

Le pisé et les structures mixtes :

entre recherche historique et expérimentation constructive

Comment les principes de construction observés à Lyon et chez Cointeraux peuvent-ils permettre de réintroduire le pisé dans la construction contemporaine ?



ENSAPVS 2025
Séminaire Matière et Expérience

Construction
d'une colonne en
pisé
Photo de l'autrice

Encadrants : **SERRERO David** et **VINCENT Pierre**

BUZILA Laura

Remerciements

Je souhaite remercier l'ensemble des personnes qui ont contribué, directement ou indirectement, à la réalisation de ce mémoire.

À l'École nationale supérieure d'architecture de Paris-Val de Seine, qui a constitué le cadre de cette recherche.

À mes enseignants, *David Serrero* et *Vincent Pierre*, pour leur accompagnement, leurs retours constructifs et les échanges qui ont guidé l'évolution de ce travail.

Aux moniteurs de l'atelier de fabrication, *Clément Barbier* et *Zohair el Obbadi*, qui m'ont aidée dans la réalisation du prototype, fourni le bois nécessaire et transmis les bases d'utilisation des outils ainsi que des conseils techniques essentiels.

À mes amis, *Sixtine de Charette*, *Fannie Podevyn*, *Aurèle Berroyer*, et *Chiara Coleman*, *Kyann Mostowfi* pour leur aide précieuse lors de la construction du prototype et pour les échanges qui ont accompagné cette étape.

À la *Briqueterie Dewulf*, pour leur disponibilité et leurs explications précises concernant les caractéristiques de la terre ainsi que les modalités de sa livraison.

Aux équipes de la *BNF François-Mitterrand*, bibliothécaires, documentalistes et personnels des espaces de consultation, pour leur aide dans mes recherches, leurs indications méthodologiques et leur soutien dans la localisation des documents nécessaires.

Enfin, je remercie toutes les personnes avec qui j'ai pu échanger au cours de la conception et de la rédaction de ce mémoire. Chacun de ces échanges a contribué, à sa manière, à l'avancement de ce travail.

Avant-propos

J'ai grandi en Moldavie, dans un environnement où la nature, la terre et la construction de sa maison et ce qui l'entoure faisaient partie du quotidien. Entre les jardins de mes grands-parents, les champs, les forêts et les petits travaux autour de la maison notamment le travail de la terre, j'ai très tôt développé un rapport direct au geste, aux matériaux et à la construction faite soi-même. Ces expériences ont façonné ma curiosité pour la matière et pour la manière dont on construit avec ce que l'on a sous la main.

C'est seulement en intégrant l'école d'architecture que j'ai commencé à relire ces souvenirs autrement. J'ai découvert que la maison de l'un de mes grands-parents, comme beaucoup dans son village, était en terre crue, un fait auquel je n'avais jamais prêté attention. Cette révélation a éveillé un réel intérêt pour ce matériau que j'avais manipulé toute mon enfance sans en comprendre la portée.

Depuis ma deuxième année de licence, j'ai approfondi ce sujet à travers les cours, les projets et des recherches personnelles. Mon intérêt s'est progressivement orienté vers le pisé lyonnais, un patrimoine longtemps majeur puis progressivement marginalisé. Étudier son histoire, comprendre son déclin et explorer les travaux de François Cointeraux m'ont permis de situer la terre crue dans une tradition constructive fondée sur des structures mixtes, où la terre cohabite avec le bois, la pierre ou le métal.

Ce mémoire s'inscrit dans la continuité de ces réflexions. Il propose à la fois une lecture historique du pisé lyonnais et une exploration pratique à travers la fabrication d'un prototype inspiré des dispositifs de Cointeraux. Cette expérience m'a permis de confronter la théorie au geste, de comprendre la matière par l'exécution, et de relier mon parcours personnel à une réflexion contemporaine sur les matériaux locaux et la construction respectueuse du vivant.

Sommaire

Introduction.....	10
1. Etat de l'art.....	14
1.1 Etude générale du matériau :	16
1.1.1 Qu'est-ce que la terre crue et quelles sont les caractéristiques de ce matériaux	16
1.1.2 La terre crue dans l'histoire de l'architecture	18
1.1.3 Le pisé.....	20
1.2 L'histoire du pisé à Lyon	21
1.2.1 Les fondations romaines	22
1.2.2 Du Moyen Âge au XVIIIe siècle : une présence discrète mais constante	26
1.2.3 Le XIX ^e siècle : l'âge d'or du pisé et l'essor de la Croix-Rousse	28
1.2.4 François Cointeraux.....	30
1.2.5 Les sources de terre : un approvisionnement local et diversifié	34
1.2.6 Les inondations et l'évolution de la réglementation	35
1.2.7 Le XX ^e siècle : l'oubli progressif.....	38
1.2.8 Recensement des bâtiments en pisé à Lyon	40
2. Analyse des bâtiments contenant du pisé en région lyonnaise	41
2.1 Analyse de la matérialité de cinq bâtiments contenant du pisé et toujours existants à Lyon	43
2.2 Analyse d'une maison construite par François Cointeraux et des techniques de construction	51
2.2.1 Construction et outils	52
2.2.2 Description d'un bâtiment en pisé	66
2.3 L'aspect mixte des constructions contenant du pisé.....	73
3 Prototype de colonne en pisé conçue pour la maison de Bresse par François Cointeraux.....	78
3.1 Analyse approfondie des colonnes en pisé de François Cointeraux	80
3.1.1 Analyse des documents graphiques	81
3.1.2 Détails et processus de conception.....	86
3.2 Suivi de construction du prototype.....	102
3.2.1 Le moule en bois.....	103
3.2.2 La confection des modules de pisé (du nouveau pisé)	111
3.2.3 La base de pierre	119

