hans-sumpf-company-inc>

* données de l'entreprise diffusée sur <http://www.manta.com/c/mb46228/san-tan-adobe-inc>

* "Color and compression guaranteed" site de l'entreprise www.santanadobe.com

Fig. 23: cette production demande de la place, cas de San Tan Adobe Inc



spécialement conçue pour l'industrie de la construction."* San Tan Adobe encourage le client à profiter de ce service car Hauling AZ possède les engins nécessaires à la manipulation sans heurt des produits terre-crue, leurs employés sont connaisseurs et pas seulement chauffeurs, et enfin, chaque camion est assuré pour une valeur de biens livrés à 25 000 \$. Pour fournir une garantie, ils ont fait les démarches nécessaires pour tester et valider leurs produits aux laboratoires agréés, ils indiquent que les briques sont résistantes en compression, infaillibles au feu et à l'eau. Avec leur capacité de production, ils sont en mesure de fournir immédiatement les composants de construction (quantité d'environ 2000 briques).

Pour contrer ce besoin d'espace de stockage, certains sèchent les briques dans des étuves (notamment en Allemagne). Malheureusement, je n'ai pas trouvé matière à développer cette méthode bien que l'information soit sûre puisqu'elle nous vient du livre «Bâtir en terre- Du grain de sable à l'architecture» de Laëticia Fontaine et Romain Anger, un ouvrage et des auteurs membres de CRATerre bien connus...*

Lors de la deuxième conférence du festival Bellastock, le 08 mars 2017, Frédéric Moy, un architecte de formation et maçon chez Hélioopsis précise qu'avec des éléments préfabriqués comme les briques, le chantier devient plus propre puisqu'elles sont livrées séchées, elles évitent les surplus d'humidité qui dans les chantiers posent parfois problème. Selon lui, l'usage de l'adobe en France est bien trop faible comparé aux avantages qu'il représente : "C'est la maçonnerie la plus facile au Monde. Au Yémen on construit huit étages de haut avec des adobes, donc ça marche c'est possible !"*

En France, plusieurs briquetiers explorent le marché des briques terre-crue : Barthes dans le sud-ouest, Le Wulf en Picardie, la briqueterie du Nord à Lille, etc. L'exemple détaillé de cette dernière peut nous aider à comprendre les processus de développement de ces industriels...

La Briqueterie du Nord investit son capital dans la réglementation.

Pour la Briqueterie du Nord (BdN), ces efforts répondent à une demande croissante pour des matériaux durables mais

la commercialisation des composants terre-crue restent peu commercialisés à cause du manque d'argumentaire technique. *

Depuis 2007, ils commercialisent une brique BTC qui fût primée en 2008 à Norbat, le salon des professionnels de la construction dans la région Nord. Pour parer au manque de référentiel réglementaire, la briqueterie a investi 250 000 €. Elle a engagé Fayçal El Fgaier pour une thèse, "Soutenu par l'Ecole centrale de Lille et l'Université de l'Artois, ce dernier a trois ans pour caractériser sur le plan scientifique la brique de terre crue, son processus de fabrication et ses techniques de mise en œuvre." Pour se faire, ce chercheur dispose d'un terrain expérimental où l'édification d'un bâtiment de 20m* à Leers (Nord) lui permet de tester des pratiques constructives comme une voûte nubienne (montée sans coffrage). Pour Christophe Chapiseau, responsable recherche et développement de BdN, "Avec ce chantier pilote de construction porteuse, nous voulons créer les conditions du développement des techniques à base de terre crue et favoriser l'assurabilité de ces ouvrages."*

* id.

* id. Christophe Chapiseau cité par Alix de Vogüé, dans l'article «Un bâtiment pilote pour étudier la brique de terre crue», Le Moniteur, juin 2012.

Fig. 24: la cité de Shibam au Yémen, avec ses immeubles en brique de terre crue, Source : www.briquestechnicconcept.fr

* id. texte original
"They are the first forklift assisted delivery company specifically designed for the construction industry."

* «Bâtir en Terre», p44,
"En Allemagne les industriels préfèrent sécher les adobes dans des étuves pour réduire les coûts liés aux immenses zones de stockage."

* Frédéric Moy, conférence Bellastock #2, le 08 mars 2017

* article «Un bâtiment pilote pour étudier la brique de terre crue», par Alix de Vogüé, Le Moniteur, juin 2012



L'industriel stimule la Recherche

Ainsi, parce que la société BdN est un grand groupe (101 salariés, 17 millions d'euros de chiffre d'affaires), elle est capable d'investir dans le développement de la filière qui pour eux, passe par l'élaboration de documents réglementaires. Au stade actuel, les recherches ont mené à un ensemble de connaissances techniques sur le matériau, une base scientifique pour communiquer avec le client, une fiche produit associée à ces briques Crubriq® Kit qui fournit la résistance en Mégapascal de l'élément, sa conductivité thermique, sa masse volumique, son classement au feu.* Outre ces données sur le produit qui conduiront à une «norme-produit», l'expérimentation sur chantier-témoin a pour but de conduire à un Document Technique Unifié : en quelques mots, l'entreprise teste des mises-en-œuvre, décrit ces protocoles, et enverra le dossier au CSTB pour validation.

Comme évoqué en partie 1 avec le béton, les investissements financiers d'un industriel favorise l'innovation. La recherche dans une filière est d'autant plus active que les partenaires qui la motivent progressent dans une optique industrielle : l'innovation constante où l'on doit investir. Mais ce caractère industriel-et donc privé- des investisseurs, freinent tout autant cette recherche puisqu'elle doit s'inscrire dans l'intérêt de la firme en question. C'est ce que nous expliquent Fabrice Bardet et Victor Villain dans le livre Sacré Béton*. Dans les études publiées auxquelles ils se réfèrent, ils remarquent que la plupart des rédacteurs-chercheurs travaillent ou ont travaillé pour le groupe Lafarge par exemple. Ainsi, lorsqu'on tente de se focaliser sur la «soutenabilité» du matériau béton, il devient difficile de progresser sans se confronter aux intérêts du grand groupe. Contraindre le matériau béton à une impact écologique minime, c'est contraindre les industriels, qui financent les recherches et produisent les normes.

En ces mots, on dégage un argument en faveur de l'industrialisation de la terre-cruie puisque les grands groupes vont savoir stimuler la recherche et développer la filière.

* F. Bardet et V. Villain dans le chapitre «Bétons et durabilités, les perspectives de la recherche dans les revues scientifiques», «Sacré Béton !», p190

LA STABILISATION

C'est le fait d'ajouter au mélange terre un adjuvant. Le plus souvent, on stabilise au ciment...

Ce procédé est bien souvent critiqué puisque le séchage du ciment est irréversible, le mur en terre n'est plus recyclable ou du moins il demande des engins énergivore pour le détruire et le concasser.

La plupart des briques préfabriquées sont stabilisées avec ce liant, bénéficiant ainsi d'une plus grande résistance à la compression, à l'érosion et même à la traction.

Fig. 25 (ci-dessous) BTC du briquetier Didier Hubert en région PACA, stabilisées avec 7% de ciment I



LA PRODUCTION DU PISÉ

Nous venons de le voir, la préfabrication des briques terre-crue est bien plus fréquente que toutes autres techniques car l'élément est léger, facilement manipulable, porteur, les structures potentiellement productrices existent (briqueterie), et la maçonnerie de petits éléments est courante soit définie avec un DTU que l'on peut transposer aux éléments crus. Or les techniques terre-crue sont nombreuses et le pisé ne compte pas rester en retrait, d'autant que la "technique pisé semble la plus appréciée des architectes soucieux de développer un style contemporain"* d'après Laëticia Fontaine et Romain Anger dans *Bâtir en Terre*.

Ils nous expliquent que la similitude avec le béton, provoque un sentiment de liberté et de facilité de mise-en-œuvre chez les architectes. Mais ce sont des à-priori car la terre, contrairement au béton, ne travaille qu'en compression, avec une résistance 25 fois moins grande. C'est d'ailleurs pour cette même raison, qu'elle n'est pas « facile de mise-en-œuvre » puisque les bureaux d'étude et de contrôle s'inquiètent de cette fragilité, ils ne sont pas convaincus, ils ne « signent » pas. Par son caractère porteur, la technique du pisé est sans-doute la plus empreinte au manque de référentiel technique.

Certains comme Akterre, commercialisent des big-bags de terre à pisé, déjà humidifiée. Pour une commande de plus de 25 tonnes, il est possible de se fournir directement en carrière avec toujours, une terre prête-à-l'emploi. Ce fournisseur nous donne la densité du matériau, son calibre granulométrique puisqu'il est tamisé et d'une formulation constante. En revanche, il ne donne ni sa résistance, ni des conseils réglementaires associés comme c'est le cas de leurs BTC affiliées à un DTU*.

On peut imaginer que ce type de construction devient accessible à un plus grand public : prêt-à-l'emploi, on est assuré que cette terre est adaptée à la technique du pisé, on n'a pas besoin d'ajouter des granulats, ni même de l'eau. Peut-être que, via la constance de formulation proposée, Akterre travaille parallèlement à l'élaboration d'une norme produit ou du moins une caractérisation avancée de son matériau-tout comme BdN- mais je n'ai trouvé aucune information diffusée sur le sujet.

En revanche, l'entreprise allemande Claytec qui de même manière commercialise des big-bags pisé, est capable de garantir

***La technique du pisé semble la plus appréciée des architectes soucieux de développer un style contemporain de construction en terre." « Bâtir en Terre », Laëticia Fontaine et Romain Anger, p.54, ed. Belin, 2009

* d'après fiche produit pisé en big-bag disponible sur le site officiel d'Akterre www.akterre.com

Fig.26 : Produit pisé en big-bag de Claytec, premier producteur européen, fiche produit disponible sur le site officiel de l'entreprise www.claytec.fr



PISÉ 02.004 -.600

Pisé et sols en terre selon la fiche de travail CLAYTEC 1.1

Argile pisé pour les murs porteurs et non porteurs, et argile pisé fin pour les sols en terre.

COMPOSITION

Argile pisé : argile de construction, avec graviers mélangés, granulométrie de 0 à 16mm, (taille maximale des graviers pouvant aller jusqu'à 22 mm).

Argile pisé fin 02.008: argile de construction, granulométrie 0-8 mm (taille maximale des graviers pouvant aller jusqu'à 16 mm).

VALEURS PHYSIQUES

Densité $\pm 2.300 \text{ kg/m}^3$ (I 1,5 W/mK, $\mu 5/10$), résistance à la pression $2,0 \text{ N/mm}^2$, facteur de retrait pour le pisé nature 0,5% (pisé blanc, jaune, rouge et gris ainsi que le pisé fin 02.008, facteur de retrait $\geq 0,7\%$)

CONDITIONNEMENT

Humide en big bag de 1,4 tonnes

STOCKAGE

Eviter le séchage, la déshydratation et éviter qu'il prenne l'eau, placer à l'abri des intempéries. Stockage à long terme possible. **Avant la mise en œuvre, tester l'homogénéité de l'humidité de la matière et tester son ouvrabilité.**

BESOIN DE MATÉRIAU

Un big-bag permet de réaliser $\pm 0,6 \text{ m}^3$ de mur pisé fini.

TRAITEMENT, EXÉCUTION

Murs : le matériau pisé est versé par couches de 10 à 15 cm dans des coffrages stables et ensuite est comprimé automatiquement ou manuellement au maximum de manière régulière. **Les murs porteurs doivent respecter les "règles de la construction en terre" éditées par l'association Dachverband Lehm e.V. Ils doivent être réalisés et surveillés durant toute leur réalisation par un spécialiste expérimenté.**

Sols : sur un fond propre et stable (béton), le pisé est placé par couches et chacune d'elle est comprimée automatiquement ou manuellement au maximum de manière régulière.

une résistance à la compression et un facteur de retrait. Dans la fiche produit, il est écrit en gras : “Les murs porteurs doivent respecter les «règles de la construction en terre» éditées par l’association Dachverband Lehm e.V. Ils doivent être réalisés et surveillés durant toute leur réalisation par un spécialiste expérimenté.”* Rappelons que l’Allemagne s’est doté de Règles Professionnelles et de normes sur la terre crue depuis plus de 15 ans.

Dans le Traité de construction en terre de CRAterre, la production du pisé est déclinée selon quatre étapes : l’extraction de la terre, le criblage, le malaxage et le transport. “Il est assez fréquent de devoir cribler la terre à pisé”*, c’est-à-dire tamiser, retirer les cailloux. Cette étape peut être mécanisée avec des tamis vibrants. Acheter de la terre prête-à-l’emploi permet au constructeur de s’abstenir de ce labeur ainsi que de la phase de malaxage pour homogénéiser la matière.

J’ai pu constaté la pénibilité de cette tâche lors des ateliers de Riccardo de Paoli, dans l’UE terre-cruée à l’EnsaNantes. En technique artisanale, on «malaxe» la terre à l’aide de pelles en formant deux tas : le premier est sec, le deuxième est humidifié progressivement. On passe la terre d’un tas à l’autre pour contrôler l’humidité; en effet, pour le pisé la matière est à peine mouillée. Ce travail est fastidieux, long, et épuisant physiquement.

Alors ce conditionnement de la terre en big bag, fait gagner du temps et demande moins d’efforts aux constructeurs. Mais très vite les critiques surviennent au niveau de l’impact écologique dû au transport, sachant qu’un big bag pèse plus d’une tonne. La matière terre omniprésente n’est plus gratuite, ni même à «zéro» demande énergétique. Si la distribution de ce matériau prêt-à-l’emploi permet de construire en pisé

n’importe où en France, il faut se demander si cette délocalisation vaut le coût.

Erwan Hamard a un avis très tranché sur la question qui met en cause davantage la philosophie liée à la terre que les aspects énergivores...

“On a un matériau qui est naturel et à chaque nouveau chantier, le matériau va être différent. Donc on ne peut pas se placer dans une logique industrielle dans le sens où je vais toujours faire du pisé par exemple. Une logique industrielle ça serait ça. J’ai mon coffrage, j’ai mon malaxeur, je mets 10% de chaux tout le temps, et je fais du pisé, toujours, quoiqu’il arrive. Pour faire cela, il faudrait que mon matériau soit toujours le même, alors on ne peut pas le faire. Il y en a qui préconisent ça, moi j’ai entendu des gens de CRAterre disant il faut faire du pisé partout dans le monde avec une correction granulaire...”*

Est-ce une absurdité d’acheter un matériau qui se trouve sous nos pieds ? Vouloir à tout prix utiliser la méthode pisé peut importe notre région, n’est-ce pas encourager l’acculturation et l’uniformisation du patrimoine bâti ? Ou encore, face à tous ces questionnements, on peut argumenter que construire avec une terre à pisé commercialisée prêt-à-l’emploi sera toujours plus viable écologiquement qu’une maison en béton par exemple (la plus répandue) ?

Une fois livrée sur le chantier la terre déjà humide et tamisée, est élevée, installée dans le coffrage puis damer. On travaille par couches successives de 10 cm. Le labeur est long et fatiguant mais si l’on s’équipe de pisoirs mécanisés comme les fouloirs pneumatiques, il faut porter l’outil, subir ses vibrations. Le coffrage est enlevé directement et remonté pour bâtir le reste du mur. Le principal inconvénient de la technique pisé est son exigence saisonnière : on ne peut

pas construire en hiver avec la pluie, la neige et le gel, le mur doit pouvoir sécher sans jamais être mouillé. Il est possible de construire en pisé uniquement d’avril à octobre, soit 7 mois sur 12.

C’est pourquoi d’autres développent la préfabrication du pisé. L’exemple le plus connu est sans doute Martin Rauch, ingénieur et sculpteur autrichien.

La préfabrication du pisé dans l’usine de Martin Rauch.

Martin Rauch est né à Schlins en Autriche en 1958, où il est formé à la céramique. C’est un artisan-piseur. En 1999, il fonde le bureau d’études Lehm Ton Erde (LTE *glaise argile terre*) qui deviendra très vite la référence européenne pour la construction terre crue. Son intérêt pour ce matériau cru lui vient de ses expériences de voyage en Afrique, où la technique vernaculaire le séduit.

En 2001, il publie *Rammed Earth* (Birkhäuser), fruit de son expérimentation sur la préfabrication de blocs de terre compactée. Il part du constat que la construction terre infiniment riche, fût évincée par la Modernité du XXe siècle. Même si un regain d’intérêt a lieu depuis ces trente dernières années, la richesse de ces pratiques restent largement inexploitées. Martin Rauch met en évidence ce paradoxe avec le renouveau de la filière bois : “il suffit de mentionner que dans les pays alpins ou scandinaves, la filière bois dispose de nombreuses écoles, soutenues et promues par une industrie influente”.*

Il profite de l’édification de sa propre maison, la Haus Rauch, en 2010 pour mettre en œuvre ces premiers blocs pisé et publie un nouvel ouvrage. Ces éléments n’ont pas vocation à être porteurs : installés en façade, ils apportent une qualité d’ambiance extérieure avec les strates de couleurs et la rugosité des grains et une inertie thermique. Pour ne pas dévoiler une mise-en-œuvre de préfabrication et faire croire à un coulage in-situ, les blocs atteignent une longueur supérieure à 4 mètre de long, les raies de couleurs sont contrôlées pour assurer une continuité graphique d’un élément à l’autre.

Pour le projet en Suisse de l’école d’agriculture de Mezzana (2010-2012), la structure porteuse est en brique. Une lame d’air sépare cette terre cuite à la façade autostable en pisé préfabriqué (coupe *ci-contre p.89*). Ainsi, d’un point de vue technique, seul la capacité

* Erwan Hamard, entrevue mars 2017

* Pierre Frey, auteur de l’article Terre à Terre Martin Rauch, AA’ janvier-février 2013 n°393

Maison des plantes Ricola

TECHNIQUE : pisé préfabriqué non-porteur

PROXIMITÉ TERRE : moins de 10 km

CONSTRUCTEUR TERRE : Lehm Ton Erde avec Martin Rauch

ARCHITECTES : Herzog & De Meuron

CLIENT : Ricola

DATE : 2012-2014

LOCALISATION : Laufen (Suisse)

PRIX ET LABEL : Terra Awards 2016

PRÉFABRICATION : 670 blocs de 1,30m de haut sur 3,60 m de long pour 45cm d'épaisseur, pour 3000m* de façade

COÛT : 14,56 million d'euros

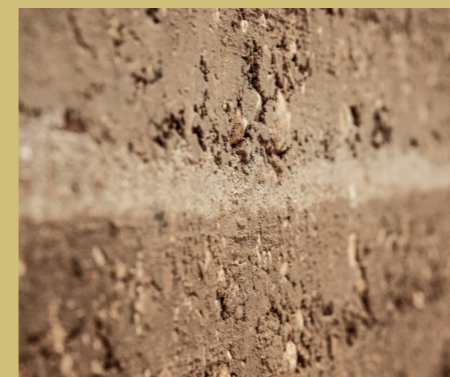
Il est un projet modèle, c'est-à-dire promoteur de l'usage de la terre crue : sa façade mesure 11 mètres de haut sur 110 mètres de long, c'est le plus grand bâtiment pisé d'Europe, mettant en avant les qualités esthétiques du matériau monolithe. D'autant que Martin Rauch y figure son principe de l'érosion contrôlée.

La terre a été choisie pour sa capacité à réguler l'hygrométrie dans ce programme de halle de préparation des plantes Ricola. On tire également parti de son inertie thermique mais il n'est pas porteur.



Pour sécher les plantes, l'entreprise économise en utilisant les rejets de chaleur de l'atelier de production des bonbons qui se trouve à proximité.

Le mélange de terre se compose à 30% de marne calcaire, 30 % de gravats de démolition et 40 % d'argile provenant des tuileries, briqueteries ou carrières alentour. En tout, il a fallu 3000 tonnes de matière pour une enveloppe de 11m de haut sur 110m de long et 30m de large.



La programmation de ce bâtiment exige des conditions de qualités d'air et d'humidité strictes : c'est le lieu qui centralise tous les procédés de fabrication des bonbons Ricola. Le choix du matériau terre par Herzog & De Meuron s'est donc fait pour ses qualités de régulateur de température (inertie thermique et changement de phase) et de qualité d'air (hygrométrie) notamment avec la halle centrale de culture et de stockage des plantes.

C'est également une écriture architecturale contemporaine, volonté de la Société commanditaire pour chacune de ses filiales, et intégrée facilement dans le paysage montagneux. L'agence HdM ont travaillé à sept reprises pour la famille Richterich, propriétaire de Ricola Avec ces murs aveugles de 110 mètres de long, la terre mise-en-œuvre offre une surface continue d'une matérialité rugueuse et stratifiée par ses couleurs.



Si le coût total de la construction est élevé, la maîtrise d'œuvre compte sur la basse consommation énergétique du bâtiment pour économiser à long termes. En effet, le stockage des plantes demande une humidité stable dans la pièce, fluctuant entre 40 à 60% de l'air ambiant. Ces paramètres sont garantis par la matière terre, aucun équipement additionnel couramment utilisé n'est nécessaire, c'est-à-dire aucune énergie liée à l'activité. Encore récent, l'efficacité énergétique du bâtiment reste à mesurer.



d'inertie de la matière terre est utilisée. En revanche, pour la maison des plantes Ricola d'Herzog & De Meuron en 2014 (focale p.87), l'ossature porteuse poteau-poutre en béton armé permet de laisser apparent les blocs pisé à l'extérieur comme à l'intérieur, profitant ainsi du caractère régulateur de la terre crue. Pour ce bâtiment, c'est bien la demande d'un important volume de matière qui à animer l'envie d'une démarche industrielle comme il l'est précisé dans la fiche de candidature au Terra Awards : "Les quelques 3000 m* de façade en terre compactée de 45 cm d'épaisseur appelaient une approche industrielle."* Il est le plus grand bâtiment pisé d'Europe.