3.2.4 Le poteau en bois	122
3.2.5 L'articulation du poteau en bois et de la base en pierre	123
3.2.6 L'assemblage des modules.....	124
3.3 Retour sur expérience et évolutions contemporaines possibles du prototype ...	126
3.3.1 Retour sur la colonne construite.....	127
3.3.2 Pistes contemporaines et alternatives	130
3.3.3 Lyon, un terrain d'étude et d'ouverture sur la structure mixte	133
Conclusion	134
Bibliographie.....	139

Problématique :

Comment les principes de construction observés à Lyon et chez François Cointeraux peuvent-ils permettre de réintroduire le pisé dans la construction contemporaine ?

Introduction

La terre crue, longtemps considérée comme un matériau du passé, fait aujourd'hui l'objet d'un regain d'intérêt dans la construction contemporaine. Ce retour progressif s'explique par une recherche de sobriété constructive et par le besoin de renouer avec des savoir-faire locaux adaptés aux enjeux environnementaux actuels. Le pisé, en particulier, incarne cette dimension à la fois historique et prospective : il porte la mémoire d'un territoire tout en ouvrant des pistes d'expérimentation pour l'avenir. Le présent mémoire s'inscrit dans cette démarche de redécouverte, en cherchant à comprendre comment les principes de construction observés à Lyon et chez François Cointeraux peuvent permettre de réintroduire le pisé dans la construction contemporaine. L'étude tente d'y répondre en démontrant que cette réintroduction peut se faire par l'intégration du pisé dans des **structures mixtes**¹, et par une réflexion constructive plus poussée et inventive sur l'assemblage des matériaux.

La ville de Lyon constitue ici un terrain d'étude privilégié. Elle offre un cadre exceptionnel où la terre crue, et plus précisément le pisé, a longtemps façonné l'identité urbaine et architecturale. Dès l'Antiquité, les bâtisseurs romains utilisaient la terre sous forme de torchis ou de briques crues pour les constructions domestiques. Plus tard, au XIX^e siècle, le pisé connaît son âge d'or sur les pentes de la Croix-Rousse, où il accompagne l'essor industriel et la densification du tissu urbain. Mais cette prospérité est interrompue par les grandes inondations de 1840 et de 1856, qui fragilisent de nombreux bâtiments et entraînent la mise en place de règlements limitant, voire interdisant, son usage. Ce traumatisme urbain marque un tournant : le pisé, associé à la pauvreté et à la fragilité, disparaît progressivement du paysage lyonnais au profit de la pierre, de la brique puis du béton. Pourtant, derrière cet effacement, un patrimoine discret persiste, témoignant d'une culture constructive fondée sur l'équilibre et la complémentarité des matériaux.

1. Système constructif associant plusieurs matériaux (terre, bois, pierre, métal...) afin d'optimiser leurs propriétés mécaniques, thermiques ou structurelles. (Construction).

Ce mémoire s'attache à retrouver cette logique constructive et à en tirer des enseignements pour le présent. Il se compose de trois grandes étapes qui construisent une démarche progressive, allant de la recherche historique à l'expérimentation matérielle.

La première étape, **l'état de l'art**, établit les bases théoriques et historiques nécessaires à la compréhension du sujet. Elle commence par une étude du matériau terre crue, de sa composition et de ses propriétés physiques, avant de se concentrer sur la technique du pisé, sur son emploi à travers le monde et dans l'histoire de l'architecture. Cette partie repose sur plusieurs ouvrages de référence tels que *Bâtir en terre* ou *Terre crue comme matériau de construction*, et met en lumière les qualités de ce matériau : son faible impact environnemental, sa capacité à réguler l'humidité, sa résistance thermique et sa durabilité lorsqu'il est bien mis en œuvre. L'étude se resserre ensuite sur la ville de Lyon, à travers les travaux d'Emmanuel Mille et de Dorothée Alex, qui décrivent précisément l'évolution du pisé dans le contexte lyonnais, ses conditions d'emploi et les raisons de sa disparition. Ce travail historique met également en avant la figure de François Cointeraux, architecte et inventeur du XVIII^e siècle, dont les expérimentations ont profondément marqué la compréhension et la diffusion du pisé en France et à l'étranger.