Au final, la préfabrication des 670 blocs a demandé 8 mois de travail. Élaborée en ateliers, cette production est constante, chiffrable, les éléments pisé peuvent être contrôlés donc sans aucun défaut, le chantier ne s'arrête pas lors des intempéries (description de la chaîne de préfabrication focale p.98). La pose *in-situ* a été extrêmement rapide soit 3 mois tout juste pour édifier les murs de ce projet. Le but est de gagner du temps et de l'argent.

On ne trouve pas facilement les informations concernant le prix de ce bâtiment dans les publications, certains sites internet d'architecture mentionnent même «budget: non dévoilé»*, d'autres n'évoquent tout simplement pas la question comme pour les fiches projets lauréat du TerraAwards 2016 pour lequel Martin Rauch a été prisé grâce à son ouvrage Ricola. Ce n'est qu'en errant longuement sur internet que je suis tombée sur le chiffrage du projet Ricola soit 14,56 millions d'euros avec l'article de la Confédération Suisse.*

Pour se faire une idée de ce coût, on peut citer ce même article basé sur les propos de Daniel Bhend, responsable du département technique de Ricola : "Si le Kräuterzentrum a coûté 16 millions de francs, Ricola compte sur son fonctionnement peu énergivore pour réaliser des économies". On imagine donc que l'enveloppe budgétaire demeure relativement élevée. Il m'est impossible de comparer ce coût à d'autres bâtiments de part le caractère extraordinaire de ce projet, bâtiment pisé le plus grand d'Europe. Je n'ai pas pu trouver une opération équivalente pour établir une comparaison des prix.

A l'occasion d'un entretien avec Erwan Hamard (thésard à l'IFSTTAR), il me fait part de son avis sur ce coût en ces termes : "Martin Rauch «le champion de pisé» a fondé son usine et envoi les éléments préfabriqués sur camion. Cela fonctionne parce que c'est Martin Rauch, que du coup il a une aura, mais ça fait des bâtiments

* exemple de fiche de candidature pour le Terra Awards, publié par CRAterre sur le site internet <http://craterre.org>

* site architizer, fiche technique du projet Maison des Plantes «budget: undisclosed». J'ai envoyé plusieurs mail pour tenter d'obtenir cette information, aucune réponse.

* «Le nouveau Kräuterzentrum de Ricola allie nature et économie» écrit en août 2015 par Yvonne von Hunnius, disponible sur www.gruenewirtschaft.admin.ch, site officiel de la Confédération Suisse

* propos recueilli lors de notre entrevue à Nantes en mars 2017

* Ecologik - n°50 mai juin juillet 2016, p.30

très chers. [...] Je pense que ce n'est pas concurrentiel du tout et que ça ne permettra pas à la filière de se développer."*

D'autres ne sont pas de cet avis : dans un article du magazine Ecologik, l'architecte bien connue Dominique Gauzin-Müller dédie un article sur cette pensée industrielle, intitulé «Martin Rauch, le magicien du pisé». Elle semble enthousiaste quant à la portée de ces procédés sur le développement de la filière terre-crue et s'exprime ainsi : "son approche industrielle innovante ouvre pour l'architecture en terre de nouvelles perspectives."*

Par ces deux citations, on entrevoit le débat sur l'industrialisation sous-jacent : coup de pouce pour la filière ou illogisme pour notre matériau local et naturellement prêt-à-l'emploi.

Cette discussion est finalement présentée tout au long de cette deuxième partie de mémoire et ne peut être résumée en quelques lignes. Néanmoins, un dernier exemple de projet du constructeur LTE peut permettre d'illustrer les arguments débattus : le centre ornithologique de Sempach en Suisse.

Fig. 27: Coupe de l'école Mezzana, source article de Pierre Frey dans AA' n°393

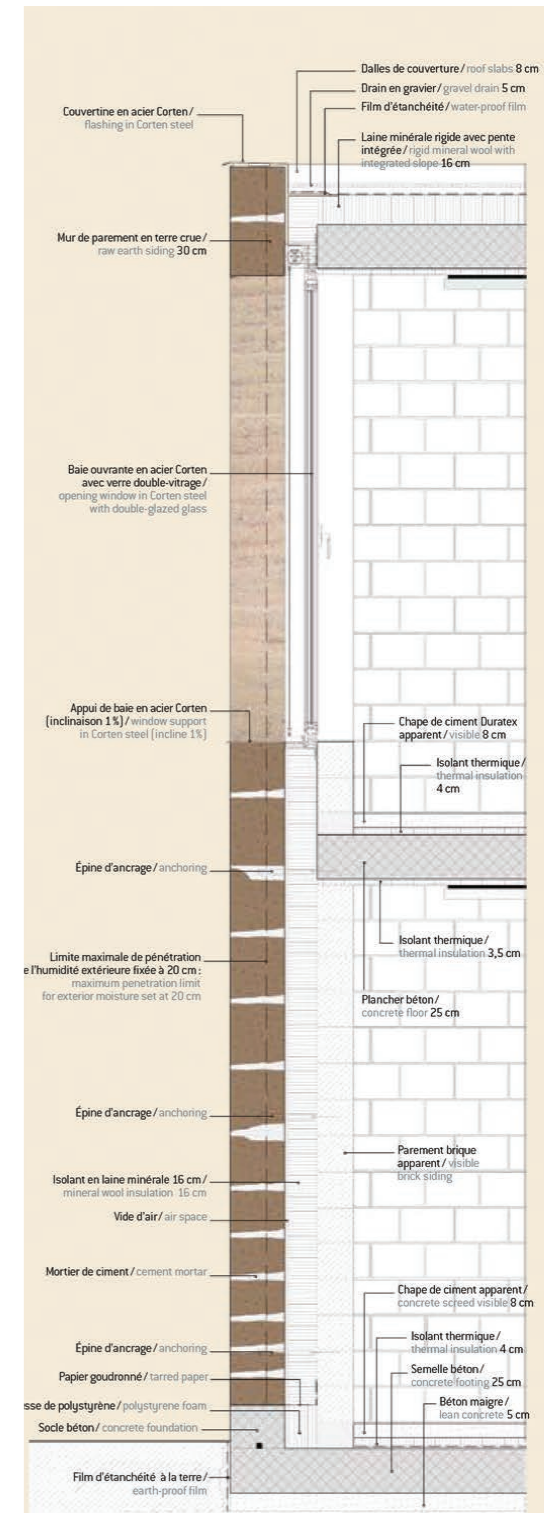


Fig.28: Ecole d'agriculture Mezzana avec strates d'érosion contrôlée, pisé préfabriqué, Martin Rauch, architecte Conte Pianetti Zanetta



A l'occasion de la maison des plantes Ricola, l'entreprise LTE ouvre une filiale à Zwingen pour une halle de fabrication de blocs pisés. LTE renouvelle l'expérience de ce façonnage avec le centre ornithologique. La surface de murs à pisé est deux fois moins importante (1240m* au lieu de 3000m*), ce qui n'a pas empêché d'adopter cette démarche industrielle. Alors que cette halle de préfabrication se situait à moins de 10km du site Ricola, elle se tient à plus de 80km de ce deuxième projet à Sempach.

C'est en ce point que les avis divergent : est-il raisonnable de faire venir la matière première d'un lieu aussi éloigné ? Cette distance entraîne nécessairement un transport important, chaque bloc atteignant 4,6 tonnes. Ce qui représente un coût et un impact écologique évident.

Comme nous l'avons déjà dit, le but n'est pas de trancher moi-même sur le bien-fondé de ce processus mais simplement de présenter les raisonnements liés. D'autant que les budgets et les coûts énergétiques ne sont pas toujours publiés. En revanche, je peux remarquer que le projet bénéficie du label Minergie P-Eco, ce qui témoigne d'un intérêt écologique certain. Notre fameux curseur entre écologie/économie/philosophie, est encore une fois à positionner selon mes opinions : est-ce que j'accepte un bilan énergétique plus élevé qu'il n'aurait pu mais en deçà d'une construction conventionnelle qui sera toujours plus énergivore ?

Pour Laura Marcheggiano, membre de Lehm Ton Erde, l'engagement premier de l'entreprise est de combattre la stabilisation*. Dans des pays comme l'Australie ou les États-Unis, l'emploi de la terre est fréquent mais toujours stabilisé au ciment. Pour la société autrichienne s'est une aberration en contradiction avec la philosophie du matériau qui est de construire avec une matière

locale puis pouvoir la détruire pour retourner à la terre. Cet effort est tout-à-fait louable. En revanche, la notion de «local» est à questionner : une distance de 80km bénéficie-t-elle de ce qualificatif ?

Le principe de stabilisation est récurrent et sera davantage détaillée en dernière partie de ce mémoire qui traite de la normalisation.

La chaîne de préfabrication mise-au-point par l'entreprise est présentée dans la focale n°X page suivante.

En quelques mots, l'opération consiste à subdiviser la façade en tronçons de 50 mètres qui seront la base d'une planification : ces tronçons sont produits chronologiquement et parallèlement mis-en-place sur le chantier. Le transport d'un tel mur est impossible, la longueur est donc coupée pour permettre l'acheminement jusqu'au chantier. La machine pour scier le pisé est inventée par l'entreprise, on modernise l'outillage pour faciliter les tâches et augmenter le rythme d'usage, c'est industrialiser. Une fois coupés, les éléments sont transportés en zone de stockage (couverte) pour une durée de séchage de 3 semaines minimum. Enfin, ils sont transportés par camion jusqu'au chantier, situé à plus de 80km de là pour le cas de Sempach, pour être assemblés en façade. Pour mettre en place ces blocs sur le chantier, on manipule avec une grue. Entre les

* interview de L. Marcheggiano donnée par Amaco, disponible sur la chaîne youtube, titre de la vidéo «pisé préfabriqué»

ci-contre encadré :

* Pierre Frey, auteur de l'article *Terre à Terre* Martin Rauch, AA' janvier-février 2013

* id

éléments, on maçonne du mortier de terre.

Les étapes décrites permettent de dégager les avantages de ces blocs pisés :

- le séchage en atelier de stockage est indépendant des intempéries, la température intérieure de cette halle est constante tout comme le temps de séchage
- la planification du chantier est aisée en raison de cette constante de production
- si le temps est prévisible, le coût de main d'œuvre lié l'est également, le chantier est estimable en temps et en argent le plus justement possible
- on va pouvoir responsabiliser puisque c'est le fabricant qui garantit cette durée de fabrication, si elle excède c'est à cause de lui que le chantier prend du retard et inversement, on sépare les tâches pour mieux les définir,
- Martin Rauch est capable de préciser "nous garantissons une résistance à la compression de 2,4 MPa"*
- on contrôle un à un les éléments pour garantir leur qualité
- aucune zone d'extraction et de production n'est nécessaire sur le site de projet
- par leur aspect, ils gardent une impression d'une matière monolithique souvent apparentée à une écriture architecturale contemporaine

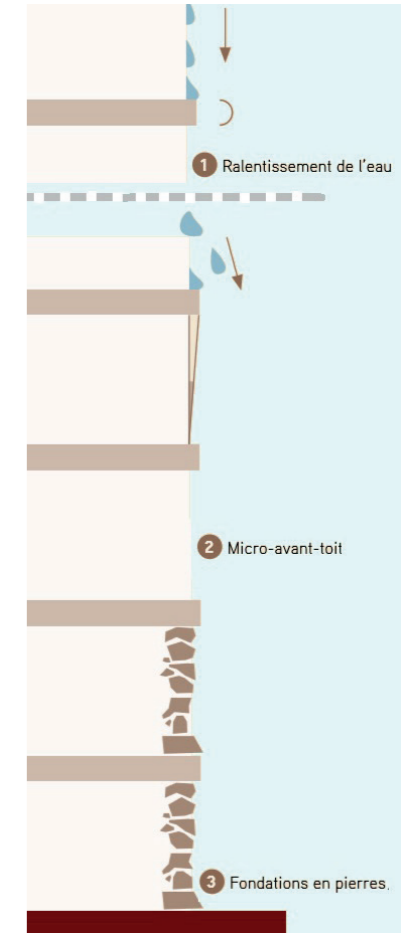


Fig.X

L'ÉROSION CONTRÔLÉE DE MARTIN RAUCH

Si la construction terre offre de nombreuses qualités, elle souffre d'un inconvénient majeur qui est sa vulnérabilité à l'eau. Des remontées capillaires, aux ruissellements, l'érosion détruit le mur et les ruines terre-cruce entrave la réputation de ce matériau. Sa réflexion première est fataliste : "La dégradation de tous les matériaux est certaine et inéluctable, seule change la vitesse du processus".* La prescription du fameux «bonnes bottes et bon chapeau» ne lui conviennent pas puisqu'elle restreint l'expression architecturale. Il veut pouvoir compter sur les capacités de la matière plutôt que sur des dispositifs extérieurs.

Ainsi, il voit deux étapes d'érosion : la première, égraine la couche superficielle aux premières pluies et dévoile une seconde surface bien plus dure et compacte. Il s'agit d'accepter cette abrasion, au même titre que les planches de bois à l'abrasion tolérée, mais de réduire la vitesse d'écoulement sur le mur en y intégrant des assises (saillies de briques cuites, ou couches de mur en ciment débordantes telles un avant toit).

* M.Rauch cité dans Le Moniteur n°5752 février 2014, article «La construction en terre crue a sa vitrine en Suisse» par Christian Robischon, l'allusion est brève car aucune information additionnelle traitant de la normalisation des blocs LTE n'a été trouvée

Fig.29 : coupe principe de l'érosion contrôlée, source AA' même article

Chaîne de préfabrication LTE

La terre est extraite au plus près de la halle de préfabrication. Une machine concasse et mélange la terre, l'homme ajoute l'eau au tuyau. Le mur est édifié en un seul bloc de 50m de long ! Impossible à transporter, on le divise en tronçons de 5m avec une machine disqueuse développée par LTE spécifiquement.



La description du procédé est issue d'une vidéo mise en ligne par Amaco pour sa série *Construire en Pisé*.



Une machine sur un rail longe le coffrage pour y déposer la terre soigneusement.

Puis une autre, pilonne et tasse avec une roue métallique. On décoffre immédiatement.



Les blocs sont stockés dans un hangar fermé à température constante pendant 3 semaines avant d'être transportés sur le chantier en camion.



Ils sont manipulés à la grue, chaque blocs pesant plus de 4,5 tonnes. Ils sont assemblés avec un mortier de terre, les finitions se font à la main.



- la matière terre coffrée reste locale provenant des excavations ou briqueteries alentours.

Aujourd'hui, l'entreprise étudie la possibilité de préfabriquer des blocs avec une isolation intégrée entre deux pans de pisé, apparent aussi bien à l'extérieur qu'à l'intérieur. Les résultats de leur recherche ne sont pas encore divulgués mais le principe d'isolation intégrée à l'épaisseur du mur est une pratique de plus en plus courante dont la focale n°X (p.X) du projet Centre d'interprétation du patrimoine archéologique de l'agence NUNC, nous aide à entrevoir l'idée générale.

Au départ, l'unité de production de Zwingen devait être à temporaire. On peut imaginer un scénario où l'édification se ferait par préfabrication dans un atelier, lieu loué à l'occasion proche pour une durée déterminée.

Les méthodes de Martin Rauch demandent à l'entreprise en charge du lot pisé d'être relativement importante-avec un capital certain-capable de produire en halle de fabrication une grande quantité de blocs avec la machinerie correspondante. Il faut manutentionner ces éléments avec des grues sur des centaines de camions supportant plus d'une vingtaine de tonnes. Si les bénéfices économiques et écologiques ne sont pas si flagrants, peut-être doit-on redescendre d'un degré (d'industrialisation).

C'est pourquoi d'autres praticiens préconisent la préfabrication sur chantier, ce qu'on peut appeler la «préfabrication artisanale».

La préfabrication artisanale de Nicolas Meunier, maçon-piseur.

Tout d'abord il faut avoir en tête que les missions de l'entreprise Meunier n'ont pas la même échelle que celles de LTE. Il est maçon-piseur en Rhône-Alpes, implantée à Chambles dans la Loire (42), la société répond majoritairement à des demandes de réhabilitation dans cette région emblématique du pisé. Ce n'est qu'une à deux fois par an qu'elle s'occupe de construction neuve.

Nicolas Meunier expérimente la préfabrication d'éléments pisé, à partir de 1987 "dans l'objectif d'adapter la technique traditionnelle du pisé aux contextes économiques et sociaux de l'Europe actuelle."* La

* interview de Nicolas Meunier, disponible sur le site officiel de l'entreprise <http://www.construction-pise.fr>

méthode est la suivante. On réalise le bloc au sol, au pied du mur sur le chantier: on coffre, on compacte, on démoule instantanément, on vérifie. Le coffrage est de dimensions variables, son format maximum est de 2,20m de longueur, 1m de hauteur et 50cm d'épaisseur. Il est ensuite élevé à l'aide d'une grue et posé sur un lit de mortier de chaux ou de terre. Le pisé de Meunier est porteur !

Le travail se fait au sol, on peut tourner autour de l'élément, vérifier son aspect, faire des finitions ou des détails plus aisément (chanfreins, réservations, feuillures, etc). Les outils se déplacent moins sur le chantier.

La production peut continuer en temps de pluie, on abrite la zone de fabrication et le chantier ne prend pas de retard.

Il utilise ce pisé préfabriqué pour la construction d'un immeuble r+3 à Montbrison en 1995. Contrairement aux projets de Martin Rauch, ce n'est pas le grand volume de matière qui a motivé le choix de la préfabrication- «que» 200m* de surface à piser- mais l'exiguïté du terrain. En milieu urbain, au bord de ce boulevard de centre-ville, on ne pouvait pas se permettre d'excaver sur site ou d'organiser le chantier en zones d'extraction, de mélange, de séchage. Il fallait aller vite.

Ce sont 202m* de pisé, assemblage de 146 blocs. Calibrés et numérotés, ils sont fabriqués au pied du mur au fur et à mesure et installés à raison de trois blocs par jour sur une durée totale de 49 jours. S'il l'on compare naïvement au 10 mois nécessaire à la mise-en-œuvre des 2030 m* de pisé pour la station ornithologique de Suisse, il est évident que le procédé de Meunier est bien plus long. L'application d'un facteur 10 correspondant au ratio des surfaces (202m* et 2030m*) emmène à un temps d'édification de 500 jours, soit un an et quatre mois au lieu de seulement 10 mois.

Mais il faut comparer ce qui est comparable, la programmation et donc l'envergure des deux projets est effectivement très différente. Meunier aurait-il adopté une préfabrication industrielle pour une commande de plus de 2000m*, ou là n'est-il pas la question: par sa structure d'entreprise PME il doit se contenter de petites échelles de projet. Ce propos peut paraître impertinent mais en réalité, le but est de démontrer que le degrés d'industrialisation s'adapte à l'envergure du projet et surtout, il est parfois imposé par cette taille. C'est l'avis de plusieurs acteurs de la filière : si l'on doit démocratiser l'usage



Fig. 30 (ci-dessus): Immeuble de logement dans le centre-ville de Montbrison (42), préfabrication artisanale, pignon nord en brique, Source www.tera-terre.org

de la terre-crue, on doit pouvoir construire des bâtiments publics d'une échelle relativement grande, donc nécessairement accroître la production et le rendement de matière par une industrialisation poussée. Ainsi en extrapolant, s'il n'existe pas de groupes industriels capitalistiques capables de fournir des produits de préfabrication, les petits entrepreneurs seront évincés de la course (du moins dans le cadre de projets d'important volume).

Si la méthode de Meunier n'est pas si rapide, sa réalisation induit que peu de transport, uniquement celui de la terre excavée à moins de 20km (au lieu de 80) et l'entreprise accroît sa rapidité de mise-en-œuvre.

Si ces points paraissent économiques, ils sont vite contrebalancés par la location d'engins de levage que doit financer cette petite entreprise. Cette pratique de préfabrication a permis de ne pas être soumis aux intempéries, cependant il a fallu louer une grue pour déplacer les éléments lourds. Par conséquent il conclut que l'impact économique n'est pas différente d'une mise-en-œuvre traditionnelle.

Pour Nicolas Meunier, l'un des avantages de la préfabrication est la "Banalisation et efficacité des gestes à la fabrication". En revanche, de manière très clair sur son site internet il exprime son sentiment : "Vouloir centraliser la production des blocs, les stocker et les transporter sur plusieurs kilomètres est techniquement très facile mais cela est une aberration sociale et écologique."*

* interview de Nicolas Meunier, disponible sur le site officiel de l'entreprise <http://www.construction-pise.fr>

Fig. 31 (ci-dessous):
Préfabrication sur chantier de l'équipe de N. Meunier pour le chantier de Montbrison,
Source www.tera-terre.org



LA MISE EN ŒUVRE

Vers une mécanisation du chantier..

En réalité, l'objectif premier de Nicolas Meunier n'est pas de réduire considérablement le coût de main d'œuvre mais la pénibilité du travail et les accidents de chantier, ce que permet bel et bien sa méthode de préfabrication. C'est pourquoi une partie de ses recherches s'orientent sur l'élaboration de machines de mise-en-œuvre.

Le damage du pisé

Initialement, le pisé se compacte avec un pisoir : un manche d'environ 1,20m au bout duquel est fixé une masse en bois. L'outil est lourd, il faut lever et fouler avec la force des bras. On pise couche par couche d'une épaisseur de 10cm, on foule d'abord sur les cotés de la surface puis au milieu, enfin on finalise le damage avec un tasseau pour compacter plus finement au niveau des angles, la partie la plus fragile du mur pisé. Puis, au XXe siècle, on s'arme d'un fouloir pneumatique : il faut le brancher à l'électricité sur le chantier et la pénibilité des vibrations et du poids de l'engin est digne d'un marteau-piqueur. En revanche, la compression est bien plus élevée et le travail demeure moins fatiguant et surtout moins long que manuellement avec un pisoir bois. La posture de l'ouvrier reste similaire : il se tient debout à l'intérieur du coffrage et foule sur plusieurs allers-retour.