La deuxième étape, **l'analyse des bâtiments contenant du pisé en région lyonnaise**, s'appuie sur des exemples précis pour observer les caractéristiques matérielles et structurelles du bâti existant. À partir du recensement effectué par Emmanuel Mille, cinq bâtiments lyonnais ont été étudiés pour comprendre comment le pisé se combine à d'autres matériaux tels que la pierre et le bois. Ces analyses montrent que les constructions en pisé ne sont pas des monolithes de terre mais des systèmes constructifs combinés. Le pisé est souvent employé pour les murs porteurs ou les pignons ³, tandis que la pierre constitue les soubassements² et les façades exposées, et que le bois est utilisé pour les planchers et la charpente. Cette association intelligente résulte d'une adaptation aux contraintes locales : humidité du sol, risque d'inondation, coût des matériaux, besoins thermiques et exigences réglementaires. Ces observations permettent d'introduire la notion de structure mixte, au cœur de la réflexion de ce mémoire. Le pisé, par sa plasticité et sa complémentarité, se révèle être un matériau capable d'intégration et d'évolution, plus qu'un symbole figé du passé.

2. Partie inférieure d'un mur, généralement en pierre ou en maçonnerie, destinée à protéger la construction des remontées d'humidité. (Larousse).

3. Partie supérieure d'un mur formant le bout d'un bâtiment, généralement triangulaire, supportant la toiture.

Ce travail d'analyse se poursuit par l'étude détaillée d'une maison construite par François Cointeraux, qui illustre à la fois la maîtrise technique et la vision innovante de l'architecte. Dans ses écrits, Cointeraux décrit la maison de Bresse et explique sa conception à partir d'un assemblage raisonné de terre, de pierre et de bois. Ses dessins et ses textes révèlent un souci d'économie, de durabilité et d'accessibilité, mais aussi une volonté de démocratiser l'usage de la terre à travers des procédés reproductibles. Il invente notamment la technique du *nouveau pisé*, ou *pisé par appareillage*, qui consiste à fabriquer des modules en terre moulés puis assemblés, permettant une mise en œuvre plus précise et plus rapide. Cette approche, déjà industrielle dans son esprit, témoigne d'une réflexion constructive qui dépasse son temps et préfigure des méthodes contemporaines.

La troisième et dernière étape du mémoire, **le prototype de colonne en pisé**, constitue la partie expérimentale et concrète du travail. Ce prototype est directement inspiré des colonnes dessinées par Cointeraux et met à l'épreuve ses principes constructifs à travers une fabrication réelle. L'expérimentation comprend la conception du moule en bois, la préparation de la terre, le moulage et l'assemblage des éléments, ainsi que l'articulation avec la base en pierre et le poteau en bois. Cette expérience de construction permet d'observer la matérialité du pisé et les contraintes liées à sa mise en œuvre, tout en vérifiant la cohérence du système constructif mixte. Elle permet également d'identifier les limites techniques du dispositif et d'explorer des pistes contemporaines pour y répondre, prolongeant ainsi la réflexion sur les adaptations nécessaires pour réactualiser les principes de Cointeraux. Le retour sur le chantier et les pistes d'évolution contemporaine développées à la fin du mémoire montrent que la logique constructive de Cointeraux, fondée sur la combinaison du pisé avec d'autres matériaux, reste aujourd'hui d'une actualité étonnante.

L'ensemble de cette démarche, mêlant recherche documentaire, analyse architecturale et expérimentation, a pour objectif de proposer une lecture renouvelée du pisé. Ce matériau, loin d'être une relique du passé, apparaît comme une ressource constructive capable de s'intégrer dans des projets actuels lorsqu'il est pensé dans une approche mixte et raisonnée. À travers la confrontation entre histoire et pratique, ce travail démontre que la pérennité du pisé dépend de sa capacité à dialoguer avec d'autres matériaux plutôt qu'à s'y opposer.

Ainsi, la réintroduction du pisé dans la construction contemporaine ne relève pas d'un simple geste de mémoire, mais d'une réflexion constructive et inventive sur les structures mixtes. Comprendre les principes de construction observés à Lyon et chez François Cointeraux permet de dégager une méthode et une vision : celle d'une architecture qui s'appuie sur les ressources

locales, qui valorise la matière et qui redonne à la terre crue une place légitime dans le paysage bâti actuel. Ce mémoire se situe dans cette continuité : il cherche à transformer un héritage en outil de conception, et à montrer que le pisé, par sa simplicité, sa cohérence et sa capacité à s'associer à d'autres matériaux, peut redevenir un acteur essentiel de l'architecture de demain.

1. Etat de l'art

Pour réaliser nos recherches et notre analyse sur l'hybridité des bâtiments et des constructions contenant du pisé, nous allons tout d'abord explorer la terre crue, et plus précisément la technique du pisé dans sa globalité, dans le contexte urbain et historique de la ville de Lyon.

Cette exploration se caractérise par une première étude générale du matériau pour comprendre ce qu'est la terre crue, comment elle est utilisée dans la construction et quelles sont ses caractéristiques. Pour trouver ces informations, nous allons nous appuyer sur des ouvrages tels que *Terre crue comme matériau de construction* et *Bâtir en terre*.