Nicolas Meunier développe son outil de travail avec une nouvelle invention : le compacteur aérien.

Il permet de tasser la terre dans le coffrage rapidement et sans effort pour l'ouvrier. La machine foule la matière par le va-et-vient vertical de masses actionnées sous air comprimé. Elle est branchée sur un banal compresseur de chantier. Elle est montée sur un rail, l'ouvrier déplace le compacteur sans effort, il ne subit ni son poids ni ses vibrations. Elle nécessite que peu d'énergie, ne présente aucun

* site officiel de Nicolas Meunier, www.construction-pise.fr/Compacteur-aerien

risque pour son manipulateur qui se tient en-dehors du coffrage.

De plus, la vitesse de foulage et la hauteur de chute peut être choisie. Sur le site internet de l'entreprise Nicolas Meunier, les innovations sont présentées. Une vidéo* compare le temps nécessaire au compactage d'un mur pisé avec cet engin et avec un fouloir pneumatique courant. Pour 1m* de mur pisé (50cm d'épaisseur), la durée de damage avec un fouloir pneumatique courant est de 45min contre 6min30 avec le compacteur aérien.*

Au final, cet outil a fait l'objet d'un brevet d'invention en 2014.

* site officiel de Nicolas Meunier,
www.construction-pise.fr/ Mise-
en-oeuvre-traditionnelle

Fig.32 : Le compacteur aérien est bien plus rapide que le fouloir pour damer ces 1m² de mur pisé



Fig.33 : Le damage courant à l'aide d'un fouloir pneumatique a remplacé le pisoir en bois



Les coffrages, héritage de l'industrie du béton

Autrefois, les coffrages étaient en bois, relativement légers et demandaient peu d'outils. On les déplaçait horizontalement pour édifier la longueur du mur. Depuis le XXe siècle, on réemploi le matériel hérité de l'industrie du béton comme les banches métalliques qui résiste bien mieux aux poussées horizontales liées à l'impact du damage. D'autant que, les pisoirs ayant évolué avec les fouloirs pneumatiques cette force de chocs est bien plus élevée. Pour résister à ces efforts horizontaux, on équipe le coffrage de tirants (tiges horizontales) mais cette astuce complexifie la tâche de compactage puisqu'ils font obstacle à l'intérieur du mur, de plus, lorsqu'on décoffre les trous sont apparents. C'est pourquoi l'évolution avec des banches métalliques facilite la construction d'un mur pisé, renforcées en extérieur on n'a plus besoin de tirants enfouis dans le mur. Ces innovations sont facilement démontables, on déplace la banche verticalement maintenant pour édifier la hauteur du mur. Avec les contres-fort, les étais et autres, l'entreprise doit posséder davantage d'outils.

Frédéric Moy, artisan de l'entreprise de construction Héliopsis, s'exprime lors de la deuxième conférence de Bellastock en mars 2017*. Aux Grands Ateliers ont lui demande de faire des recherches sur la modernisation de la technique pisé. Il met au point un coffrage en bois avec des contreforts sur l'extérieur pour éviter d'avoir les écarteurs en intérieur qui empêchent la circulation des ouvriers qui viennent dedans pour piser. Il gagne énormément de temps selon lui avec cette technique de coffrage sans tirants.

Puis, il est contrarié par le temps que prends le remplissage du coffrage : il faut seau après seau, faire attention à jeter la terre à pisé contre la paroi du coffrage pour que les cailloux rebondissent et se placent à l'intérieur du mur (plutôt qu'à l'extérieur comme il se fait naturellement). Il invente donc une technique pour mettre en place le pisé : à l'aide d'un cadre en bois rempli du lit de terre et soulevé par grue, il place l'appareil juste au-dessus du coffrage et ouvre la double trappe. La terre tombe d'un coup et s'éparpille sur toute la surface du mur, les cailloux sont autant au milieu que sur les bords, et on a plus qu'à venir étaler grossièrement.

* Frédéric Moy, la conférence Bellastock #2, le 08 mars 2017

Le facteur gain de temps attribué à ses deux techniques est de l'ordre de 2,5 fois plus rapide : alors que l'allure était traditionnellement de 1,2 m* par jour par homme, il est capable d'édifier 3m* par jour par homme.

Si le progrès de la filière béton a permis certaines évolutions pour le domaine terre-cru, tous les équipements ne sont pas tout-à-fait adaptés. Frédéric Moy nous rappelle que les coffrages béton ont pour but de laisser sécher le matériau pendant au moins trois jours, alors que pour le pisé il nous faut décoffrer immédiatement.

C'est le cas de la bétonnière : on ne peut pas homogénéiser notre matière trop sèche pour cette machine qui ségrègue au final les granulats. On utilise aujourd'hui un godet-malaxeur (soit une vis sans fin au milieu du godet) ou encore un «malaxeur planétaire».

Fig. 34 : les essais de coffrage avec renforts extérieur par Frédéric Moy aux Grands Ateliers, Source : diapo Bellastock conférence n°2



Il ne s'agit pas de lister un catalogue des innovations actuelles. Ces quelques exemples suffisent pour remarquer que ce ne sont pas des industriels qui développent des machines pour les vendre à un public de constructeurs spécialisés intéressés, mais bien les constructeurs eux-mêmes qui s'efforcent d'améliorer leur équipement. Leur but n'est pas seulement d'aller plus vite mais de réduire la pénibilité du travail, les accidents, et de clarifier l'organisation du chantier pour travailler qualitativement. Ces entrepreneurs tentent d'innover avec leur capital, potentiellement fort ou faible, ils n'ont pas des investissements colossaux mais un savoir-faire et une ingéniosité.

Comme nous l'avons effleuré avec la production de briques terre-cru, l'évolution des presses tout comme des pisoirs pour le pisé, tire partie des autres phénomènes d'industrialisation avec les progrès apportés par les machines électriques, pneumatiques ou hydrauliques.

L'élargissement de la main d'œuvre via la déqualification entraîne la dévalorisation l'ouvrier et l'acculturation.

Dans la vidéo de Nicolas Meunier, on peut lire un dernier argument : "ce compacteur ne nécessite aucune expérience particulière".* C'est l'élargissement de la main d'œuvre.

Que ce soit pour l'industrialisation ou la mécanisation, le temps de mise-en-œuvre se réduit et les praticiens n'ont pas besoin d'être spécialisé. Dans la préfabrication par exemple, une BTC est à maçonner comme une brique terre-cuite usuelle. La main d'œuvre n'est plus rare, elle n'est plus onéreuse, les bâtiments en terre se multiplient et la filière se développe. C'est le schéma du béton au XXe siècle. Plus il y a de main d'œuvre, moins elle est chère, plus les bâtiments sont nombreux et servent à la démocratisation du nouveau matériau. Mais n'est-ce pas une forme d'acculturation dans ces pratiques ancestrales locales et vernaculaire ? N'est-ce pas une dévalorisation du travail de l'ouvrier ?

Pour Stéphane Forge, le coût élevé de la main d'œuvre n'est pas nécessairement un problème*. C'est justement en ce point que la construction terre témoigne de nouvelles pratiques constructives : on se rend compte que la rentabilité d'un projet n'est pas le seul enjeu.

* site officiel de Nicolas Meunier, www.construction-pise.fr/Compacteur-aerien

* discours recueilli lors de notre entrevue à Lyon, en mars 2017

Il existe un parti-pris entre l'argument économique et l'argument qualitatif d'ordre écologique, social, culturel.

L'intensité sociale

Pour illustrer son propos, S. Forge cite l'architecte lyonnais Vincent Regassi* : "Les techniques de mise en œuvre comme celle du pisé génèrent beaucoup de main-d'œuvre [...] Notre point de vue est de considérer que cet apport de main-d'œuvre est plutôt un avantage qu'un inconvénient. Avec d'autres nous appelons cela «intensité sociale» : on met plus d'humain pour mettre moins de pétrole, l'humain étant une énergie renouvelable qui en plus produit de la culture et des savoir-faire..." Ces propos ont su convaincre à plusieurs reprises la maîtrise d'œuvre publique. Ils considèrent qu'en tant que projet public à rayonnement régional, le salaire versé à l'ouvrier stimule l'économie locale et une partie revient à l'État sous les différentes cotisations sociales que paie l'entrepreneur. La boucle est fermée.

Bien sûr le soucis économique demeure prépondérant. Vincent Regassi conclut : "Cette question d'intensité sociale est pour nous un argument fort du pisé, mais cela n'empêche évidemment pas de continuer à chercher des compromis, notamment en trouvant des conceptions de mise en œuvre rationnelles et peu chronophages..."

L'un des freins de la filière est la main d'œuvre onéreuse. Pour moi, il convient donc de discerner deux choses. L'élargissement de la main d'œuvre et la déqualification de l'ouvrier.

Le premier n'est pas de dévaloriser un savoir-faire mais de le transmettre. Les enseignements seront de plus en plus nombreux, les praticiens seront moins rares et moins chers. Contrairement à l'histoire du béton comme nous l'avons vu, ce ne sera donc pas la facilité de mise-en-œuvre et donc la déqualification qui entraînera un élargissement de la main d'œuvre mais un effort dans l'enseignement et la communication pour que les futurs praticiens soient séduits et puissent se former en terre-cru.

Nicolas Meunier n'en pense pas moins. Pour lui, le point le plus enthousiasmant de son travail est le fait qu'il se repose sur le savoir-faire. On décape la terre végétale, la matière en dessous est le plus

souvent utilisable pour le pisé. En revanche, il avoue être toujours un peu craintif à la première utilisation. Il organise des tests chantier, mène une réflexion de quelques jours, et décide alors de la mettre en œuvre. Il a en main trois essais de chantier. Autrefois, ces essais n'étaient pas nécessaires. Chaque maçon connaissait un ou deux types de terre seulement, leurs faiblesses et leurs atouts (plus ou moins fragiles au décoffrage, plus ou moins résistantes, etc). Aujourd'hui, l'entreprise est appelée à exercer en Bresse, en Isère, en Ardèche, ce qui représente beaucoup de terres à connaître. D'où un manque de praticiens pour sillonner la région.

"70 à 80% du coût du pisé est de la main-d'œuvre, la moitié d'une opération pisé ne coûte rien, puisque l'argent public mobilisé retourne au public..."*

* témoignage de Vincent Rigassi par l'association TERA sur leur site officiel www.tera-terre.org

* témoignage de Vincent Rigassi par l'association TERA sur leur site officiel www.tera-terre.org

* id. témoignage de Nicolas Meunier

CONCLUSION

Dans les exemples que nous avons vus, le but de l'industrialisation est de réduire le coût de la construction. Cet effort inscrit dans une optique de filière en construction, permet de développer l'usage de la terre-cruie qui n'est plus une niche onéreuse mais démocratisée, accessible à tous (tous les ouvriers mais aussi tous les architectes, tous les commanditaires de la mairie à mon voisin).

Si l'on schématise avec une voie pour l'industrialisation et une autre simplement contre, on distingue deux courants de pensée qui ont le même point de fuite : l'objectif étant de démocratiser l'usage de la terre-cruie, car nous sommes dans tous les cas convaincus de ses atouts écologiques et esthétiques. Mais les deux chemins pour atteindre ce point divergent.

L'industrialisation suit le chemin conventionnel...

Le cycle de l'édification se décompose avec un fournisseur de matière, un fabricant de matériau, un contrôleur à chaque étape, un architecte qui choisit son produit, un maçon qui s'exécute. On peut alors responsabiliser chacun : à chaque étape, l'acteur doit garantir son accomplissement,

et petit-à-petit la construction devient viable.

Si le briquetier a fourni le mélange terre avec la formulation correspondante à l'exigence mécanique donnée par le bureau d'étude, si le fabricant a transformé cette matière en une brique dont la puissance de pressage et les dimensions correspondent à la fiche produit, si le maçon a suivi le protocole de mise-en-œuvre associé, alors le bâtiment est viable, assurable, édifiable.

Dans cette même démarche de facilité administrative si je puis dire, on a la normalisation par produit affiliée à une mise-en-œuvre qui s'opère facilement, à l'initiative de l'industriel, il garantit une résistance à la compression, à l'érosion, etc. Le produit est constant. On le trouve sur le marché (big-bag, sacs d'enduit, préfabriqués, briques) et l'architecte n'a plus qu'à choisir le matériau qui lui convient.

«Qui lui convient...» Nous reviendront sur ce point en troisième partie sur le rôle de l'architecte, puisqu'un raisonnement long et complexe est sous-entendu ici : comment choisit-il son matériau? Industrialisé, commercialisé, il cherche un prix concurrentiel? Une couleur bien spécifique avec ces fameux catalogues de couleurs aux mille et une nuances de bleus?

Avec ce matériau certifié, l'entrepreneur n'a plus à se mouiller. L'ouvrier suit un protocole de mise-en-œuvre et n'est plus nécessairement qualifié.

La boucle est bouclée : l'usage de la terre n'est plus cher ni compliqué réglementairement, les bâtiments et les pratiques se développent, la demande naît, l'offre répond, la diversité des produits est de plus en plus riche.

Cela s'inscrit dans la définition de l'industrialisation que me donne Erwan Hamard : contrôler de A à Z le matériau, de son élaboration à sa mise-en-œuvre.

L'industrialisation d'une filière c'est contrôler le matériau de A à Z, dès sa fabrication. C'est fondamentalement incohérent à la terre.

En réalité, une opinion assez explicite apparaît dans les propos de ce chercheur...

“ La terre c'est pas comme le béton. Le béton c'est un matériau industriel. C'est un matériau industriel parce qu'on maîtrise complètement la fabrication de la matière de A à Z. Pour le béton on extrait des matières, mais on va extraire la matière dont on a besoin, pour produire les granulats dont on a besoin, le ciment dont on a besoin et on va faire des formulations pour nous permettre d'obtenir la résistance qu'on souhaite. Donc dans cette démarche là on a : des architectes qui conçoivent un immeuble, un bureau d'étude qui calcule la structure en disant qu'elle doit tenir à tant de mégapascals, et derrière un vendeur de béton qui va vendre le matériau avec la bonne résistance mécanique. C'est un système qui fonctionne bien, qui à un sens puisqu'on optimise la composition du matériau par rapport à la résistance voulue. Sauf que ça, ça marche avec une filière industrialisée c'est-à-dire qu'on maîtrise tout le procédé et en fait, on vend un produit qui va donner cette résistance mécanique avec une mise en œuvre standard. Et bien avec la terre... ça ne fonctionne pas, dans le sens où on a d'emblée un matériau qui est variable.”*

C'est le contre-argument à ce chemin conventionnel : par essence-même de la matière terre, on ne peut pas plier ce matériau à nos désirs... Prêt-à-l'emploi, disponible partout, dans des natures les plus diverses qui varient d'un pré à l'autre, ce n'est pas à la terre-cruie de s'adapter à la culture constructive en vigueur mais au cadre de s'adapter à elle.

On s'accorde là encore à une deuxième définition de l'industrialisation que nous propose Erwan Hamard. Il prend l'exemple de la terre coulée de l'entreprise normande Cématerra et commente : “le système de terre coulée est un exemple d'industrialisation dans le sens où on a une technique et on fait en sorte que le matériau s'y adapte.”*

Alors comment faire ? Quelle est l'autre voie qui permettrait de

* propos recueillis lors de l'entretien à Nantes en mars 2017

* id.

construire cette nouvelle culture constructive adaptée aux valeurs vernaculaires de notre matériau ? C'est l'objet de notre dernière partie. Une évolution nécessaire, si on refuse de se plier à la vision conventionnelle, c'est pouvoir normer autrement et savoir orchestrer la totalité du cycle d'édification qui n'est plus si cloisonner : c'est le nouveau rôle de l'architecte... Pour caricaturer, sans catalogue produit, il doit articuler la réalisation du projet de l'extraction de la matière à la mise-en-œuvre du matériau. Il rencontreras les briquetiers, les agriculteurs du champ voisin, les maçons qui manient et identifie la terre, les ingénieurs qui réfléchiront avec lui (et non pas en amont), les maîtrises d'ouvrage et leur souci d'économie locale.

En guise de conclusion sur l'industrialisation, une double-page est proposée *ci-après* pour revenir sur les exemples qui nous ont paru les plus pertinents. Un scénario de l'avenir de la filière peut être entrevu. Il se base sur le constat que tous procédés industriels ne sont pas nécessairement mauvais mais doivent provenir d'un choix adapté au cas par cas. Nous rappelons l'exemple de la préfabrication du centre ornithologique qui malgré une industrialisation poussée a tout de même bénéficié du label Minergie-P-Eco. On imagine donc, qu'un degrés d'industrialisation intermédiaire est à trouver pour le consensus facilité de mise-en-œuvre/transport/écologie/social. Dans ce juste milieu où se place notre curseur, le scénario devient : les briquetiers, la mécanisation sur chantier.

En combinant les avis divergents, il nous faut mettre en garde qu'avec cette position qui peut-être vue comme «ni l'un ni l'autre», il serait facile de tomber dans le schéma conventionnel actuel, et donc l'industrialisation finirait par être acceptée. C'est pourquoi l'élaboration d'un nouveau cadre constructif est évidemment complémentaire de cette mécanisation. Néanmoins, à l'heure actuelle où la filière terre commence à peine à se trouver, on peut penser qu'une forme minimale d'industrialisation est un passage nécessaire.

.....

ci-contre
* Erwan Hamard lors de notre entrevue

* Lucien Kroll dans
«Composants, faut-il industrialiser
l'architecture ?» (p.37), éd. Socorema, 1988.

'' Donc l'idée c'est de partir du matériau qu'on a à disposition, et de chercher la bonne mise en œuvre qui convient le mieux. De cette manière là, on ne modifie pas le matériau, le matériau il est gratuit. Il est très peu transporté, donc du coup d'un point de vue économique il est très faible. Par contre, et c'est là qu'il y a le problème, c'est que si on a un matériau qu'on veut mettre en œuvre, avec des procédés pour l'instant plutôt traditionnels, ça nécessite beaucoup, beaucoup de main d'œuvre. Là c'est très cher. Donc l'idée c'est de bien travailler sur les procédés traditionnels mais de les mécaniser.

[...] Mais qui nécessite toujours un savoir-faire, c'est-à-dire que derrière y'a un maçon qui est capable d'apporter son expertise, de dire avec ce matériau-là je peux faire je peux pas faire. De cette manière là, on va pouvoir avoir une adaptation systématiquement au matériau disponible localement avec le bon procédé, mais un procédé qui est mécanisé, et donc qui limite la main d'œuvre sur le chantier, et donc qui permet d'être viable d'un point de vue économique. ''*

Erwan Hamard

'' L'organisation de la construction en masse et la spécialisation des compétences et des outillages sont supposés être des facteurs d'économies, mais dans les faits la centralisation de l'action engendre souvent des coûts insupportables d'administration et de commercialisation.

Quel est le coût au mètre carré de "logement social", quand on y comprend le traitement des maîtres d'ouvrages, des fonctionnaires, des ministères, des statisticiens, des financiers, des commerçants, des fabricants de règles techniques et administratives, des contrôleurs par rapport au mètre carré auto-construit et auto-géré ? ''*

Lucien Kroll.

Scénario d'industrialisation modérée

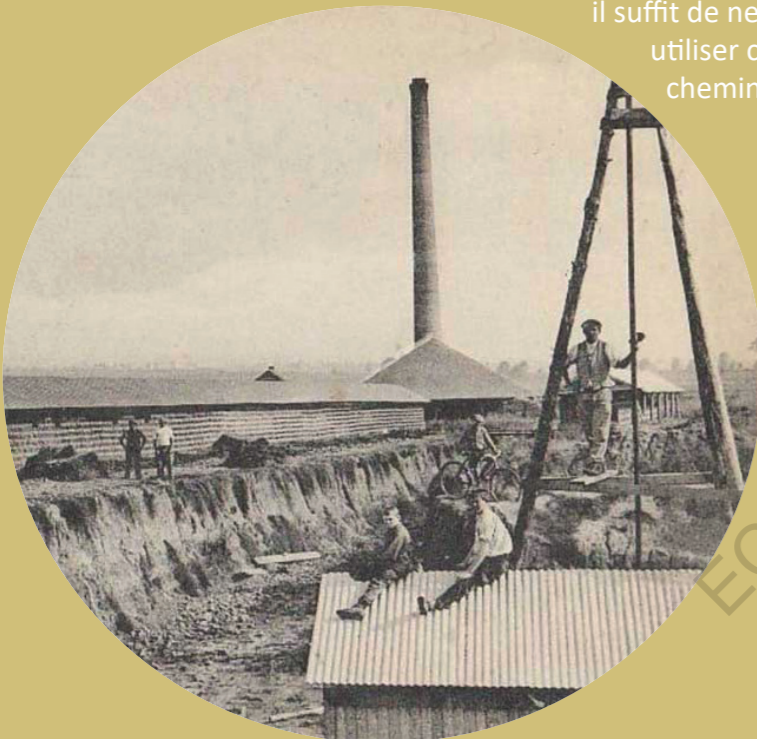
Dans notre frise de degrés d'industrialisation, un juste milieu est à trouver pour réduire la durée de chantier, son coût, la pénibilité, pour faciliter la réglementation. Tout ça dans le but de démocratiser la terre car ses capacités sont grandes et trop peu exploitées, notamment en ce qui concerne l'impact environnemental du secteur du bâtiment. Rappelons la citation de Lucien Kroll en début de partie, il ne faut ni revenir à la pierre, ni rentrer dans l'excès du taylorisme.