Dans un deuxième temps, nous allons nous pencher sur la ville de Lyon et ses alentours, ainsi que sur son histoire, pour comprendre l'impact qu'a eu ce matériau sur l'urbanisation et le développement de la ville. Nous nous apprêtons à faire un point sur la présence du pisé à différents moments de l'histoire, allant de l'époque romaine, passant par le Moyen Âge, par les inondations et le traumatisme que Lyon a subi, pour arriver jusqu'au XX^e siècle et aux vestiges que toutes ces périodes nous laissent aujourd'hui. L'histoire de la terre crue et du pisé dans la ville de Lyon est très bien décrite et documentée par Emmanuel Mille en 2023 dans sa thèse *Construire la ville en terre. Le pisé, matériau essentiel de l'extension urbaine de Lyon (XVe-XIXe siècles)*, dont nous allons nous servir pour trouver les informations nécessaires. D'autres ouvrages utilisés seront : *Récentes recherches en archéologie gallo-romaine et paléochrétienne sur Lyon et sa région* dirigé par Stephen Waiker, *Architecture de terre : histoire, culture et société* de Hubert Guillaud, *L'industrie de la brique crue dans la Colonia Lugdunum. Typologie, architectures de terre et de bois* (Actes du 2e Congrès archéologique de Gaule méridionale, réunis par J. Lasfargues), *Petit guide des architectures en pisé à Lyon* de Dorothee Alex. Le site PHIACC (Patrimoine et Histoire Industrielle, Agricole et Architecturale de Chazelles-sur-Lyon et alentours) et les Archives municipales de Lyon seront également utilisés dans le but de retrouver des informations et des documents sur les inondations des années 1800.

Ces études nous permettront de comprendre l'importance historique de la terre crue, l'évolution des techniques de construction en pisé et sa place au cœur des constructions lyonnaises dans le contexte d'une ville en expansion et en constante évolution. Les études historiques, comme celles sur l'époque romaine ou médiévale et sur les sources d'extraction, nous permettront de réaliser à quel point la terre crue est ancrée dans l'histoire de la ville. Les recherches sur les inondations qui ont touché Lyon et sur l'apparition et l'évolution des règles

d'urbanisme nous permettront de mieux comprendre l'intérêt constructif que les habitants lui ont accordé et leur capacité à adapter son usage et sa place dans les bâtiments contenant différents matériaux.

1.1 Etude générale du matériau :

Dans cette étude, nous allons nous intéresser à la définition de la terre crue dans le monde de la construction. Les informations qui nous intéressent sont les suivantes : quelle est la composition de la terre crue, quelles sont les différentes techniques de construction, quelle est sa place dans l'histoire de l'architecture, dans quelles régions du monde elle a été utilisée, et enfin, nous allons nous pencher sur la technique de construction du pisé en donnant sa définition globale.

1.1.1 Qu'est-ce que la terre crue et quelles sont les caractéristiques de ce matériaux

Dans la construction, la terre crue est un mélange d'eau, d'air et de grains du sol. Le sol de notre planète est organisé en plusieurs couches : le substrat rocheux non altéré, le substrat rocheux altéré, le sous-sol et les sols de surface. Les grains du sol qui nous intéressent se trouvent dans le sous-sol (*Terre crue comme matériau de construction*, p.12).

La terre prélevée au sous-sol peut être composée de cailloux, de graviers, de sables, de silts⁴ et d'argiles en différentes quantités. La qualité et les particularités des constructions en terre crue dépendent de l'équilibre des composants. Il est nécessaire que la terre ait la bonne teneur en eau et que sa composition soit adaptée à la construction. En fonction des différentes techniques de construction, des fibres organiques sont ajoutées (*Bâtir en terre*, p.102).

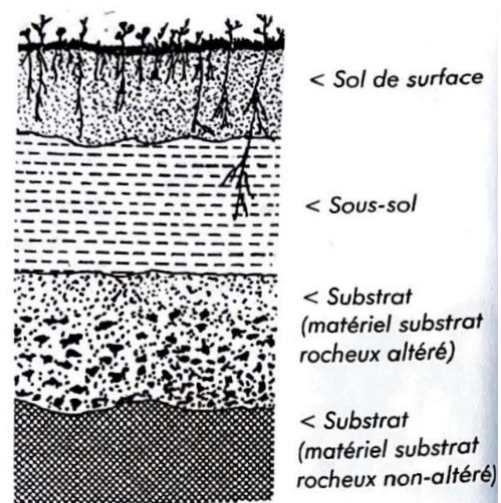


Figure 2 : Dessin : Couches de sol. Horizons et substrat rocheux. Terre crue comme matériaux de construction. Source : Duchaufour.

4. Particules fines du sol, de taille intermédiaire entre le sable et l'argile. (CNRTL).

Selon les techniques de mise en œuvre, les caractéristiques et les propriétés de la terre crue peuvent légèrement varier. D'une manière générale, c'est un matériau qui peut être porteur si on le compacte, il est résistant au feu, c'est un bon isolant thermique et acoustique et il a le mérite d'être un matériau biosourcé avec une empreinte carbone⁵ très faible.