"Moi, j'ai souvent des chantiers où je malaxe en atelier la terre ou même j'ai mon fabricant de... producteur de matériau qui me la livre malaxée, Et je n'ai plus qu'à... en fait sur un chantier je suis relativement propre !"

F.M

LES BRIQUETERIES

Les briquetiers possèdent déjà les machines pour concasser, homogénéiser la terre, l'extraire, etc. Les ouvriers ont le savoir-faire, il suffit de ne pas utiliser cette cheminée !



LA PRÉFABRICATION ARTISANALE

SUR CHANTIER

La préfabrication sur chantier évite le transport et la délocalisation de la matière première. En revanche, il faut avoir suffisamment de place sur le site pour organiser une zone de fabrication puis de séchage couverte. C'est pourquoi l'association Bellastock, en prévision de son festival en Juillet 2017, a imaginé une "usine mobile de brique" et entend produire 50 000 BTC avant l'arrivée des équipes participantes. Sur le terrain, des serres abritent ces éléments en train de sécher.

OU EN ATELIER À PROXIMITÉ

"Si c'est développer la terre pour que à soit manger par des grosses boîtes qui ont de quoi se payer de la banche, de la manutention, et de l'ouvrier «en veux-tu en voilà» mal payé parcequ'en fait c'est facile, t'as plus qu'à bancher et à couler et à vibrer." S.F

"Les procédés traditionnels mécanisés sont bons d'un point de vue consommation en énergies grises, d'économie de ressources et d'intensité sociale. Le coût est un peu plus abordable." E.H

"L'économie du pisé peut être envisagée de plusieurs manières : on peut considérer que le pisé coûte cher, ou se poser la question de savoir, au-delà de la valeur absolue, « ou va l'argent » ?" V.R

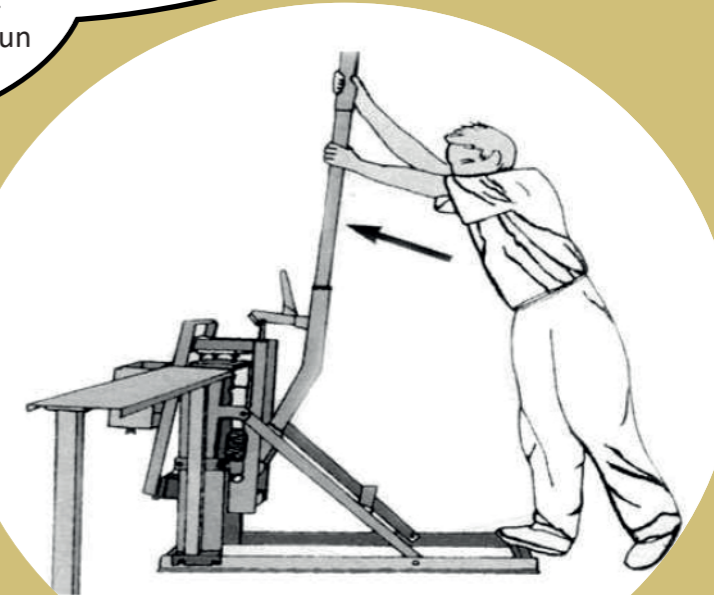
AVEC LE SOUTIEN DU GOUVERNEMENT

INTENSITÉ SOCIAL

A Montséveroux, l'architecte Vincent Rigassi a su convaincre la maîtrise d'ouvrage publique avec l'argument de l'intensité sociale qui contre-balance le coût élevé.



VERS UNE MÉCANISATION



ENSEIGNEMENT

Elargir la main d'œuvre pour qu'elle coûte moins cher, c'est développer l'enseignement, pas déqualifier l'ouvrier.

AUCUN LOBBY

Si le capital industriel motive le lobbying, la filière terre veut pouvoir se contenter d'organismes d'état « officiels » et de son tissu associatif.

3/ L'industrialisation refusée, la filière va devoir s'adapter

*"Il n'est aujourd'hui plus question de faire de l'architecture durable avec les normes et les contraintes du développement non durable."**

L. Fontaine & R. Anger

Une posture alternative à l'industrie entraîne nécessairement un changement dans la culture constructive pour la filière terre-crue. C'est à dire l'adaptation du cadre normatif à une matière naturelle et aléatoire, ainsi que celle de l'architecte qui conçoit avec elle dès les premières esquisses.

Nous l'avons vu : industrialiser la filière terre crue n'est pas toujours une absurdité mais c'est se plier au cadre constructif hérité du siècle passé. Érigé pour le béton, l'acier ou le verre, fondamentalement différents de fait d'une fabrication humaine, on comprend facilement que certains essaient de construire un tout autre cadre, spécifique à notre matériau. Disponible sous des milliers de formes, variable, vernaculaire, aléatoire, il sera difficile d'instaurer une logique réglementaire à son édification. Ainsi, sans les industriels pour vendre les matériaux et les normer -comme nous allons le voir- l'architecte endosse un nouveau rôle. La première partie du mémoire nous a révélé deux freins majeurs au développement de la filière. Le coût de la main d'œuvre ayant été traité avec le sujet de l'industrialisation, il nous faut maintenant nous atteler au manque de documents techniques de référence.

Plusieurs tentatives ont été faites durant ces vingt dernières années.

* L. Fontaine & R. Anger, «Bâtir en terre : du grain de sable à l'architecture», p.55, éd. Belin, 2009

Il serait difficile de toutes les citer puisque beaucoup n'ont pas été acceptées, donc publiées. Une citation du chercheur Jean-Claude Morel illustre très bien ce dynamisme et fait le lien avec notre conclusion précédente d'une industrialisation refusée, il dit dans un propos oral : "Il y a eu une perte des savoirs-faire. Il y a un document que l'on a écrit il y a deux ans pour le CSTB qui s'appelle «Matériaux non industrialisables». Il porte sur la terre, la pierre et le chanvre et regroupe des textes permettant de faire valider les matériaux par les assurances. Parce que la question est : Comment on fait pour certifier ces matériaux ? Mais on ne sait pas pourquoi le CSTB ne l'a toujours pas sorti." Un propos recueilli en 2009...*

Encore une fois ici, l'objectif de ce chapitre n'est pas d'énumérer exhaustivement tous ces essais de normalisation de la terre-cruie mais bien de comprendre les questionnements qui s'y cachent. Pour cela, nous avons cinq sous-parties : la première définit ce qu'on entend par normalisation de la terre, la deuxième s'appuie sur une tentative proposée par Hubert Guillaud, une troisième sur celle d'Erwan Hamard, et la quatrième relate l'expérience de l'association TERA qui rédige les codes de bonnes pratiques du pisé. Enfin, dans un cinquième et dernier point, nous tenterons de définir le nouveau rôle de l'architecte induit.

Normaliser un matériau, c'est décrire cette matière et sa filière, nommer les acteurs, comprendre leur rôle et ce que chacun demande. Par exemple, l'assureur doit être en mesure de responsabiliser chacun, chaque acteur pour chaque étape de l'acte de construire. Le maçon ou l'architecte, en prise à une garantie décennale veut pouvoir se protéger même si dernièrement ceux sont eux qui sont le plus souvent moteur d'une construction terre-cruie et acceptent ainsi d'endosser tous les risques. D'autres comme les ingénieurs structures souhaiteraient des modèles scientifiques valables pour appuyer leurs calculs.

Un deuxième intérêt pour nous d'étudier ce sujet, vient du caractère un peu spécial de la filière terre à-savoir non-industrialisée, pour lequel l'architecte va prendre un nouveau rôle. C'est le cas de Stéphane Forge qui, à l'occasion d'une entrevue en mars 2017, me fait le récit de son aventure avec TERA. En effet, pour les matériaux plus conventionnels se sont généralement les producteurs de matériaux qui élaborent les réglementations pour leurs produits. C'est ce qu'on appelle les normes. Ces groupes industriels ont l'argent pour monter

* J.-C. Morel, propos recueillis par Solène Veyseyre lors d'une entrevue avec l'ingénieur dans le cadre de son mémoire *Comment développer l'usage de la terre crue dans la production architecturale française ?* 2009, Ensalyon annexe p.37

un projet de proposition de norme qui permettent de décrire leur produit, certifier ses caractéristiques et donc à terme convaincre les bureaux de contrôle et les assureurs de la viabilité de l'ouvrage. Pour la terre crue cet épisode est évincé.

Alors, comment faire ?

Réglementation, normalisation, Règles Professionnelles... Qu'est-ce que tout cela veut dire?

Cette sous-partie décrit l'état actuel du système normatif français. Ce n'est sans-doute pas le chapitre le plus amusant du mémoire mais c'est un passage obligatoire pour comprendre pourquoi «une nouvelle manière de normer» s'impose. Pour faire cette description, je me suis aidé du cahier pratique du Moniteur intitulé «Normes»*.

Pour faire simple, on différencie deux types de documents dans le système normatif : il y a les réglementations et les normes. C'est une distinction similaire à celle proposée par l'association Le Village (spécialistes de l'adobe dans le sud-ouest) en des termes différents: il y a des textes relevant du domaine réglementaire et d'autres du domaine contractuel*. Finalement vu sous cet angle, le cadre constructif français est assez simple : les réglementations sont obligatoires, les normes sont contractuelles et non obligatoires.

Les textes du domaine réglementaire sont les lois et leurs applications (décret, arrêté, circulaire). Ils sont élaborés par les services de l'État. Ils sont contenus dans le Code de la construction et de l'habitation (CCH) avec des réglementations techniques (acoustique, incendie, sismique, thermique, accessibilité) et le Code du travail. Dans ce cadre, la terre-cruie est soumise aux mêmes contraintes que les autres matériaux. Très bonne acousticienne, elle résiste également très bien au feu. En revanche, elle se confronte aux exigences de la RT 2012 actuelle puisqu'elle n'est pas isolante.

La résolution de ce problème est en bonne voie avec la promesse des nouvelles réglementations thermiques plus évoluées qui prendront en compte l'énergie grise et la capacité de changement de phase, points pour lesquelles la terre crue excelle.

* Cahier Pratique du Moniteur n°5664, «Normes», juin 2012, consultable sur www.lemoniteur.fr

* "Il est nécessaire de distinguer les textes qui relèvent du domaine réglementaire de ceux qui relèvent du domaine contractuel", extrait de la gazette d'ARESO n°47, article rédigé par l'association *Le Village*, disponible sur www.areso.asso.fr

Les normes c'est une tout autre chose... C'est dans ce domaine contractuel que sont rassemblés ce qu'on appelle «les règles de l'art»: DTU, Avis techniques, Règles professionnelles, Atex, etc. Si elles ne sont pas obligatoires, ce sont néanmoins celles-ci qui nous intéressent quand on parle de «manque de référentiel technique», pour reprendre les mots d'Elvire Leylavergne citée en partie 1. En effet, ces documents permettent "de définir un langage commun entre les acteurs économiques, producteurs, utilisateurs et consommateurs. Elle clarifie, harmonise les pratiques et définit le niveau de qualité, de sécurité, de compatibilité, de moindre impact environnemental des produits, services et pratiques. Une norme facilite les échanges commerciaux, tant nationaux qu'internationaux et contribue à mieux structurer l'économie et à faciliter la vie quotidienne de chacun."* Ce discours est nécessairement élogieux puisque ce sont les paroles d'Afnor, l'Association française de normalisation.

En clair, elles sont la base d'une entente entre tous les partis du cycle de construction: le maître d'ouvrage, les maîtres d'œuvre, les bureaux de contrôle,... et les assureurs. Et oui ! S'il y a bien quelque chose à retenir c'est que «la seule» obligation pour construire vraiment embêtante, est de devoir assurer son bâtiment. C'est-à-dire que l'architecte puis l'entrepreneur puis le bureau d'études et autres, souscrivent à une assurance spécifique qui peut refuser le dossier si elle l'estime trop risqué. C'est le point sur lequel tous les acteurs de la filière s'accordent : la difficulté pour convaincre les assureurs est le véritable frein à l'édification de bâtiments terre-crue et donc au développement de son usage.

C'est pourquoi, cet effort est né : il faut établir des règles de l'art entendues par chaque parti pour rassurer les assureurs mais aussi maître d'ouvrage, contrôleur, ingénieur, architecte...

En réalité, même si c'est un cas minoritaire, quelques normes sont obligatoires ou le deviennent : citée par une réglementation par exemple, elle devient imposée. C'est le cas des commandes publiques. La législation impose aux différents acteurs du projets de respecter le CCTP ou CCTG qui lui, peut faire référence à certaines normes qui devront alors être respectées.

* disponible sur le site officiel www.normalisation.afnor.org

LE REEF ET LE CSTB

Le REEF est une base de données proposée par le CSTB qui rassemble tous les documents relatifs à la législation constructive. Sa création va de paire avec celle du CSTB en 1947, même si sa forme formelle en version numérique accessible sur le net se met en place en 1991.

Cet outils développé pour les professionnels de la construction recueille quatre types de documents : les textes législatifs et réglementaires (codes, lois, ordonnances, décrets,...), les Documents Techniques Unifiés (DTU), les normes françaises et européenne, et les textes techniques (documents généraux d'Avis Techniques, Cahiers des Prescriptions Techniques CPT, guides, certifications,...).

HUBERT GUILLAUD

La normalisation de la terre-crue expliquée par Hubert Guillaud, directeur du laboratoire CRAterre.

Hubert Guillaud m'envoie un article par mail, qu'il publie en 2005 intitulé «les normes et recommandation», dans *l'Encyclopédie du bâtiment*. Dans son message, il m'informe que bien que cet article soit un peu daté, il reste d'actualité puisque les normes françaises n'ont pas évolué depuis. En revanche, à l'international des efforts sont faits comme la très récente réglementation parasismique du Pérou. L'article met très bien en lumière le retard de la France face aux normalisations étrangères.

Alors qu'en France la codification de la construction terre-crue reste d'ordre exceptionnel pour des bâtiments historiques, d'autres pays ont vu des occasions d'ébaucher ce travail pendant les périodes de crise telles que la Reconstruction, ou la crise pétrolière des années 1970, ou encore pour les pays en développement suite à une catastrophe naturelle ou politique où le besoin d'autarcie, de vernaculaire et de local se fait sentir.

Il y a deux manières d'aborder la normalisation de la terre crue. D'une part un matériau peut être dit «traditionnel» c'est-à-dire que même si ses techniques «traditionnelles» ne sont pas codifiées, elles sont acceptées. Elles sont connues, on sait prévoir leurs comportements, les aléas, que ce soit pour les modes d'assemblages ou les modes de mise en œuvre voire de conception.

D'autre part, si l'utilisation du matériau est non-traditionnelle donc «innovante», il va falloir un référentiel tel un bâtiment, preuve que la chose est possible. Le Conservatoire de sols à Orléans (fig.35 page suivante) a été conçu à cet effet. Les architectes NAMA ont voulu utiliser la technique du pisé porteur même si ce n'était pas la pratique coutumière de cette région : ils voulaient profiter de cette commande pour démontrer de la viabilité de la terre-crue.

Dans cette logique, on peut imaginer-qu'à long terme- le simple fait de construire de plus en plus de bâtiments en terre suffira à convaincre les contrôleurs/assureurs.

* article «Normes et Recommandations» par Hubert Guillaud, 2005, publié dans *l'Encyclopédie du Bâtiment*, éd. Weka

Selon Hubert Guillaud, il faut également différencier les «normes de moyens» et les «normes de résultats». Une norme de moyen peut malheureusement figer la technique et empêcher l'innovation. Une norme de résultat peut quant-à-elle être trop exigeante et donc favoriser les matériaux à forte résistance par exemple. Il faudra adapter soigneusement ces attentes aux usagers et à la typologie du bâti. L'institut ISO s'exprime dans ce sens : "les Normes internationales de construction doivent encore tenir compte des différentes conditions climatiques ou régionales, notamment de l'expertise disponible et des différents stades de développement techniques et économiques."*

Dans le schéma courant, la norme est à l'initiative de l'industriel. "Le but d'une norme est avant tout commercial."*

Hubert Guillaud dit : "le but d'une norme est avant tout commercial". Il faut qu'elle soit cohérente techniquement et surtout économiquement pour l'entrepreneur et l'artisan qui diffuseront cette technologie.

En cela, il donne son avis "La priorité devra sûrement s'axer sur les équipements de production des matériaux de construction, la mise en œuvre proprement dite des matériaux de construction en terre se rapprochant davantage de celle d'autres matériaux."* Par rapport

* propos de l'institution ISO cité par H. Guillaud dans son article «Normes et recommandations», 2005

* Hubert Guillaud, même article, p.4

* id

Fig.35 : Conservatoire des sols NAMA Architecture



CEES - QUALIFORSOL

au chapitre précédent, on se demande quel scénario a-t-il en tête lorsqu'il parle de «production» concernant le matériau terre.

L'élaboration d'une norme peut être demandée par "tout acteur économique"*. Le processus est le suivant, il nous permet de mieux comprendre les enjeux et les acteurs qui interviennent dans la normalisation.

La première étape est de définir l'intérêt de la norme en question, car rappelons qu'elle doit servir au bien commun; le but n'est pas de normer pour normer mais de répondre à un besoin. Le questionnement est riche et très important selon Hubert Guillaud :

"Quels sont les buts et raisons de l'effort de normalisation ? Ainsi, la norme doit elle par exemple favoriser le commerce international et national ? Doit-elle protéger les consommateurs ? Doit-elle assurer les interfaces, l'interchangeabilité ou la compatibilité ? Doit-elle améliorer la santé et la sécurité ? Doit-elle protéger l'environnement ? [...] Les effets de la norme vont-ils par exemple restreindre ou encourager la concurrence ou de nouvelles technologies ? Vont-ils augmenter ou réduire les options des utilisateurs ? Vont-ils bénéficier au commerce et aux intérêts concernés ou au contraire avoir des effets négatifs (par exemple, en augmentant les coûts de production afin d'améliorer la sécurité) ? Quelle est la durée de la normalisation ? Est-il possible que le délai de normalisation, selon les dates fixées, soit justifié en prenant en compte l'amélioration espérée pour la technologie concernée ? [...] Quelles sont les collaborations et les coopérations nécessaires avec d'autres groupes ou organismes ? Existe-t-il des normes et autres documents significatifs, notamment au plan de normes internationales ou régionales dans le domaine concerné ?"*

Une fois la faisabilité et les finalités de la norme établies ont l'envoi à la liste d'attente du programme national de normalisation. L'avant-projet sera attribué à un bureau de normalisation qui composera la Commission de Normalisation (CN) ou le Comité Technique (CT). Ces groupes de discussions se constituent d'une pluralité d'acteurs pour un point de vue omniscient et le plus juste possible. C'est l'étape de l'élaboration de la norme. Puis, le bureau rédige et rend public ce consensus trouvé, c'est l'heure de «l'enquête publique», soit la consultation ouverte à tous pour entendre les différents commentaires, suggestions, critiques.

Enfin le projet est soumis à la validation de l'institut de normalisation,

* Cahier Pratique du Moniteur n°5664, «Normes», juin 2012, consultable sur www.lemoniteur.fr

* Hubert Guillaud, même article, p.3

c'est l'homologation. En France, cet organisme national de normalisation (ONN) est l'AFNOR. Le texte est rédigé dans les formes et publié.

L'histoire de la normalisation de la construction terre crue est brève.

Dans son article sur la normalisation de la terre crue, Hubert Guillaud retrace une brève histoire de l'intérêt porté à la construction terre au niveau international.

“La construction en terre a commencé à décliner au cours du 20ème siècle. Ce déclin s'est affirmé après la seconde guerre mondiale dans les pays industrialisés avec une poussée sans précédent de l'industrie de la construction qui imposait une grande diminution de l'appel aux techniques traditionnelles.” C'est ce que nous avons pu constater avec notre étude de la filière béton.

Puis avec la crise pétrolière des années 1970 et la crise économique qui sévit dans les décennies suivantes, ce désintérêt bascule et l'engouement reprend. Les pays en voie de développement qui prenaient en modèle les pays industrialisés, voient l'importance d'une indépendance et retournent à la construction traditionnelle, d'autant qu'avec les décolonisations et la « crise de la modernité », ils n'ont pas beaucoup d'argent à investir dans l'industrie du bâtiment.

Puis à la fin de ce 20e siècle, on s'inquiète davantage de la crise écologique et du climat social. “On assiste donc depuis la fin des années 1980 à un véritable retour de la construction en terre, qui de ce fait occupe de plus en plus d'acteurs, tant privés que publics qui ont besoin de textes techniques de référence.”

Ce regain d'intérêt est le plus flagrant dans les pays d'Europe septentrionale comme l'Allemagne ou les Pays-Bas. Dans ces pays, il a d'abord touché les milieux soucieux de l'écologie puis s'est répandus au monde des professionnels avec les entreprises, les maîtres d'œuvre, d'ouvrage public pour la restauration du patrimoine...

Quant à l'Histoire des textes normatifs relatifs à la terre on peut dire qu'ils furent inexistant jusqu'à aujourd'hui, où “plusieurs pays ont des normes officielles en cours d'élaboration ou en disposent déjà : l'Afrique du Sud, l'Algérie, l'Allemagne, l'Australie, le Burkina Faso, le Cameroun, la Côte d'Ivoire, l'Éthiopie, la France, le Ghana, l'Inde, le Kenya, Madagascar, le Mali, la Moldavie, le Maroc, la Nouvelle Zélande, Le Nigeria, le Pérou, la Suisse, le Tchad, le Togo, la Tunisie, la Turquie, les USA, le Zimbabwe.”

Si cette histoire de norme est très brève, on peut tout de même noter qu'en France, à la fin de la Seconde Guerre Mondiale, même si l'attention est exclusivement portée sur le béton, le Ministère de la Reconstruction et de l'Urbanisme de l'époque s'intéresse à la valorisation du patrimoine en terre et encourage les projets expérimentaux. Ces expériences mènent à la publication de trois textes les DTC 2001, 2101 et 2102, publiés en 1945 au REEF (Recueil des éléments utiles à l'Établissement et à l'Exécution des projets et marchés de bâtiment en France). Ces documents restent très généraux et pauvres de connaissances, ils n'ont pas été amendés ou remaniés par la suite.

En revanche, le regain d'intérêt des années 1970 donne lieu, en France, à une nouvelle volonté de codifier les constructions terre crue par le travail des laboratoires scientifiques et d'architecture. La première publication apparaît en 1979 « *Construire en Terre* » par le laboratoire

de l'Ensa Grenoble, CRATerre et sera plusieurs fois rééditée dans les années 80.

1979 est la date de création de cette association et laboratoire de recherche. A cette époque, CRATerre se fixe trois objectifs :

- “-promouvoir la prise en charge des problèmes d'aménagement de l'espace par les collectivités locales,
- améliorer les conditions d'habitat des populations les plus défavorisées,
- favoriser la production et le contrôle par l'utilisateur de son propre cadre de vie.”*

On ressent l'envie d'encourager la prise de décision à l'échelle locale, lorsque l'écriture du paysage architectural se fait par les habitants et les collectivités de la région, sans doute en réponse à l'interventionnisme d'Etat qui planifie la Reconstruction et les grands projets d'aménagement pour l'ensemble du territoire national (cf partie 1.1). D'autre part, le deuxième objectif démontre le souci de viabilité économique, qui fût donc l'un des tous premiers atouts associés à la construction terre. Aujourd'hui, sur la page d'accueil du site officiel de CRATerre les objectifs qu'ils poursuivent sont les suivants:

- “-mieux utiliser les ressources locales, humaines et naturelles,
- améliorer l'habitat et les conditions de vie,
- valoriser la diversité culturelle.”*

Peu d'années après, entre 1983 et 1985 c'est l'édification du Domaine de la Terre à l'Isle d'Abeau, un projet phare, auquel on se réfère encore très largement lorsque l'on parle de terre crue. A l'occasion de ce « projet pilote », CRATerre rédige les « Recommandations pour la conception des bâtiments du Village Terre ». En découle, la réalisation de plusieurs recherches appuyées par le CSTB. Ces efforts donnent lieu au texte de référence « *Traité de Construction en Terre* » de 1989. Ces ouvrages forment un fond de documentation important, de bons outils de travail pour le concepteur ou le constructeur, qui selon Hubert Guillaud pourrait bien être la base d'une rédaction aux “codes de bonne pratique et de règles de l'art ayant valeur normative au plan national et qui ferait sans aucun doute référence au plan international.”

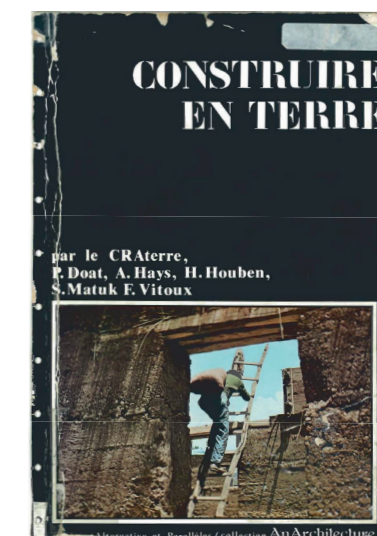


Fig.36 : Couverture de « construire en terre », première publication de CRATerre en 1979

* « *Construire en terre* », p264, éd. Paris : Alternative et parallèles 1979

* site officiel de CRATerre <http://craterre.org/>

A ce jour, c'est la norme sur les BTC à Mayotte qui offre la forme normative la plus aboutie dans le contexte français (département d'outre-mer depuis 2000).

L'association CRAterre est constamment présente sur la scène internationale qui tente de normaliser la construction terre.

A l'échelle internationale, l'envie de normaliser se formalise par la création d'un comité, le RIMEL/ CIB TC 96 EB/WC 90 «*Technologie de la Terre pour la Construction*», présidé par CRAterre, soit un organisme français dépendant de l'Ensa Grenoble.

RIMEL et CIB sont des assemblées de la scène internationale, respectivement : la Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions (RIMEL) et le Conseil International du Bâtiment pour la Recherche et la Documentation (CIB).

Ce comité s'organise en cinq sous-structures pour cinq géographies: un comité Amérique latine sous la direction du «Centro de Investigaciones de Ingenieria» du Guatemala, un comité Asie-Pacifique sous la direction du «Central Building Research Institute» d'Inde, un comité Afrique anglophone sous la direction du «Building and Road Research Institute» du Ghana, un comité Afrique francophone, sous la direction du Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics de Côte d'Ivoire, et enfin un comité Europe sous la direction du CRAterre. Ces cinq groupes se font aidé par des organisations renommées telles que la branche des Nations Unies pour l'habitat ou le «British Research Establishment»

ou encore le «Commonwealth Science Council» de Londres. Récemment, ce travail a abouti à la publication de normes pour l'Afrique : normes ORAN (Organisation Régionale Africaine de Normalisation).

Si ce travail de mémoire focalise ses recherches sur la filière française, il n'en reste pas moins pertinent de remarquer l'effort actuel des acteurs internationaux pour lequel l'association francophone CRAterre joue un rôle important. De plus, les axes d'études de ces comités internationaux aident à comprendre les constituants d'un cadre normatif :

- l'établissement d'une nomenclature et d'un vocabulaire multilingue normalisé, l'organisation des banques de données, la constitution d'une «veille» technologique, l'inventaire des compétences et des activités;
- l'établissement de lignes directrices de la recherche à venir;
- la codification des règles de l'art et de bonnes pratiques;
- la rédaction de normes et standards, de cahiers des charges standardisés;
- les procédures d'essais et de caractérisation.**

Pour sauvegarder la liberté de mise-en-œuvre des artisans, une démarche performantielle est préférable.

H. Guillaud nous aide à y voir plus clair sur les mesures à prendre pour normaliser la construction terre. Premièrement, s'il l'on affirme que les règles de l'Art sont «traditionnelles», donc acceptables et viables comme nous l'avons déjà vu, il faut pouvoir les écrire. C'est savoir décrire les pratiques, les performances et les solutions,

en se basant sur le bâti déjà construit utilisé comme le témoin d'une construction saine et pérenne.

Deuxièmement, il faut favoriser une codification «performantielle» et non de «moyen». En somme, le concepteur et le constructeur décident eux-même de la manière de faire pour arriver à un résultat imposé, normé. Le rôle de la maîtrise d'œuvre est plus libre mais plus complexe.

Il décrit alors une approche performantielle sous la forme d'une pyramide (fig.37 ci-dessous).

La pointe de la pyramide est l'objectif global de la performance.

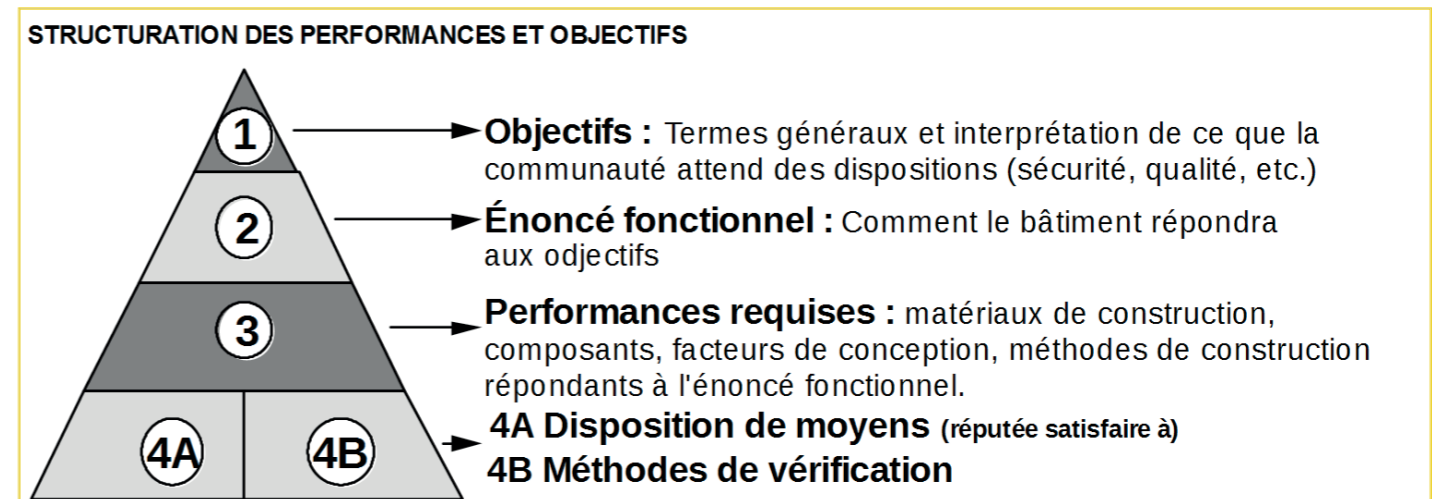
La strate 2 d'en-dessous correspond à cet objectif décliné pour le bâtiment en question. Par exemple, en 1 j'ai «sécurité» et en 2 j'ai «mon bâtiment résistera au feu, aux secousses sismiques, et ne s'écroulera pas».

Pour satisfaire ces résultats demandés à mon bâtiment, je dois respecter une série de tests qui correspondent à la strate n°3, les «performances requises» («matériaux de construction, composants, facteurs de conception»). Par exemple, on peut imaginer que pour mon matériau de construction porteur, il doit tenir à une compression de x mégapascals. Ou encore, comme facteur de conception, je dois démontrer que l'avancée de toit que j'ai dessiné permet de protéger mon mur pisé de l'eau. Ce qu'il nomme «performances requises» sont pour lui des résultats factuels qui sont quantifiables : on peut connaître le comportement associé à tel ou tel état physique.

Enfin, en base de cette pyramide j'ai deux manières de garantir mon

* H. Guillaud même article p.6

Fig. 37 : Principe de déclinaison des performances d'Hubert Guillaud, source article «Normes et Recommandations»



respect de ces tests : soit par des moyens de mise-en-œuvre reconnus viables, soit par des tests chantier (telle mon éprouvette 16-32 qui résiste à tant de mégapascals). Ainsi, en strate n°3 j'aurais «le mur pisé ne peut excéder 10% d'humidité», et en strate n°4 un test reconnu me permettra d'évaluer le taux d'humidité de mon mur.

Cette hiérarchisation des performances devra concerner chaque étape de la filière, de l'extraction à l'édification.

Il imagine un système de normalisation (fig.N ci-dessous) pour la totalité du cycle de la construction terre comme un tableau à double-entrée, si l'on peut l'imager ainsi.

Chaque étape (extraction, transformation, manufacture, assemblage, mise-en-œuvre, etc) devra répondre à des exigences spécifiques soit une série de normes (d'essais, de produits, ou peu importe). C'est ce qu'il appelle «une lecture horizontale». Puis, les contres-rendu de chacun

des stades de la filière seront comparés, pour être pondérés selon cette hiérarchie performantielle, c'est «la lecture verticale».

Le cycle de la construction terre qu'il imagine est très détaillé comme si la chaîne de production devait être fractionnée pour une description et un contrôle plus rigoureux (fig.9 ci-contre).

Par exemple, pour atteindre sa case «matériau» il nomme déjà quatre étapes préalables: «carrière», «extraction», «matière première», «transformation».

Avec ce qu'on a vu précédemment sur l'industrialisation, doit-on comprendre que la terre ne peut provenir que d'un fournisseur «reconnu» comme nos briquetiers (ou carrier)? Est-ce que ce schéma que propose Hubert Guillaud évince la possibilité d'extraire la terre sur le site de projet ou encore d'utiliser les terres excavées que nous fournit le terrassier ?

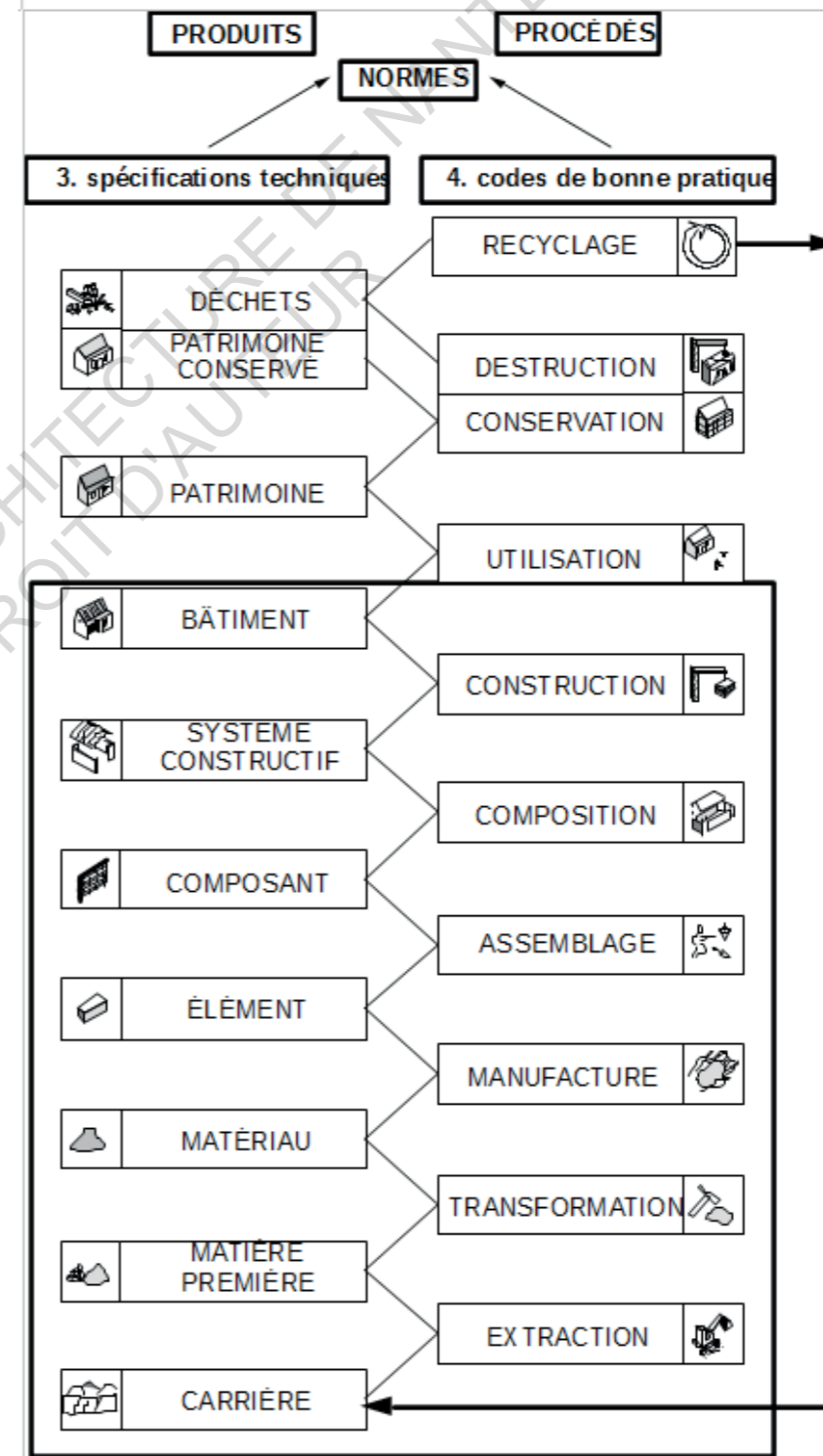
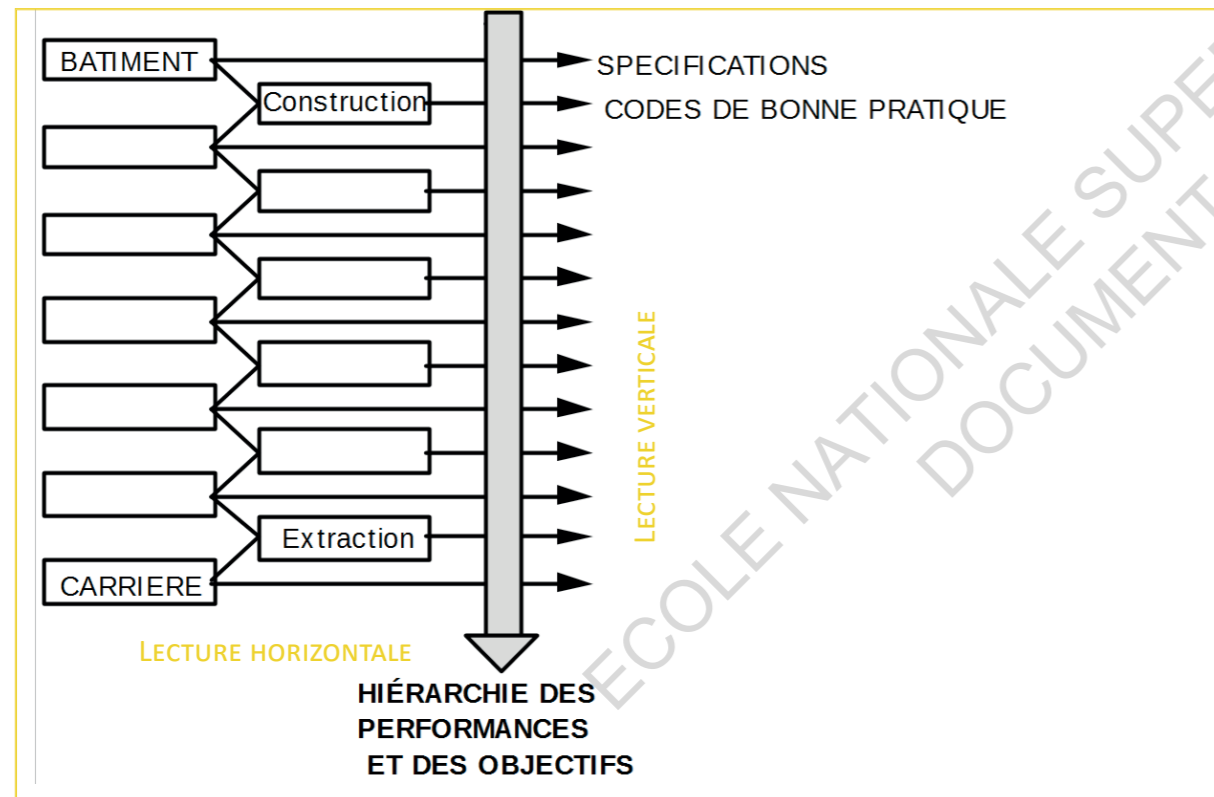


Fig. 38 à gauche: Schéma principe de normalisation de la filière d'Hubert Guillaud, source : article «Normes et Recommandations» p.6

Fig. 39 à droite : "Diagramme complet du cycle de production" de la terre crue d'après Hubert Guillaud, source : id.

Par ces derniers paragraphes, nous venons de voir comment un architecte peut prendre part à l'élaboration d'un cadre réglementaire. Dans ce cas, Hubert Guillaud théorise la filière terre, une vision de voir la chose sous un angle hiérarchique où chaque étape du cycle constructif est distinguée pour clarifier le rôle des acteurs et contrôler leurs tâches.

ERWAN HAMARD

La communauté scientifique participe à la normalisation d'une filière. Le travail d'Erwan Hamard au laboratoire de l'IFSTTAR en révèle les enjeux.

Erwan Hamard est ingénieur génie-civil, autrefois membre du laboratoire de l'ENTPE dédié à la terre-crue.

Aujourd'hui, il rédige une thèse à l'IFSTTAR de Nantes encadrée par Jean-Claude Morel, ingénieur et chercheur à l'ENTPE à Lyon. Je suis allée le rencontrer en mars 2017 à l'école de Bouguenais (44), au département « *Granulats et procédés d'élaboration des matériaux* ».

Il s'accorde avec Hubert Guillaud sur la nécessité d'une démarche performantielle mais sa méthodologie n'est la même. L'architecte H. Guillaud adoptait un point de vue large, l'échelle « macroscopique » concernait l'organisation de la filière. Erwan Hamard, ingénieur-chercheur, opte pour une démarche scientifique de connaissances de la matière. La finalité de ce travail est de proposer un test chantier concernant la bauge en Bretagne. Pour faire le lien avec la théorie d'Ugèr Guillaud, on peut dire que ce test

chantier correspond à la base de la pyramide des performances vue précédemment (fig.37 p.121).

Comme nous l'avons vu en partie 1, il y a un manque important de connaissances scientifiques de la matière. Il n'existe pas de modélisation de système pour calculer les structures ou simplement prévoir le comportement de notre mise-en-œuvre. Actuellement, seuls les maçons expérimentés peuvent faire ces prévisions. Mais encore une fois, ils ne peuvent pas les démontrer, c'est au « feeling » sans preuve à l'appui. C'est pourquoi la communauté scientifique joue un rôle important dans le développement de la filière afin de mettre des mots sur ce savoir.

Erwan Hamard s'entend avec Hubert Guillaud sur la nécessité d'une démarche performantielle. Cette réponse réglementaire à trouver concerne tous les acteurs de la filière, c'est ce qui les lie, du maçon en chantier d'autoconstruction à l'entreprise Cematerre (terre coulée stabilisée au ciment en Normandie). "Donc ensemble, on pourra affronter ce problème-là en essayant d'apporter les bonnes réponses pour avoir des règles de dimensionnement qui soient validées par les bureaux d'études ou de contrôle, un calcul thermique qui soit réaliste, des essais de résistance au feu, des essais sur le chantier pour permettre de valider les performances ... Toutes ces choses là qui manquent aujourd'hui. Il y a déjà des petites brides de trucs un peu partout, mais il manque encore un peu de recherche pour arriver à quelque chose de cohérent et de global pour apporter une bonne réponse."*

Pour lui, ce mouvement d'ensemble sera donné par la rédaction des *codes de bonnes pratiques* que nous développerons en partie suivante avec l'aventure de Stéphane Forge à TERA. C'est dans ces documents que les tests-chantier reconnus viables devront être rassemblés. Il fait lui-même

parti de l'association des Terreux Armoricaïns qui rédigent les codes pour la bauge en Bretagne. Il précise néanmoins que les résultats de sa propre thèse sur l'évaluation de la résistance d'un mur bauge ne pourront être intégrés à la première version du *code de bonnes pratiques* car les agendas ne coïncident pas.