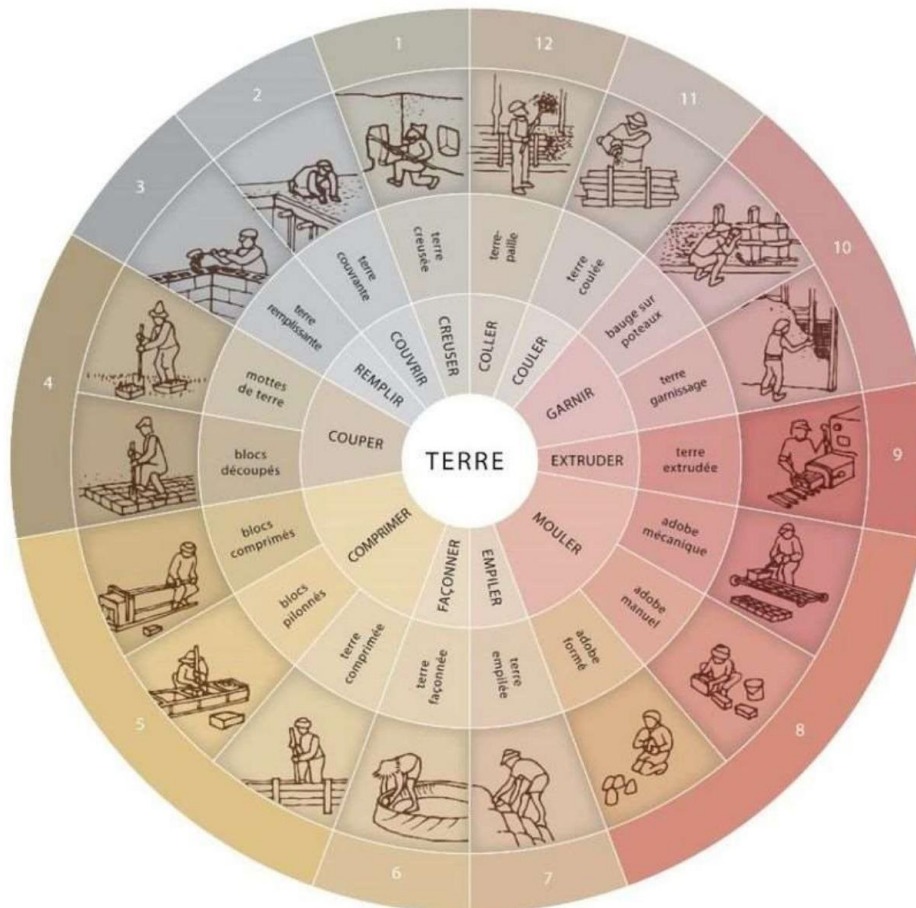


Figure 3 : Schéma : La roue des techniques. In. ANGER, Romain ; FONTAINE, Laetitia, 2009. Bâtir en terre : du grain de sable à l'architecture. Paris : Belin, Cité des sciences et de l'industrie. p. 26. ISBN 978-2-7011-5204-2. D'après HOUBEN, Hugo, GUILLAU. Source : CRAterre, 2009.

5. Quantité totale de gaz à effet de serre émise durant le cycle de vie d'un matériau ou d'un bâtiment. (ADEME).

1.1.2 La terre crue dans l'histoire de l'architecture

Dans l'histoire de l'architecture et du développement des civilisations, la terre a été très présente et a joué un rôle aussi important que d'autres matériaux selon les différentes régions du monde. Aujourd'hui, elle s'est presque effacée des paysages et de la liste des matériaux de construction. Elle représente à nos yeux un matériau du passé et du vernaculaire⁶. On s'imagine souvent que ce matériau a été utilisé seulement dans des zones sèches comme le désert, en le reliant également à la pauvreté. Quand on commence à se pencher davantage sur le sujet, on réalise que finalement la terre crue existe toujours : parfois cachée sous les enduits comme dans le cas des constructions en pisé à Lyon, parfois dans les bâtiments reconnus et mis en valeur par l'UNESCO⁷ comme les villes du désert au Yémen, d'autres fois oubliée comme dans le cas d'une portion de la muraille de Chine, et depuis quelques années, dans certaines nouvelles constructions d'architectes comme Rick Joy aux États-Unis ou l'agence Clément Vergély à Lyon.

Étant un matériau disponible, peu coûteux, facilement utilisable et qui assure un confort thermique exceptionnel, la terre crue a été utilisée à l'échelle mondiale et est également assez présente en France.

Dans les différents zones du monde ainsi que dans les différentes régions de France plusieurs techniques traditionnelles de construction en terre crue se sont développées en fonctions des besoins, des environnements, des conditions climatiques et des caractéristiques des terres. Les techniques les plus connues sont : le pisé, les blocs de terre comprimée (BTC), la bauge, l'adobe et le torchis.

6. Qualifie une architecture issue des traditions locales, utilisant des matériaux et des techniques propres à une région. (Larousse).

7. Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture, notamment chargée de la protection du patrimoine mondial. (UNESCO).



Figure 4 : Carte : Répartition du patrimoine architectural en terre crue. En orange, les régions de répartition des constructions en terre crue. Les points indiquent les principaux sites architecturaux inscrits au patrimoine mondial de l'Unesco. Source : CRAterre, 2009.