Avant d'expliquer la démarche de sa thèse, j'aimerais relater une partie de son discours qui exprime très bien les raisonnements mis-en-jeu entre le rôle de la maîtrise d'œuvre et la démarche performantielle. Ce propos est volontairement laissé brut, retranscription d'un oral en langage parlé...

"En fait on ne peut pas passer par une certification. La certification est la fiche technique produit. Exemple : quand Point P livre le béton sur ton chantier, il te donne une fiche technique produit qui indique la résistance du béton, sa composition, etc. Point P s'engage réglementairement à te fournir un matériau qui une fois mis-en-œuvre aura une résistance mécanique de tant mégapascals. Ainsi, en cas de dommage, on pourra retracer si le problème vient du béton livré par Point P ou non et définir un responsable. Là concrètement, faire la certification, faire de la norme produit, ça veut dire qu'il faut trouver des gens, notamment des terrassiers qui disent : moi je vous livre cinq camions de terre, de la terre de ce chantier-là, vous allez pouvoir faire des BTC avec, qui vont tenir à tant de mégapascals, qui ne vont pas avoir de problème d'érosion, qui sous sollicitation sismique vont tenir aussi. On ne trouvera pas de terrassier, personne ne fera ça. Ils vont bien fournir le matériau mais ils ne pourront pas s'engager sur les performances. Il est variable ce matériau et à chaque fois il faut faire des essais. Donc c'est bien au maître d'œuvre, de garantir une performance et ce n'est pas au fournisseur de matériaux. C'est là qu'il y a une grande différence, c'est là qu'il y a une grande nuance. Et c'est en ça que le côté normatif va être différent. Ce qu'on peut imaginer, nous on travaille la-dessus : c'est les normes pour valider la performance des ouvrages. Il faut définir des essais de chantier qui permettent de dire : je prends mes éprouvettes-comme le béton- c'est un article qu'on est en train de rédiger- je les teste, et je suis capable de dire la résistance de mon mur c'est tant, le module d'élasticité c'est tant..."

[...] L'idée de la démarche performantielle c'est de dire : le maçon il prend le matériau qu'il veut, il fait la mise-en-œuvre qu'il veut, ça le regarde, il fait la formulation qu'il veut, ce n'est pas un problème

"C'est bien au maître d'œuvre, de garantir une performance et ce n'est pas au fournisseur de matériaux. C'est là qu'il y a une grande différence, c'est là qu'il y a une grande nuance. Et c'est en ça que le côté normatif va être différent." EH.

* toutes les citations de cette sous-partie sont tirées de l'enregistrement audio de mon entretien avec Erwan Hamard en mars 2017.

il est Libre ; par contre on fait des échantillons et on vérifie que ce qu'il a fait résiste bien à une résistance minimale, acceptable pour le matériau. Donc il y a l'érosion, l'abrasion, la résistance mécanique, la thermique, tout ça. Mais tout ça on peut le développer à partir d'essai de chantier. Donc l'idée de la normalisation, c'est plutôt de normaliser des essais de chantier qui permettent de valider les performances, plutôt que de normaliser des matériaux parce que si on va sur la normalisation des matériaux on va finir par avoir la même chose que pour le béton, c'est-à-dire un gisement quelque part, enfin quelques gisements en France, avec plein de terre qui est sortie puis mise en œuvre, qui arrive par toupies, pour le coup on arrête tout. Parcequ'on ne va pas avoir des matériaux... ils vont pas être performants, ils vont être aussi impactant que le béton. Donc autant faire du béton. La terre s'oppose pas au béton, c'est complémentaire !"

Alors, comment si prend-t-on pour élaborer un test-chantier viable en se référant à un savoir-faire artisanal et non scientifique, perdu? C'est la démarche qu'il m'explique...

La démarche d'Erwan Hamard pour élaborer un test-chantier

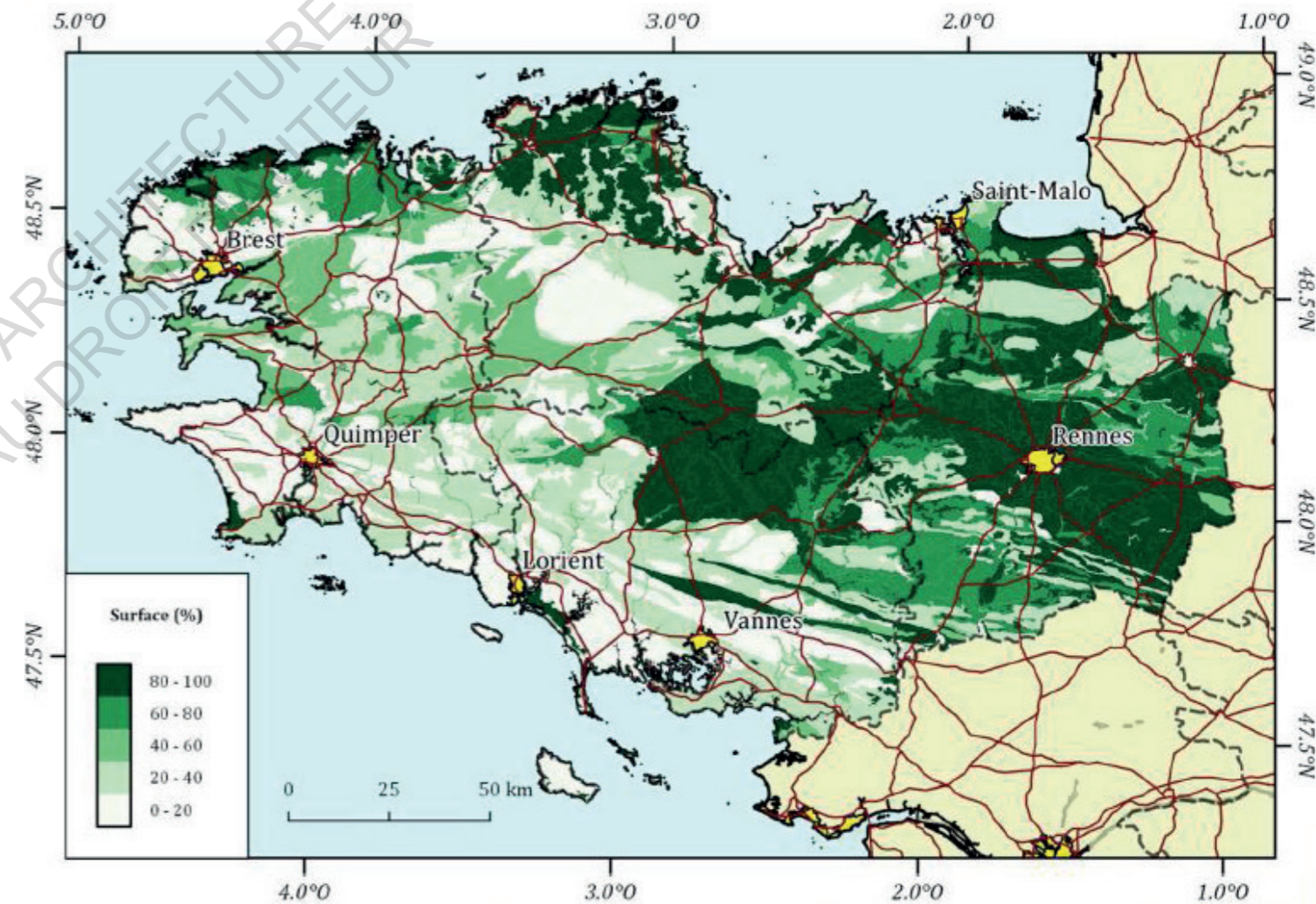
Sa méthode est d'étudier la technique bauge, du début à la fin. A chaque étape, on définit les paramètres d'influence. Quand la matière devra être améliorée, on sera capable de préciser à quelle étape de la chaîne de construction et sur quel paramètre il faudra intervenir. Son but est d'optimiser la technique bauge, l'analyser et l'améliorer, peut-être la moderniser, si un besoin a été identifié. Le sujet de la thèse est de "redécouvrir des techniques traditionnelles".

La première étape du raisonnement a été de quantifier la ressource.

Pour se faire, deux cartes ont été superposées. L'une «la carte des sols de Bretagne» étudie la nature des terres, c'est de la pédologie, élaborée avec l'INRA de Rennes. L'autre est l'inventaire du bâti en bauge existant, élaborée d'après les données du patrimoine de la région Bretagne qui relatent plus de 7000 bâtiments. C'est un échantillon pour des calculs statistiques.

On compare alors les zones de constructions bauge aux natures du sol en dessous. : s'il y a beaucoup de patrimoine bâti sur un sol, c'est

Fig.40: carte répartition du bâti en Bretagne www.ifsttar.com



que ce sol est bel et bien adapté à la technique de mise-en-oeuvre. On fait le ratio entre la quantité de terre globale et cette pré-sélection. On conclut que 23% des sols sont des «terres à bauge». Une sélection se fait.

La deuxième étape sera d'étudier cet échantillon de terres éligibles à la bauge pour distinguer des caractéristiques communes. Parallèlement, une enquête est menée au près des praticiens bretons: devant deux ou trois sortes de terre, ils devront choisir laquelle est appropriée à la bauge selon eux. De même, on obtient un échantillon et on tente de révéler les paramètres qui permettent de dire si la matière est «une bonne terre à bauge».

L'une des finalités de l'étude est de caractériser les terres excavées car elles représentent une très grande quantité de matière. En ces termes, Erwan Hamard évoque le Grand Paris sans être au courant de l'appel à projet actuel. Au delà de ce cas qui reste exceptionnel, tous les chantiers excavent des terres. Elles sont soit réutilisées sur site (pour un tiers), soit envoyées dans des carrières, soit stockées dans des centres spécifiques pour le matériau terre. En appliquant le facteur obtenu de 23% au volume annuel des terres excavées bretonnes, on se rend compte que ces «déchets de chantier» pourraient permettre de construire la moitié des logements en Bretagne tous les ans. Ce qui montre la grande quantité de ressource disponible.

Pour E. Hamard la finalité est claire : "C'est cette terre là qu'il faut valoriser ! Et pour valoriser ces terres, c'est des terres naturelles, il faut s'adapter à ces terres, parce qu'elles sont déjà disponibles. Il ne s'agit pas d'aller ouvrir des carrières en plus pour aller extraire la terre dont on a besoin pour développer une filière industrielle. Il s'agit d'utiliser cette terre-là et de l'utiliser au mieux. Avec une filière pourquoi pas... Enfin le

problème c'est qu'on n'a pas UN gisement, on a DES gisements un peu partout sur le territoire et donc il faut réfléchir à la mise à disposition de ce matériau. Mais les gisements sont répartis un peu partout, ils sont plutôt proches des endroits où les gens vivent parce que c'est là qu'on construit, donc ça tombe plutôt bien."

Dans cette optique, ils sont allés sur un chantier à Guérande où les terres excavées vont être mises de côté pour qu'ils puissent les étudier. Ainsi, ils vont trier, séparer les 'bonnes terres' des autres. Son intérêt se porte donc sur la caractérisation des terres : quels paramètres entre en compte dans l'identification de la terre et la rendent éligible à telle ou telle technique de construction.

Beaucoup, en revanche, pensent devoir inventer une solution constructive. Selon Erwan, ce n'est pas le bon point de départ, on a déjà ces solutions. Pour lui, ces innovations ont eut lieu au cours de ces 10 000 ans d'utilisation de la terre crue dans le Monde. Il serait donc difficile d'inventer quelque chose de nouveau.

C'est pourquoi il propose une étude archéologique afin de redécouvrir le génie de nos anciens que nous avons oublié lors du siècle passé consacré au béton. Il mène l'enquête en association avec une archéologue pour ne pas "repartir à zéro et perdre son énergie à inventer quelque chose qui n'est sans doute pas nouveau ailleurs" mais pour rétablir le savoir que nous avons sur la terre-crue. "L'innovation dont on peut faire preuve aujourd'hui se porte sur la mécanisation, les machines."

Le savoir-faire perdu fait l'objet d'une étude archéologique puisqu'aucun document écrit n'existe. Erwan travaille avec des pédologues, des géotechniciens, une archéologue pour trouver -par l'étude du patrimoine bâti- quelle a été la mise-en-oeuvre, quelle terre fut utilisée, quels

outils ont été utilisés, quel est le bilan de résistance mécanique correspondant ?

La mise-en-oeuvre sous-entend des outils mais aussi une logique constructive : la bauge est l'assemblage de mottes, ces mottes peuvent être fibrées, toutes ou une sur deux, elles peuvent être moulées, elles peuvent être en forme de triangle, de rondin, de boules, disposées en quinconce, elles contiennent plus ou moins de cailloux, etc, etc.

Prenons l'exemple de l'adobe au Pérou, les habitants construisent eux-même leur maison selon la méthode inca : les briques ne sont pas de forme carrée mais de diverses géométries pour résister aux séismes. Le contact entre les éléments est augmenté: en cas de secousse sismique les forces de frottement entre les briques dissipent l'énergie.

La construction en bauge date d'il y a plus de 4000 ans, elle est très utilisée en France. Depuis, les hommes ont optimisé leur manière de construire en fonction de leurs outils, de leurs besoins, du climat, de la terre et ressources disponibles. Ce sont les paramètres. Dans l'étude archéologique il faut mener l'enquête : est-ce que le biseau de cette motte est due au hasard (un projectile venue d'une roue de charrue) ou fut-il souhaité par le constructeur pour contrer l'érosion, témoigne-t-il de l'utilisation d'un outil tranchant, etc.

L'histoire de la bauge existe. Durant tous ces siècles, il n'y pas eut une technique bauge mais des dizaines développées pour répondre à des contraintes. A ce jour, ce serait une perte de temps et de moyens de repartir de zéro, il faut repartir à la conquête du génie humain passé par l'étude de l'histoire de ces procédés, capitaliser le savoir oublié.

Une de ces méthodes est de demander à un maçon de sélectionner selon son expérience, trois terres idéales pour la bauge. Erwan étudie cette sélection, il révèle les points communs, il teste la terre et rentre ses résultats dans la grille performantielle qu'il élabore pour évaluer la cohérence de son travail. De même, les types de terre non-sélectionnés par le maçons doivent être analysés, on définit des données, on choisit des paramètres qui nous paraissent influents c'est-à-dire caractéristiques de la matière.

On a des essais de retrait par exemple. Aujourd'hui celui qui manque absolument et qu'on n'arrive pas à définir est celui de l'érosion à l'eau.

Sa thèse permet donc avant tout de capitaliser le savoir sur la bauge

en interrogeant les praticiens (maçon) et en analysant leurs dires avec des méthodes scientifiques davantage de l'ordre de la statistique que de la mécanique. C'est un travail préalable à l'élaboration des tests-chantier appliqués à la technique bauge.

En effet, les paramètres qu'il aura relevé permettant de caractériser «une bonne terre à bauge» vont être introduite dans un tableau, outil d'évaluation. C'est le travail du laboratoire terre-cru de l'IFSTTAR.

Les résultats ne sont pas encore publiés et les explications d'Erwan Hamard restent floues : "En fait, la résistance mécanique d'une éprouvette c'est pas celle du mur. Par contre on a trouvé un truc qui permet de dire : bon ben on trace telle droite et on mesure la densité du mur, et on pourra penser que la résistance mécanique va être celle-là, le module va être celui-là."

Si j'ai bien compris, chaque terre aurait «sa droite». Les paramètres dégagés lors de la thèse forment les abscisses et les ordonnées. Le maçon mesure les valeurs de sa terre sur une petite quantité en éprouvette 16x32 par exemple. Puis, il compare ces résultats à la courbe modèle que propose l'IFSTTAR qui lui permet d'estimer la résistance de son ouvrage total.

Le statut de ces recherches :

L'expérience du laboratoire s'appuie sur une seule terre. Elle ne peut donc pas être viable dès maintenant, l'échantillon est trop petit pour se prononcer sur une généralité. Mais Erwan Hamard reste confiant pour lui ce n'est qu'un début, ils renouvelleront les recherches sur d'autres terres en utilisant les mêmes procédés d'étude. A chaque fois, les résultats seront publiés pour se confronter au reste de la communauté scientifique qui donneront leur avis. Il y aura aussi les retours d'expérience des maçons, le plus important, "car ce sont eux qui manient la matière". Petit à petit, le travail s'affinera et gagnera en légitimité jusqu'à servir d'exemple à d'autres laboratoires, localisés sur d'autres territoires, étudiant d'autres sols.

C'est ce qui s'est passé pour l'élaboration des Règles Professionnelles des enduits. Erwan Hamard était encore à l'ENTPE et a pu participer à la mise en place de ce référentiel technique. Il suit une démarche performantielle -ce qui est très novateur en France- en exigeant à l'enduit de résister au test-chantier de résistance à l'arrachement. On

* Article «Enduit sur terre-cru, des règles professionnelles pour préserver la performance du bâti» dans Qualité Construction n°134, Septembre/octobre 2012, texte d'Alain Sartre, p47-54

accroche une masse à la surface: 4 x 5 cm doivent résister pendant 30 secondes à 2kg.

Dans ce document on décrit également les moyens de mise-en-oeuvre mais ils restent à titre indicatif ! Ce n'est pas un DTU, ce sont des conseils. Par exemple, on nous propose un test pour choisir le bon mélange : "La première série de tests consiste à réaliser plusieurs échantillons d'enduit d'une surface unitaire de 25 x 25 cm : le bon choix est celui qui ne fissure pas au séchage."*

Cette phrase est tirée d'un article de 2012 dans Qualité Construction, date de création des Règles Pro. Il est amusant de relever que dans ce texte, on fait référence aux quelques acteurs que nous avons nous-même croisé... "Ce sont quatre militants actifs du réseau Ecobâtir qui ont principalement élaboré les Règles Professionnelles pour la mise en oeuvre des enduits sur support composé de terre-cru. L'équipe comprend Jean-Claude Morel de l'ENTPE qui est intervenu sur la partie essais, ainsi que Fabienne Casaux, une économiste de la construction particulièrement sollicitée pour unifier et synthétiser la rédaction. Mais les Règles ont surtout été formulées pour des maçons par deux maçons : Alain Marcom et Nicolas Meunier."*

* id. p.52

On retrouve le point récurant d'une normalisation par les praticiens.

Et c'est également la ligne de tir que se donne à respecter l'association TERA pour sa mission...

STÉPHANE FORGE

La rédaction du guide des bonnes pratiques du pisé, témoignage de Stéphane Forge

L'association TERA (TERre crue Rhône-Alpes) se crée en 2014 afin de rédiger *le guide des bonnes pratiques* du pisé. C'est une structure régionale qui fait partie d'un effort national pour l'élaboration de textes de référence pour la construction terre crue. Ainsi, dans chaque région, pour chaque technique, des personnes se rassemblent en association pour rédiger ces codes. Il y en a six :

- Collectif Rhône-Alpes (TERA) pour la technique du pisé

- Collectif des Terreux Armoricaïns (CTA) pour la bauge
- Collectif Midi-Pyrénées (Atoutterre) pour l'adobe
- Collectif Normandie pour le torchi
- Collectif Languedoc-Roussillon pour la terre allégée (terre-paille, terre-copeaux, terre-chanvre, etc)
- Asterre pour les enduits

C'est un programme national dirigé par le ministère de l'Ecologie et du Développement Durable avec la DHUP (Direction de l'Habitat de l'Urbanisme et du Paysage).

Ces deux organismes pilotent toutes les associations régionales.

J'ai pu rencontré Stéphane Forge, membre de TERA en mars 2017. Il est architecte à Lyon et me raconte l'aventure...

La démarche de l'association TERA pour la rédaction du code de bonnes pratiques du pisé...

Pour rédiger le code, les membres de l'association se réunissent et discutent. Ils sont tous praticiens (architectes, maçons ou autre) : il faut avoir une assurance décennale pour être adhérent.

Ils échangent leurs expériences, la démarche est donc de partir d'éléments de «moyen» pour définir des éléments de «résultats»: lors des discussions les professionnels décrivent leurs pratiques, à l'issue de ces descriptions ils sélectionnent les éléments de mise-en-œuvre qui devront être évalués et intégrés au code. L'objectif de cette démarche performantielle est de définir des exigences de résultat sur le bâtiment pour qu'il devienne assurable, tout en laissant une part de liberté et donc d'innovation dans les moyens de mise-en-œuvre du projet de la maîtrise d'œuvre.

“On pense que c'est un des leviers pour développer une filière: il faut que les assurances suivent les maçons et les architectes et que ce ne soit pas considéré comme de l'expérimental alors que ce sont des techniques qui sont très très vieilles.”*

Ils s'organisent en ateliers: un s'occupe de la rédaction dont S. Forge fait partie, un autre se charge de la communication avec des expositions itinérantes par exemple, et un dernier réfléchit à la formation.

* toutes les citations de cette sous-partie proviennent de l'enregistrement audio de mon entrevue avec Stéphane Forge en mars 2017, à Lyon.

Le groupe TERA représente une quarantaine de membres bénévoles dont 20 sont véritablement actifs. Pour les réunions plus conséquentes, on invite des intervenants spécialistes.

L'association doit suivre un calendrier et un cahier des charges fournis par l'Etat, l'Europe et la région, avec le détail des financements. La rédaction du code doit être achevée en septembre 2017, la publication en 2018 pour toutes les régions. Lors de notre entrevue en février 2017, Stéphane indique qu'ils ont réussi à fixer un sommaire (*page suivante*), sans doute l'étape la plus importante. Par la suite, chaque point de ce plan détaillé sera discuté par petits groupes lors de réunions plus fréquentes. Il nous donne un exemple : “On prend un point du sommaire, aujourd'hui on s'attèle au soubassement. Alors qu'est-ce que vous avez à dire sur le sous-bassement ?” Chacun donne son avis, son expérience, sa pratique et on conclut en résultats performantiels et avertissements/conseils.

Parallèlement, on fait appel à un prestataire qui est payé par l'association, chargé de rédiger plus correctement le document: une partie de son travail est de chercher les textes réglementaires existants pour en prendre modèle quant au vocabulaire ou structure du propos. Par exemple, on peut se référer à un DTU-béton pour analyser la manière dont on peut décrire ou réglementer les aspects de surface d'un mur. On pioche également dans les règles étrangères sur la terre-crue, on établit une bibliographie. Ce membre est le seul salarié de l'association.

Une fois par mois, les directeurs/délégués des associations en charge de la rédaction des différents codes, se réunissent à la Défense et présentent leur avancement devant les ministères. Pour TERA, c'est le travail Hervé Martineau (maçon piseur). Il s'est «dévoué», par conséquent Stéphane souligne la limite de cette méthode qui reste basée sur le bénévolat des membres actifs. Cela prend du temps, le travail prend du retard entre tous ces professionnels en charge de leur propre entreprise.

Le financement de l'association provient de l'Etat et de la région, et depuis cette année, une petite partie provient de l'Europe. Ces subventions paient les prestataires, intervenants, et sous-traitance de certaines missions trop ambitieuse pour les quelques bénévoles.

Le cahier des charges de l'Etat n'impose pas la composition des équipes : ainsi à TERA, il n'y a pas d'ingénieur structure qui restent des

Fig.X : sommaire du code des bonnes pratiques du pisé, source www.tera-terre.org/ intelligence-constructive-film-8mn

acteurs en marge de la filière. En revanche, une fois rédigé, le code est vérifié par une pluralité d'acteurs, majoritairement du secteur scientifique. Il faudra donc ouvrir ce cercle de relecture au maximum, car plus il y aura de «correcteurs», plus le texte sera légitime. Les professionnels invités occasionnellement aux discussions sont pour beaucoup des chercheurs/scientifiques, par exemple enseignants à l'ENTPE.

De même pour le groupe rédaction, plus il y a d'acteurs, plus le point de vue est omniscient. La notion de «consensus» entre les différents praticiens, les assureurs, les scientifiques etc, est élémentaire pour la justesse du code. C'est pourquoi Stéphane souligne les limites de ce premier projet de rédaction qui regroupe que 20 membres-actifs au final. Cependant, c'est un début et l'intention est louable.

Il y aura un guide des bonnes pratiques pour chaque technique. Il servira de base, "un peu comme un DTU", à une contractualisation entre les clients et la maîtrise d'œuvre.

Le statut des documents Codes de Bonnes Pratiques

L'initiative de parution de ces codes vient du réseau Ecobâtir. L'Etat avait demandé l'établissements de Règles Professionnelles. A ce moment-là, Ecobâtir "s'est battu pour que ce ne soit pas la traduction des Règles Allemandes." Ils ont eut gain de cause au bout de deux années de débat pour que l'élaboration de ces documents soient des codes rédigés par des praticiens dans chaque région.

Le projet de rédaction a été lancé en 2015 et est encadré par plusieurs structures représentant les acteurs d'une filière : Ecobâtir, AsTerre, CABEP (les artisans), FFB (Fédération Française du Bâtiment), l'UNTEC (économistes de la construction), le CROARA (ordre des architectes), et la DRAC (ministère de la culture).

Ce ne sont pas des Règles Professionnelles. Ces règles sont sous l'égide de la C2P (Commission Prévention Produit, cf encadré ci-contre). Les fondateurs de TERA ont participé à l'élaboration des Règles Professionnelles pour l'enduit sur support contenant de la terre. Dans ce cas la C2P demande aux maçons de rendre compte de leur réalisation. Ces fiches retour-d'expérience demande du temps aux entrepreneurs, s'il n'y a pas suffisamment de retours, les Règles

Professionnelles sont «annulées», elles sortiront du giron normatif.

"Le but est que ce soit des ouvrages de référence qui à terme pourront être transformés en règles Pro, mais ce ne seront pas des Règles Pro au sens ... normalisées."

Les Codes de Bonnes pratiques resteront de l'ordre de la négociation, un support de dialogue avec les assureurs et acteurs, ils ne sont pas réglementaires ou obligatoires. En revanche, du fait qu'ils soient commandités par le Ministère, ils jouissent d'un caractère officiel et seront applicables.

"L'idée c'est de... Ce n'est pas forcément d'empêcher quelqu'un qui a envie d'industrialiser et de vendre de la terre en sac. Par contre, on tient vraiment à ce que l'inverse ne soit pas possible : que le maçon qui veut pouvoir faire un mur, puisse aller chercher de la terre correctement, vérifier que ça va bien avec une série de tests assez simples. En gros partir de la pratique, de ce qu'ils font maintenant. Que ça puisse continuer d'être possible et assurable, qu'on vienne pas nous dire : «ah mais ta terre ne provient pas du sac de chez Lafarge (ou un autre peu importe) et par conséquent ton mur ne sera pas assuré, ça ne tiendra pas, ce n'est pas possible»."

"Ce n'est pas un livre de recette, c'est simplement un guide qui sera Normatif de façon à pouvoir encadrer les constructions neuves mais aussi les réhabilitations."*

* Hervé Martineau
<http://www.tera-terre.org/intelligence-constructive-film-8mn>

.....

LA C2P

C2P (Commission Prévention Produit) est une commission qui fait partie de l'AQC (Agence Qualité Construction). Elle s'intéresse à un produit mis sur le marché pour définir ses pathologies et les documents réglementaires associés. Selon son site internet, elle se donne deux principaux objectifs d'ordre technique:

- attirer l'attention des professionnels lors de leur choix technique sur les produits, et/ou procédés, susceptibles de poser des problèmes ;
- faire progresser les produits et les textes qui en définissent la mise en œuvre.

Par cette définition, on remarque clairement l'habitude du cadre constructif qui régleme les moyens et non pas les résultats.

Elle est constituée de : cinq membres représentant les sociétés d'assurances (FFSA et GEMA); sept membres représentant les industriels (AIMCC), les certificateurs (AFOCERT), les bureaux de normalisation (BNTEC), les entreprises (CAPEB et FFB), les centres techniques (CSTB) et les contrôleurs techniques (COPREC CONSTRUCTION).

LE NOUVEAU RÔLE DE L'ARCHITECTE

“Nous avons voulu explorer les enjeux auxquelles sont confrontés tous ceux qui dessinent deux traits parallèles sur une feuille de papier pour en faire un mur qui transformera des ressources naturelles en béton armé; nous avons enquêté en amont et en aval de ce moment où les matériaux se figent.”* *Agence Encore Heureux*

Si mon matériau est variable tel la terre, je dépends alors de sa nature, de la mise-en-œuvre qu'elle demande, de ces capacités. Peut-elle être porteuse ? Ai-je le volume suffisant pour le faire ? Dois-je compléter ma matière ? Dans ce cas «avec quoi», et «pour faire quoi» ?

En effet, comme nous l'a dit Erwan Hamard, la terre n'est pas un matériau qui s'industrialise dans le sens où je choisis de faire cette technique que je l'applique coûte que coûte. “On a un matériau qui est naturel et à chaque fois qu'on a un nouveau chantier, le matériau va être différent. Donc on ne peut pas se placer dans une logique industrielle dans le sens où je vais toujours faire du pisé par exemple. Une logique industrielle ça serait ça.”*

L'étude de site, qui précède tout travail de conception, sera donc enrichie de l'étude de ce matériau. Je choisirai le principe constructif en fonction, tout en gardant en tête mon cahier des charges, les concepts architecturaux de mon projet, et les compétences des praticiens disponibles. Alors que usuellement, le bureau d'études et le maçon arrivent après le travail de l'architecte, la maîtrise d'ouvrage devra se former au complet dès l'esquisse du projet. Il me faudra l'avis de l'artisan et du bureau d'études pour convenir des cartes que j'aurai en main.

Le dialogue entre les membres de l'équipe d'œuvre sera soutenu. C'est pourquoi certains enfilent plusieurs casquettes: du dessinateur, au sculpteur, au maçon en passant par le formateur ou encore l'ingénieur.

L'architecte enfile plusieurs casquettes.

C'est la démarche de Geun-Shik Shin. ‘Pour chacun de ces projets, il est à la fois architecte, ingénieur et maçon, maîtrisant toutes les étapes de la construction depuis l'extraction de la terre naturelle

* Encore Heureux, préface du livre «Matière grise : matériaux, réemploi, architecture», Paris Pavillon de l'Arsenal, 2014

* ci-contre, «Bâtir en terre : du grain de sable à l'architecture», Laëticia Fontaine et Romain Anger, éd. Belin 2009, p.80

jusqu'à la construction d'un bâtiment. [...] pour mener à bien ses œuvres, il s'emploie à maîtriser la matière : il sélectionne la terre utilisée pour la construction, l'analyse il ajoute éventuellement des granulats quelques graviers et sables. Il approfondit également l'aspect technique, n'hésitant pas à fabriquer des outils spécifiques pour l'ouvrage visé. Il forme et encadre une équipe de maçons, qui souvent ne connaissent pas les spécificités du matériau terre. Il maîtrise enfin la conception du bâtiment, puisque la mise en œuvre du pisé implique des règles constructives précises.”*

Sculpteur, architecte et ingénieur, sont les métiers des constructeurs camerounais pour l'habitat traditionnel appelé «Case obus». La très célèbre maxime de Louis Sullivan «Form follows fonction» était le mot d'ordre de l'Architecture Moderne. Ici, elle sied totalement à cette démarche vernaculaire où rien n'a été laissé au hasard... La géométrie en cloche s'apprend à la chaîne, courbe de structure idéale (consensus résistance économie de matière) du lexique mathématique. Pour augmenter cette stabilité mécanique, le mur est épaissi à la base. Les canelures sur cette enveloppe ne sont pas uniquement décoratives : elles rigidifient la surface en économisant davantage de matière.

Marcelo Cortés accumule lui aussi les savoirs, il est à la fois architecte et maçon. Dans ses projets, il allie terre et métal et retranscrit les principes parasismiques traditionnels du Chili.

Satprem Maïni une figure de l'architecture de terre, est connu pour les prouesses techniques de ces édifices aux grands volumes enrichis de voûtes et de coupes. Il est architecte, maçon, ingénieur, formateur, et directeur de l'*Auroville Earth Institute* en Inde. “Grâce à sa parfaite maîtrise technique et à l'organisation minutieuse de ses chantiers, il construit des bâtiments impressionnants en des temps records, dans des contextes où la main d'œuvre est le plus souvent sous-qualifiée à l'origine et formée directement sur le chantier.”* Il forme la main d'œuvre et fait lui-même les calculs de structure.

Une main d'œuvre qui nous est chère

Stéphane Forge rappelle que le prix de la main d'œuvre dans la construction terre n'est pas une tare. En revanche, la motivation qu'il perçoit sur ses chantiers en tant qu'architecte lui donne chaud au cœur. C'est une construction qui demande aux maçons de s'appliquer



Fig. 41 : Geun-Shik Shin pour le Terra Awards 2016, Corée du sud, source : <http://terra-award.org/hommages-aux-pionniers>

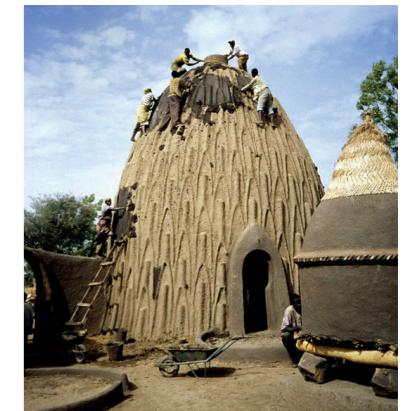


Fig. 42 : Case obus source : www.lelotenaction.org



Fig. 43 : La casa Munita de Marcelo Cortés sur terra-awards.org

et d'être très qualifiés et ce n'est pas un mal. Au contraire l'ouvrier pourra être fier, son travail est valorisé et reconnu. L'architecte est content de rejoindre son chantier, les problèmes sont solutionnés par tous, on ne se jette pas la pierre, on cherche seulement une solution.

Le «chantier-école» où l'architecte organise la formation des ouvriers est de plus en plus en vogue. Près de Nantes, à Bouguenais, l'agence Belenfant & Daubas expérimente cette pratique pour la construction du pôle espaces-vert. Le service de réinsertion faisait partie du cahier des charges et les associations «Réagir ensemble» et «CAVABAT» ont participé à l'édification des murs de terre et de roseaux...

Le site induit la matière, la matière induit la mise-en-œuvre, la mise-en-œuvre suggère la conception.

Pour ce même projet, la terre du site a été testée. Évaluée trop argileuse pour la bauge ou l'adobe, elle a été coulée pour remplir l'ossature bois entre deux lattis de roseaux. Ces branches proviennent de la Loire voisine, ainsi que le bois de bardage. L'isolant Métisse (jeans) a été récupéré chez Emmaüs. On a également récupéré l'écorce d'un chêne coupé ou encore réemployé des éléments de charpente métallique...

Fig. 44 : Pôle des espaces vert de Bouguenais (44), 2009, agence Belenfant et Daubas

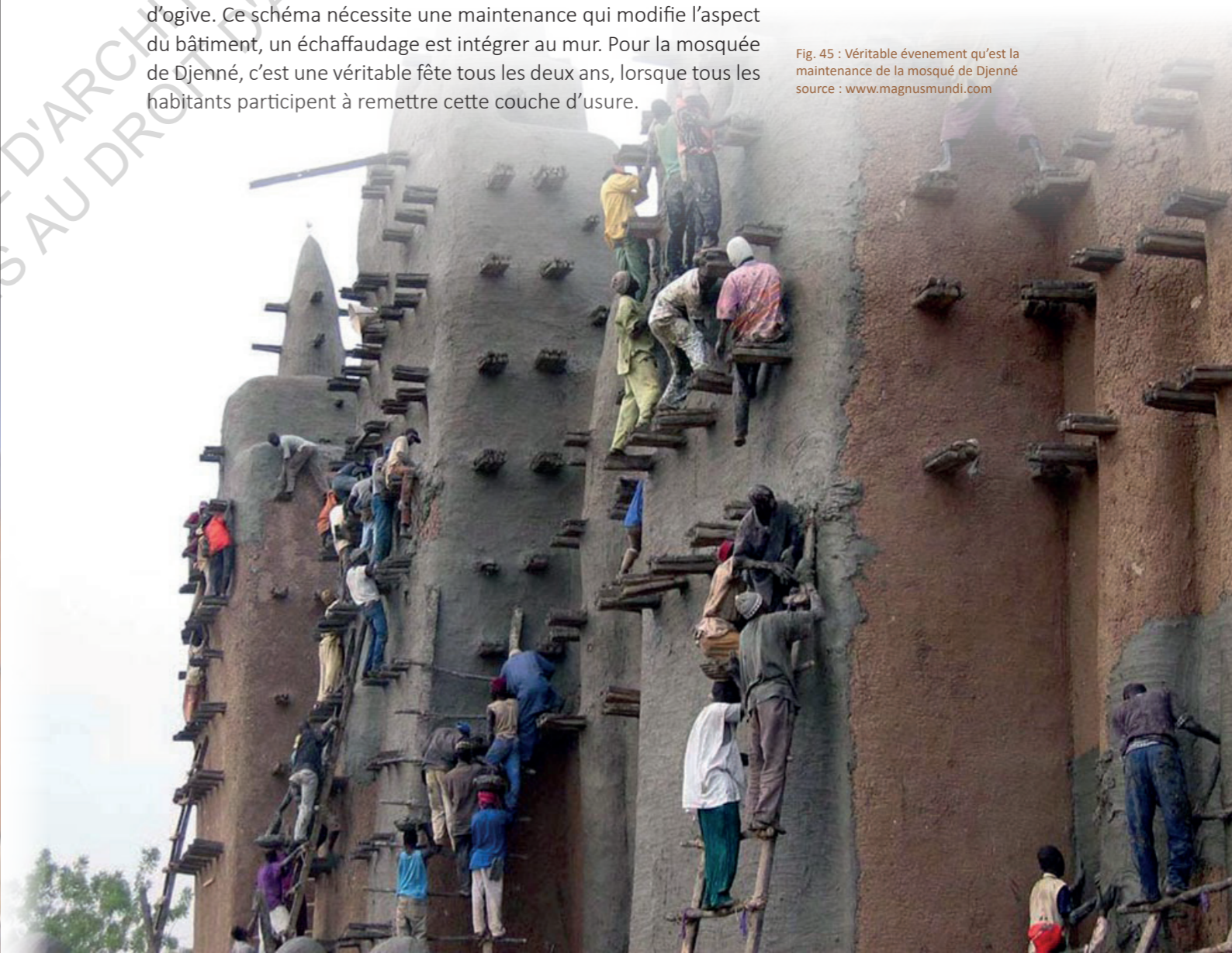


Le point de départ pour la conception est donc la matière. Il faudra faire preuve «d'intelligence constructive» pour reprendre les mots de Nicolas Meunier, afin d'utiliser à bon escient le matériau.

On peut citer le principe «bonnes bottes et bon chapeau» bien connu des praticiens du bois, on protège le bâtiment de la pluie par une avancée de toit par exemple et des remontées capillaires avec un soubassement approprié.

Ou bien au Mali, où l'on ne possède pas de matériaux pour les bonnes bottes et le bon chapeau, on réalise en partie basse un bourrelet c'est-à-dire une masse d'usage, un ventre protubérant à l'endroit où se forme le sillon destructeur. En haut, on évite les surfaces planes où stagnerait la pluie et on adopte une forme d'ogive. Ce schéma nécessite une maintenance qui modifie l'aspect du bâtiment, un échaffaudage est intégré au mur. Pour la mosquée de Djenné, c'est une véritable fête tous les deux ans, lorsque tous les habitants participent à remettre cette couche d'usage.

Fig. 45 : Véritable événement qu'est la maintenance de la mosquée de Djenné source : www.magnusmundi.com

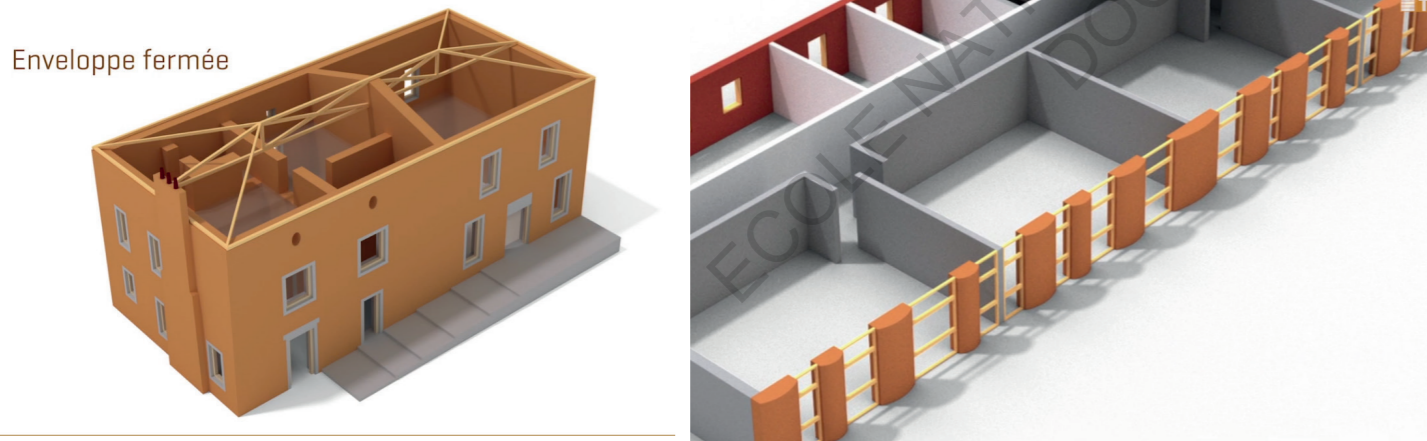


Un autre principe constructif apparaît dans les pays occidentaux appliqué à la technique du pisé. Pour Nicolas Meunier et Vincent Rigassi (architecte), il y a deux manières de concevoir les espaces en pisé : on décide d'une enveloppe fermée «traditionnelle», on adopte les murs trumeaux une écriture plus contemporaine. Ce sont des pans de mur pisé autosupportés stabilisés avec les éléments horizontaux : planchers, charpente, parfois portiques ou murs de refends qui ont un rôle de contreventement en somme.

Nicolas Meunier préconise une conception avec des murs trumeaux pour un souci économique. En effet, une conception «traditionnelle» prend plus de temps à réaliser, elle est donc plus onéreuse, puisqu'il faut un travail de coffrage complexe avec les ouvertures et les percées. Par ailleurs, ils permettent l'élargissement des ouvertures, le décroisement, pour le maçon-piseur c'est l'occasion d'adopter une écriture plus contemporaine. Les murs trumeaux peuvent être courbes avec un coffrage cintré pour la stabilité de l'élément.