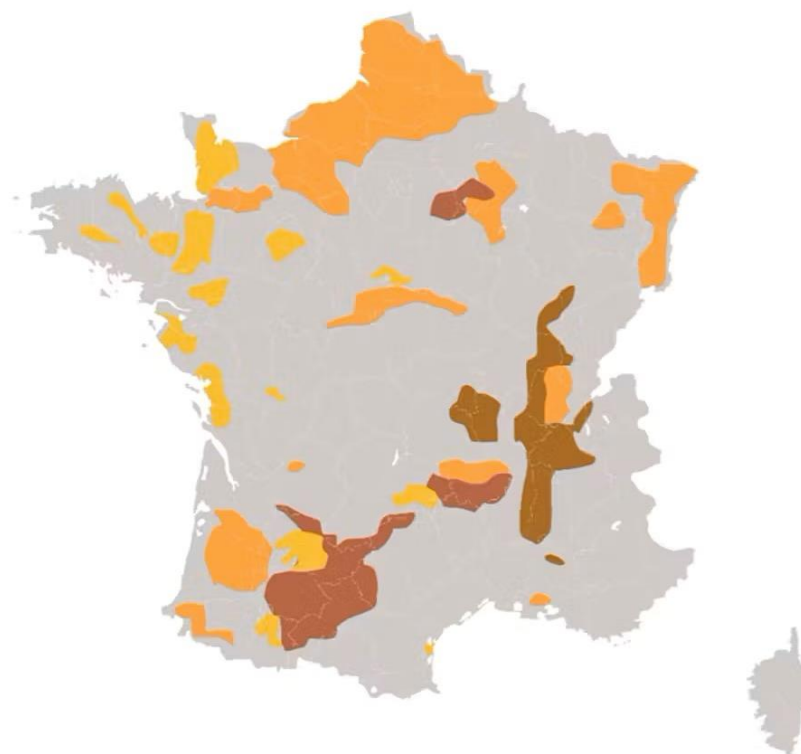


Figure 5 : Carte : Répartition du patrimoine architectural en terre crue. En orange : torchis, en marron : pisé, en jaune : bauge et en rouge : adobe. Source : CRAterre, 2009.

1.1.3 Le pisé

La région lyonnaise est un des endroits de France qui a conservé le plus de bâtiments en terre crue et en a construit beaucoup jusqu'à la période d'avant-guerre. Cette ville a aussi été pendant longtemps bâtie en grande partie en terre crue, ce matériau étant synonyme d'urbanisation et d'essor. C'est pour cette raison que nous allons nous concentrer sur Lyon et sur la technique de construction en terre crue qui y a été utilisée.

L'histoire du pisé à Lyon sera étudiée ultérieurement, mais avant, il faut comprendre ce qu'est le pisé. Le livre *Terre crue comme matériau de construction* explique très bien cette technique.

La terre employée doit être humide et composée d'un mélange graveleux. Cette technique consiste à couler la terre dans un coffrage par couches de 15 à 20 cm que l'on compacte. De nos jours, on utilise un pilon manuel ou mécanique, tandis que dans la technique traditionnelle, on parle plutôt du pisoir. On peut élever un mur en pisé jusqu'à 3 mètres, après quoi il doit être laissé sécher partiellement avant de continuer à construire au-dessus.



Figure 6 : Dessin : Pisé : la terre peu humide est compactée à l'aide d'une dame (pisoir) dans des coffrages en bois (banches). Arnaud Misse. Source CRAterre 2009.

1.2 L'histoire du pisé à Lyon

L'histoire du pisé à Lyon révèle la profondeur du lien entre la ville, sa géographie et ses matériaux. Suivre la trace de la terre dans la construction lyonnaise, c'est comprendre comment un matériau simple et local a accompagné le développement urbain pendant des siècles, jusqu'à devenir l'un des symboles de l'architecture populaire du XIX^e siècle.

Cette partie propose de retracer cette évolution, depuis les premières traces de terre crue dans les constructions antiques jusqu'à son apogée au XIX^e siècle, avant son effacement progressif au XX^e siècle. Elle mettra en évidence les contextes techniques, économiques et réglementaires qui ont façonné son usage, ainsi que les événements, comme les grandes inondations, qui ont profondément marqué son image et son avenir.

Ce travail s'appuie sur la thèse d'Emmanuel Mille, qui constitue une référence essentielle pour comprendre la place du pisé dans l'histoire urbaine lyonnaise. Ses recherches offrent une lecture précise des transformations du territoire et du rôle qu'a joué la terre dans l'extension de la ville. Les analyses de Dorothée Alex viennent compléter cette approche en apportant une observation fine du bâti encore existant, permettant d'identifier la matérialité et la diversité des constructions en pisé dans le tissu lyonnais.

Au fil de cette étude, nous pourrions également identifier une figure majeure : François Cointeraux, architecte et inventeur lyonnais, dont le travail a profondément influencé la compréhension et la mise en œuvre du pisé à son époque. À travers ses écrits et ses expérimentations, il a cherché à moderniser ce matériau tout en le rendant accessible, durable et adapté aux besoins d'une société en pleine transformation.

Ainsi, cette exploration historique ne se limite pas à un matériau, mais s'attache aussi aux regards croisés des chercheurs et des bâtisseurs qui ont contribué, chacun à leur manière, à transmettre et à réinventer le savoir-faire du pisé dans l'histoire de Lyon.

1.2.1 Les fondations romaines

Lyon est une ville qui évolue depuis l'Antiquité et qui a su traverser l'histoire en s'adaptant aux différents contextes et épreuves comme la peste, la guerre et les inondations. Son urbanisation et son expansion ont été fortement accompagnées par la présence des techniques de construction en terre crue depuis l'époque romaine. Comme le souligne Emmanuel Mille dans sa thèse, à Lyon, la terre crue est présente en tant que matériau de construction depuis l'époque romaine. À cette période, Lyon est connue sous le nom de Lugdunum, qui s'installe sur la colline de Fourvière, **sur les pentes de la Croix-Rousse** et sur la presqu'île. La ville atteint son apogée au II^e siècle avec une population estimée entre **500 000** et **80 000 habitants**.

Lugdunum se construit en utilisant principalement **la terre, la pierre et la chaux**. La pierre est utilisée pour la construction des bâtiments publics et d'intérêt général. Les murs des bâtiments publics mais aussi des habitations sont couverts d'un enduit de chaux. La terre crue est omniprésente dans l'architecture domestique.

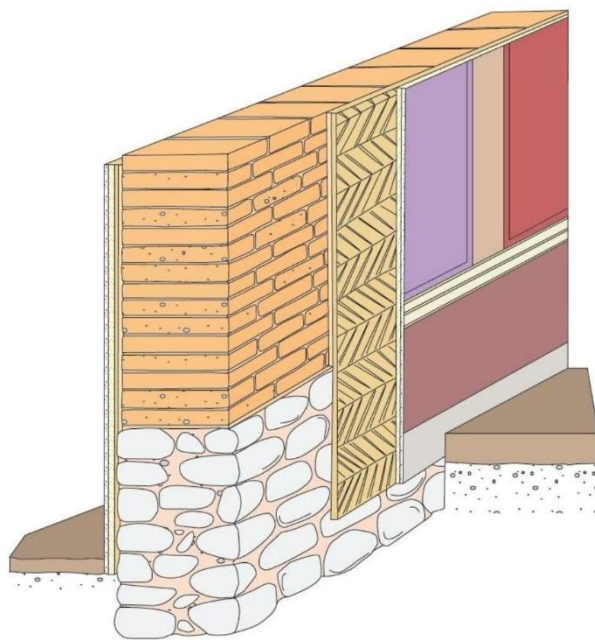


Figure 7 : Dessin : Restitution d'une maçonnerie porteuse en adobes sur solin⁸ de galets à Lyon, époque gallo-romaine. Source : Clément B. 2016 p. 359, d'ap. Desbat 1984, p. 40. (E. Mille)

Elle est utilisée principalement sous la forme de briques de terre crue et de torchis, notamment dans la structure des bâtiments.

Les nombreux travaux d'Armand Desbat et la thèse d'Emmanuel Mille décrivent les modes de construction des maisons : « Ainsi, des vestiges archéologiques ont montré que les murs de maçonneries porteuses étaient fréquemment faits de briques de terre crue sur un soubassement en pierre (granite ou galets), l'ensemble étant couvert d'un enduit de chaux » (*Construire la ville en terre*, p.47).

8. Bande ou assise de matériau placée au pied d'un mur pour empêcher les remontées d'humidité. (Dictionnaire d'architecture).

Dans l'un des volumes de *Récentes recherches en archéologie gallo-romaine et paléochrétienne sur Lyon et sa région*, dirigé par Stephen Waiker, il est mentionné que « certaines maisons assurément fort luxueuses étaient construites en **brique crue** ; ainsi une villa augustéenne (rue des Farges) dont les murs de brique crue supportaient des peintures de bonne qualité ; ainsi aussi, certaines villas à mosaïques avaient-elles des murs de terre. » (*Construire la ville en terre*, p.211). Cela montre qu'à cette époque la terre est destinée à l'architecture domestique de tous les niveaux sociaux.



Figure 8 : Photo : Détail d'une cloison en terre couvert d'enduits décorés, Lyon, Clos de la Solitude. Source : Clément B. 2016, p. 41 4) .Source : E. Mille

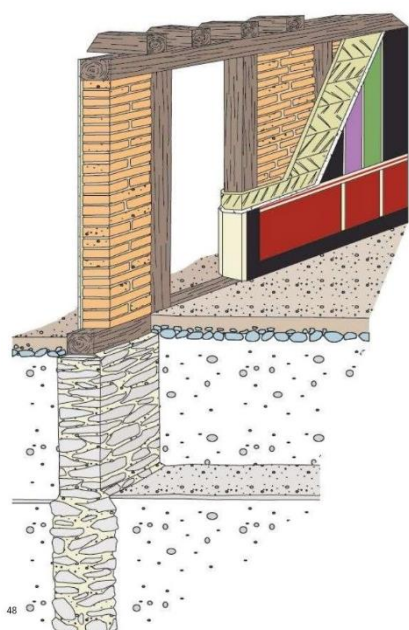


Figure 9 : Dessin : Cloison en structure bois et remplissage d'adobes couvert d'enduits décorés. Source Clément B. 2016, p. 399, d'ap. Desbat A. 1984, p. 41. Source : E. Mille

Dans les Articles présentés dans le cadre de l'Habilitation à diriger des recherches, *Architecture de terre : histoire, culture et société* de Hubert Guillaud, nous trouvons des informations plus approfondies concernant ces techniques. **Les briques de terre crue** apparaissent à Lugdunum au I^{er} siècle après J.-C., en remplaçant le clayonnage en torchis. Ces briques ont été retrouvées dans plusieurs zones du Lyon actuel (Hauts-de-Saint-Just, rue des Farges, montée de Loyasse, Verbe-Incarné). Les fouilles ont mis en évidence des techniques de construction datant de l'époque augustéenne⁹ : « Les habitats de ces époques augustéennes sont en **parois d'ossature bois remplies de briques crues** (fig.9) revêtues d'un enduit bicouche en terre et en chaux, peint » (p.10). Hubert Guillaud explique l'utilisation massive des techniques de construction en terre par l'impact des cultures constructives méditerranéennes et de l'urbanisation romaine de la Gaule.