Le projet de réhabilitation d'une ferme par l'architecte Vincent Regassi à Montseveroux illustre cette logique structurelle. Pour cette bâtisse en pisé très endommagée, on ne pouvait détruire le plancher et la toiture sans faire écrouler les murs. Ainsi, les nouveaux planchers en bois ont été confiés au lot maçonnerie, simultanément à la reprise des murs porteurs périphériques. Aussitôt détruit, le plancher est remplacé pour maintenir le mur face aux sollicitations horizontales. Encore une fois, on aperçoit la pluridisciplinarité dont fait preuve l'entrepreneur-maçon dans ce cas.

Fig. 46 : Deux logiques structurelles pour le pisé, l'enveloppe fermée «traditionnelle» (à gauche) et la juxtaposition de murs trumeaux (à droite), source : www.tera-terre.org



Ces derniers paragraphes évoque bien rapidement ces raisonnements de conception qui pourraient être l'objet d'un travail de mémoire à part entière. L'idée ici est de suggérer l'air de changement que l'on peut percevoir dans le scénario de développement de la filière terre crue, adapté à cette matière inouïe qui refuse d'être formatée au «moule» de l'industrialisation.

“La démarche, appliquée par [l'artiste] à l'architecture d'intérieur et au design, est généralisable plus globalement à la construction en terre et engendrerait certainement de nouvelles manières de bâtir. Nous sommes loin d'avoir exploité toutes les potentialités de cette matière infiniment variée et complexe, et de ce fait loin d'avoir saisi le bénéfice que peut en retirer la société.”*

* «Bâtir en terre : du grain de sable à l'architecture», Laëticia Fontaine et Romain Anger, éd. Belin 2009, p.92, concernant l'artiste Daniel Duchert qui peint, sculpte, trou... la matière terre.

L'INTELLIGENCE CONSTRUCTIVE

L'intelligence constructive de Nicolas Meunier, maçon-piseur en Rhône-Alpes, témoignage sur Tera-terre.org...

“En fait, toutes les techniques sont intelligentes : la technique c'est un matériau, et la transformation de ce matériau pour un usage. On a de l'acier, on transforme cet acier pour en faire des poutrelles, on les boulonne ensemble, c'est une forme d'intelligence... On ramasse des pierres dans un champ, on les empile sèches ou avec de la terre à mortier, c'est une forme d'intelligence aussi... Une autre forme d'intelligence consiste à prendre de la terre sous la terre végétale, cette terre contient de l'argile, on peut donc la transformer en mur avec différentes techniques : le torchis, l'adobe, et bien sûr le pisé pour la région Rhône-Alpes... Ensuite, l'intelligence consiste à mettre un coffrage de chaque côté, mettre des couches de terre, compacter cette terre, et on se retrouve avec des murs qui tiennent... Dans la Plaine du Forez, on trouve des murs vieux de 400 ans...”

Conclusion

La première partie de ce mémoire a permis de décrire la culture constructive actuelle entre le siècle précédent marqué par le monopôle du béton et le passage au 21^e siècle qui pose de nouveaux enjeux d'écologie et de confort. On a pu constater que ces nouvelles prises de conscience suggèrent une évolution des pratiques constructives avec l'introduction de matériaux écologiques comme la terre-crue. Renzo Piano nous encourage à "transmettre la modestie devant la réalité de la matière" et à... "Construire en terre ! La matière première la plus disponible, la plus répandue, riche et belle, variée et variable, colorée, stable et instable."*

Dans un deuxième chapitre nous nous sommes attelés au débat actuel de l'industrialisation de la filière terre crue. Si certains de ces procédés semblent pertinents, c'est davantage la pensée industrielle qui nous dérange face aux caractères premiers de notre matière. Fort de ce constat, on conclut qu'un renouveau de la culture constructive est bel et bien nécessaire. Car même si dans certains cas l'industrialisation n'est pas un mal, c'est adapter notre matériau à un cadre qui ne lui sied guère, c'est rester sur nos acquis du 20^e siècle.

A l'issue de cette série d'exemples, nous avons pu proposer un scénario d'industrialisation modérée, adaptée aux caractéristiques de la terre. La réponse la plus évidente est l'acceptation de praticiens qualifiés, le coût du projet n'étant pas l'unique perspective d'un projet d'architecture. Il y a aussi des enjeux liés à l'écologie, à la sociologie, l'impact économique est à analyser sur un territoire, avec les acteurs de ce territoire.

L'un des deux freins majeurs de la filière qui est la main d'œuvre onéreuse est donc levé par cette proposition de scénario: la

* Renzo Piano préface de
«Bâtir en terre : du grain de
sable à l'architecture»,
L. Fontaine & R. Anger,
p.55, éd. Belin, 2009

mécanisation accélère le chantier, l'élargissement de la main d'œuvre se fait par démocratisation de l'usage de la terre de plus en plus enseigné et non par une déqualification de l'ouvrier.

Ce qui nous emmène au deuxième frein: la normalisation. Si le schéma conventionnel qui cloisonne le cycle de construction d'un bâtiment entre les différents acteurs où chacun à une tâche bien définie n'est pas appliqué à la filière terre-crue, comment décrire et réglementer l'acte de construire ?

La dernière partie de ce mémoire propose de normaliser la construction avec une démarche performantielle et non pas «faire de la norme produit» associée à l'obligation de moyen.

En effet, à chaque terre sa technique, et elles sont des centaines! La terre n'est pas un matériau mais une matière prête-à-l'emploi, ce n'est pas un produit que l'on peut décrire pour garantir telle ou telle résistance. La méthode performantielle propose des tests pour évaluer la viabilité de l'ouvrage. Pour arriver à ce résultat d'édification, le processus de construction est libre.

Si la mise en œuvre n'est pas une recette imposée, si le matériau de construction est aléatoire, si les expérimentations pour identifier ma terre, l'évaluer, et choisir sa mise-en-œuvre sont faits au cas-par-cas, alors, les acteurs qui sont l'architecte, le maçon, l'ingénieur devront travailler ensemble avec un dialogue continue. C'est le nouveau rôle de l'architecte qui prend véritablement son jeu de rotule de l'acte de construire. Un va-et-vient incessant se fait : il dessine une esquisse, il teste avec le maçon et le bureau d'étude la matière, il retourne à son dessin pour prendre en compte les caractéristiques de la terre en question. Il s'adapte à la matière. Ce n'est plus le matériau qui s'adapte au cadre mais le cadre qui s'adapte au matériau.

C'est l'intelligence constructive. Pour que ce dialogue soit prolifique et le projet bien-fondé, l'architecte doit pouvoir enfilet plusieurs casquettes du sculpteur, à l'inventeur en passant par le maçon et l'ingénieur. Il ne s'agit plus de tirer un trait sur autocad, de le pointer du doigt en disant «ça se sera en béton désactivé, ça se sera en verre structurel». Au contraire, il aura déjà choisi son matériau et surtout il l'aura compris, la conception découle de la matière.

Cette compréhension du matériau n'est pas seulement d'ordre technique. Nous avons compris que lorsque l'architecte choisit son matériau, il prend en compte : ses effets esthétiques, son prix, mais

aussi son impact économique sur le territoire, sa capacité d'intensité sociale, ses conséquences environnementales, sa philosophie, la culture associée. Lorsqu'une entreprise me propose un matériau, je me renseigne sur sa fabrication, sa provenance, les acteurs qui ont participé à l'élaboration de ce produit, le contexte culturel dans lequel je vais le mettre en œuvre...

Ce nouveau tableau n'a certainement pas vocation à remplacer l'autre : la terre crue ne remplacera pas le béton. Toutes les techniques ne sont pas porteuses. Un mur pisé ne peut pas excéder 10m de haut. La terre ne travaille qu'en compression. Elle est sensible à l'eau. Etc. Et c'est bien en ce point que la conclusion de ce mémoire se fait: dans un bâtiment plusieurs matériaux cohabitent, il faut les choisir soigneusement avec tous les paramètres que nous avons décrits, comprendre qu'une alliance bois-terre est plus logique qu'une alliance béton-terre, etc. Alors chaque matériau aura sa filière (son acheminement, ses techniques, son éthique et son histoire) et ces différents scénarios pourront coexister tout en étant singuliers, adaptés à sa matière et à ses acteurs. L'architecte, peut-être finira-t-il par se spécialiser aussi, mais a nécessairement un pied dans chacun de ces domaines. Une base de connaissance dans le bois, la paille, le béton, la terre... lui permettra de choisir le matériau le plus pertinent et d'approfondir pour chaque projet son savoir grâce au dialogue avec les autres acteurs de l'acte de construire.

Livres

Philippe Genestier et Pierre Gras, «*Sacré Béton !, Fabrique et légende d'un matériau du futur*» ouvrage collectif, Lyon éd. Libel, 2015
 Laëticia Fontaine et Romain Anger, «*Bâtir en terre : du grain de sable à l'architecture*», éd. Belin, 2009
 CRAterre ouvrage collectif, «*Construire en terre*» 1979, Paris, éd. Alternative et Paranthèses, version pdf disponible sur <http://craterre.org>
 Lucien Kroll dans «*Composants, faut-il industrialiser l'architecture ?*», éd. Socorema, 1988
 Konrad Wachsmann, «*The Turning Point of Building*», cité par l'Encyclopédie Universalis, éd. internet www.universalis.fr/encyclopedie/industrialisation-de-l-architecture
 Hugo Houben et Hubert Guillaud, «*Traité de Construction en terre*», CRAterre, éd. Parenthèses 2006
 Julien Choppin, Nicola Delon, Encore Heureux, «*Matière grise : matériaux, réemploi, architecture*», Paris Pavillon de l'Arsenal, 2014

Article, mémoires et documents divers

Hubert Guillaud, auteur de l'article «Normes et Recommandations», 2005, publié dans *l'Encyclopédie du Bâtiment*, éd. Weka, (envoyé par mail de sa part)
 Elvire Leylavergne, «*La filière terre crue en France: Enjeux, freins et perspectives*», mémoire encadré par Patrice Doat, ensaigant Hubert Guillaud, DSA-terre Ensa Grenoble, 2010-2012
 Amaco, «*Qu'est ce que la matière liante ?*», article internet http://www.amaco.org/webapp/website/blank_page_content.html?
 Vincent Pessey, auteur de l'article «*Les atouts écologiques des nouveaux matériaux à changement de phase*», sur le site <http://www.cleantechrepublic.com>
 Dominique Gauzin-Müller, auteur de l'article «*Martin Rauch, le magicien du pisé*», Ecologik - n°50 mai juin juillet 2016
 Dominique Gauzin-Müller, auteur de l'article «*Architecture en terre crue, quel avenir en France?*», interviews de Patrice Doat et Jean Dethier, Ecologik - n°50 mai juin juillet 2016
 Aleyda Resendiz-Vazquez, thèse «*L'industrialisation du bâtiment - Le cas de la préfabrication dans la construction scolaire en France (1951-1973)*», Juillet 2010, Conservatoire National des Arts et Métiers, encadrants Sabine Barles et André Guillaume
 Q.Chansavang et H. Gasnier, «*Une approche prospective du pisé*», mémoire DSA terre Ensa Grenoble, encadré par Patrice Doat, 2012, disponible sur issuu.com
 Quentin Chansavang, «*Terre & Architecture Contemporaine*», 2008, mémoire de master Ensa Grenoble encadré par Hubert Guillaud
 Alix de Vogüé, article «*Un bâtiment pilote pour étudier la brique de terre crue*», Le Moniteur, juin 2012
 Pierre Frey, article «*Terre à Terre Martin Rauch*», AA' janvier-février 2013 n°393
 Christian Robischon, article «*La construction en terre crue a sa vitrine en Suisse*», Le Moniteur n°5752 février 2014, Cahier Pratique du Moniteur n°5664, «*Normes*», juin 2012, consultable sur www.lemoniteur.fr
 L. Marcheggiano interview vidéo donnée par Amaco, disponible sur la chaîne youtube, titre de la vidéo «*pisé préfabriqué*»
 Solène Veysseyre, «*Comment développer l'usage de la terre crue dans la production architecturale française ?*», mémoire master EnsaLyon, 2009
 l'association *Le Village*, gazette d'ARESO n°47 disponible sur www.areso.asso.fr
 Alain Sartre, Article «*Enduit sur terre-crue, des règles professionnelles pour préserver la performance du bâti*», Qualité Construction n°134, Septembre/octobre 2012
 Jacques Grinevald, «*Civilisation thermo-industrielle recherche sobriété*», propos recueillis par Agnès Sinaï, Ecologik n°21 (juin-juillet 2011)
 Hemet, professeur Ecole Centrale cours E11 «*Energétique*» pour le 2^e principe de la thermo-dynamique
 Murielle Serlet «*La déclaration de Lyon*» Publication février 2017, Congrès terra 2016, disponible sur <https://craterre.hypotheses.org/1404>

Témoignage de Philibert Perraud, maçon-piseur (né en 1923), recueilli par Nicolas Meunier 2010, mise en ligne sur construction-pise.fr

Sites Internet

Site officiel des Grands Ateliers <http://www.lesgrandsateliers.org>
 Site officiel d'Asterre <http://www.asterre.org>
 Site officiel de l'entreprise Nicolas Meunier, <http://www.construction-pise.fr>
 Site officile d'Akterre <http://www.akterre.com>
 Site officiel de l'entreprise www.claytec.fr
 Site officiel CRAterre <http://craterre.org>
 Site officiel TERA www.tera-terre.org
 Site officiel du Terra Awards <http://terra-award.org>
 Site officiel de l'agence Nunc <http://www.nunc.fr/pise.html>
 Site officiel Atelier d'architecture timurersen www.timurersen.com
 Site officiel Agence Belenfant et Daubas : <http://www.latelier-belenfant-daubas-architectes.org>
 Site officiel de San Tan Adobe www.santanadobe.com
 Site officiel de la Confédération Suisse www.gruenewirtschaft.admin.ch,
 Site officiel Afnor www.normalisation.afnor.org
 Site fournisseur de matériau <http://www.pointp.fr/>
 Site américain <http://www.manta.com> pour chiffres entreprises
 Chaîne youtube Amaco MATières à CONstruire
 Liste des brevets donnée par google : <https://ip4.google.com/patents>
 Dictionnaire www.cnrtl.fr/definition
 Dictionnaire www.larousse.fr

Visites, entretiens et conférences

entrevue du 7 mars 2017 à Lyon, avec Stéphane Forge, architecte et membre de l'association Tera (durée 2h30)
 entrevue avec Erwan Hamard à l'IFSTTAR de Bouguenais (44), le 21 mars 2017 (durée 1h45)
 entretien téléphonique Romain Fèvre, février 2017, ingénieur fluide Epco'Energie Villefranche-sur-Saône (69)
 conférence Bellastock #2 cycle de conférences «Terre en mars» encadrées par Patrice Doat, le 08 mars 2017 à l'Ensa Paris-Belleville
 conférence Elvire Leylavergne, mars 2015 à l'insa lyon, pour les étudiants de 5e année, mise en ligne par amaco <https://vimeo.com/channels/942029/176280158>
 Visite du Domaine de la Terre et des Grands Ateliers de l'isle d'Abeau, à Villefontaine, octobre 2016
 Visite de Exposition «*ArchéoTERRA*» au Musée Gallo-Romain de Lyon
 Visite de l'Exposition «*Architecture en terre d'aujourd'hui*», Musée Gallo-Romain Lyon 5^e, octobre 2016
 Visite des Arpenteurs n°2 avec Loïc Daubas dans le cadre de «Nantes transition énergétique», mars 2017
 Enquête Facebook : «*Quelle place pour la terre crue dans les école d'architecture en France?*»
 Cours UE-terre Ensa Nantes avec Bettina Horsch et Ricardo de Paoli

LISTE DES FIGURES

- Fig.1 : Petite mise au point sur le vocabulaire...
- Fig.2 : cycle de la fabrication du ciment, source <http://zelione.fr/materiaux/materiaux.html>
- Fig. 3: La coupole du Panthéon est en «béton romain», source : www.smarthistory.org
- Fig. 4 : Le phare d'Eddystone fait de granit et de chaux hydraulique résiste aux conditions météorologiques peu clémentes de la Manche, source : www.enkidoublog.com, Lafage
- Fig. 5 : L'usine du Teil de Lafarge investit en 1833 dans de nouveaux fours à chaux, source : www.usinenouvelle.com
- Fig. 6 : L'excavateur à sec (système Couvreur) s'invite sur le chantier du Canal de Suez tout comme la machine à vapeur pour couler le béton, source : livre «Le chantier du canal de Suez (1869-1869)», *Presses de l'École Ponts et Chaussées*, éd. In Forma
- Fig. 7 : La construction du Mur de l'Atlantique en 1943, un des grands chantiers de guerre qui créent la main d'œuvre pour l'après-guerre, source : wikipedia.org
- Fig. 8: Le pont de Plougastel introduit le béton pré-contraint d'Eugène Freyssinet, source : www.efreyssinet-association.com
- Fig. 8: Garage de la rue Ponthieu en 1903, Auguste Perret mise sur le béton apparent, source : utopies.skynetblogs.be
- Fig. 9: La crue du Rhône à Lyon du 1er juin 1856 donne lieu à l'interdiction de construire en pisé en rez-de-chaussée, source : www.leprogres.fr
- Fig. 10: Les ménisques d'eau entre les plaquettes d'argile créent la cohérence du liant de la terre, source : «Bâtir en terre : du grain de sable à l'architecture»
- Fig. 11: Armadillo Box, Projet pour le Solar Décathlon par les étudiants de l'ensa Grenoble source : assets.inhabitat.com
- Fig. 12 : le Domaine de la Terre, projet d'expérimentation et de mise en valeur de 1985 source : visite octobre 2016
- Fig. 13 : Répartition des acteurs de la filière terre en 2012 par Elvire Leylavergne, source : mémoire «La filière terre crue en France: Enjeux, freins et perspectives»
- Fig. 14: Exposition «ArchéoTERRA» au Musée Gallo-Romain de Lyon, le contenu s'inscrit dans cette architecture Moderne remarquable de Bernard Zehrfuss
- Fig. 15: Inventaire des missions actuelles des acteurs, organigramme d'Elvire Leylavergne (mémoire DSA 2012) et analyse de ma part (2017)
- Fig. 16 : Quelques définitions sur l'industrialisation du bâtiment proposées par Aleyda Resendiz-Vazquez dans sa thèse «L'industrialisation du bâtiment - Le cas de la préfabrication dans la construction scolaire en France (1951-1973)»
- Fig.17 : Localisation des terres et de ses techniques, par Quentin Chansavang & Hugo Gasnier dans ce même mémoire
- Fig. 18: terre rocheuse chez Storme et Pruvost
- Fig. 19: terre argileuse chez Les Grès de Gascogne
- Fig. 20: le laminage de ces terres chez les briquetiers
- Fig. 21 : carte des briqueteries potentielles de Fabrice Tessier, diffusée lors du cycle de conférences «Terre en mars» encadrées par Patrice Doat, le 08 mars 2017 à l'Ensa Paris-Belleville, n°2
- Fig. 22 : Fiche produit BTC d'Akterre, disponible sur le site officiel
- Fig. 23: cette production demande de la place, cas de San Tan Adobe Inc
- Fig. 24: la cité de Shibam au Yémen, avec ses immeubles en brique de terre crue, Source : www.briquestechnicconcept.fr
- Fig. 25 (*ci-dessous*) BTC du briquetier Didier Hubert en région PACA, stabilisées avec 7% de ciment !
- Fig.26 : Produit pisé en big-bag de Claytec, premier producteur européen, fiche produit disponible sur le site officiel de l'entreprise www.claytec.fr
- Fig. 27: Coupe de l'école Mezzana, source article de Pierre Frey dans AA' n°393
- Fig.28: Ecole d'agriculture Mezzana avec strates d'érosion contrôlée, pisé préfabriqué, Martin Rauch, architecte Conte Pianetti Zanetta
- Fig.29 : coupe principe de l'érosion contrôlée, source AA' même article
- Fig. 30: Immeuble de logement dans le centre-ville de Montbrison (42), préfabrication artisanale, pignon nord en brique, Source www.tera-terre.org
- Fig. 31: Préfabrication sur chantier de l'équipe de N. Meunier pour le chantier de Montbrison, Source www.tera-terre.org
- Fig.32 : Le compacteur aérien est bien plus rapide que le fouloir pour damer ces 1m² de mur pisé
- Fig.33 : Le damage courant à l'aide d'un fouloir pneumatique a remplacé le putois en bois
- Fig. 34 : les essais de coffrage avec renforts extérieurs par Frédéric Moy aux

Grands Ateliers, Source : diapo Bellastock conférence n°2

Fig.35 : Conservatoire des sols NAMA Architecture

Fig.36 : Couverture de «construire en terre», première publication de CRAterre en 1979

Fig. 37 : Principe de déclinaison des performances d'Hubert Guillaud, source article «Normes et Recommandations»

Fig. 38 : Schéma principe de normalisation de la filière d'Hubert Guillaud, source : article «Normes et Recommandations» p.6

Fig. 39 : "Diagramme complet du cycle de production" de la terre crue d'après Hubert Guillaud, source : id.

Fig.40 : carte répartition du bâti en Bretagne www.ifsttar.com

Fig. 41 : Geun-Shik Shin pour le Terra Awards 2016, Corée du sud, source : <http://terra-award.org/hommages-aux-pionniers>

Fig. 42 : Case obus source : www.lelotenaction.org

Fig. 43: La casa Munita de Marcelo Cortés sur terra-awards.org

Fig. 44 : Pôle des espaces vert de Bouguenais (44), 2009, agence Belenfant et Daubas

Fig. 45 : Véritable événement qu'est la maintenance de la mosquée de Djenné source : www.magnusmundi.com

Fig. 46 : Deux logiques structurelles pour le pisé, l'enveloppe fermée «traditionnelle» (à gauche) et la juxtaposition de murs trumeaux (à droite), source : www.tera-terre.org