9. Période correspondant au règne de l'empereur Auguste (27 av. J.-C. – 14 ap. J.-C.), marquant le début de l'Empire romain. (Histoire romaine).

Une des questions majeures porte sur **les sources d’approvisionnement en terres** employées pour la construction et sur leurs caractéristiques : où, comment et selon quels critères les terres sont-elles extraites, mais aussi comment sont-elles livrées sur les chantiers ?

L’ouvrage *L’industrie de la brique crue dans la Colonia Lugdunum. Typologie, approvisionnement et organisation de la production* donne des informations claires pour répondre à cette question. On trouve plusieurs sources et moyens d’extraction de la terre crue en fonction des besoins et de la taille et de l’importance des chantiers. Du fait du développement de la ville et du besoin de construire des habitations, l’extraction de terre crue était devenue une activité organisée et assez importante, adaptée aux contraintes des zones de construction. Les sources principales de terre étaient les bancs de lœss/lehm¹⁰ du *pomerium* de la ville, directement exploités depuis les parcelles à bâtir.

À Lyon, ont été retrouvées plusieurs grandes fosses¹² polylobées, comme la F146 qui mesure 12 m de longueur, 4 m de largeur et 2 m de profondeur pour une extraction de 120 m³ de terre. Il a été aussi retrouvé des tranchées¹¹ comme la F147 permettant d’extraire 110 m³ de terre. Parmi les découvertes les plus impressionnantes figure celle d’une galerie¹³ souterraine, accessible par un puits, qui s’étend sur 12 m de long à 4 m sous les niveaux de construction.

Pour certaines constructions, étaient privilégiées les extractions ponctuelles sur les chantiers de construction, comme pour l’exemple du *Domus au Faune flûteur*. Les briques utilisées pour la construction du *Domus* ont été confectionnées grâce à 10 m³ de terre prélevée dans une fosse se trouvant sur le site.

Ces traces antiques montrent que la terre n’était pas seulement un matériau de substitution, mais bien une ressource constructive ancrée dans les pratiques locales dès la fondation de la ville. En associant la pierre, le bois et la terre, les bâtisseurs de Lugdunum ont posé les bases d’une tradition constructive adaptée à la topographie et aux ressources du territoire. Cette logique d’association, déjà présente à l’époque romaine, se poursuit discrètement au fil des siècles et réapparaît sous d’autres formes au Moyen Âge, où la terre conserve sa place dans le tissu lyonnais malgré la rareté des sources.

10. Dépôt meuble de limons éoliens (lœss) ou terre limono-argileuse compacte (lehm), souvent utilisé comme matériau de construction. (Géologie).

11. Fouille linéaire creusée pour observer les couches du sol et repérer des structures anciennes. (Archéologie).

12. Fosses d’extraction présentant plusieurs renflements (« lobes »), caractéristiques de certains sites gallo-romains. (Archéologie)

13. Couloir creusé dans le sol pour extraire de la terre, de la pierre ou d’autres matériaux. (Archéologie minière).

1.2.2 Du Moyen Âge au XVIII^e siècle : une présence discrète mais constante

Après la période antique, l'usage de la terre crue à Lyon se poursuit de manière plus discrète. Entre le Moyen Âge et le XVIII^e siècle, les traces matérielles sont peu nombreuses. La terre reste utilisée pour des **constructions modestes**, adaptées aux ressources locales et aux contraintes économiques de l'époque.

Les sources concernant l'utilisation de la terre crue au Moyen Âge sont rares, mais quelques vestiges datant du XIV^e siècle confirment la présence de ce matériau dans les constructions médiévales. La poursuite de l'utilisation de la terre serait aussi cohérente avec le manque d'autres matériaux de construction à proximité du site et le coût élevé dû au transport.

L'ouvrage *Architectures de terre et de bois* (Actes du 2^e Congrès archéologique de Gaule méridionale, réunis par J. Lasfargues) explique que la terre, et plus précisément le pisé, a eu une place équivalente aux constructions en bois au Moyen Âge. Le manque de témoins est dû à la **courte durée de vie** des constructions en terre : « Cependant, plus encore que celui-ci, elle échappe à l'observation : il ne faut guère compter en retrouver des témoins anciens en place, la durée d'une maison de terre étant quand même limitée et inférieure au siècle » (p.67).

Nous retrouvons, comme mentionné auparavant, des sources rares qui prouvent l'utilisation de la terre crue à Lyon à l'époque médiévale, et l'une de ces sources est *Lyon, les dessous de la Presqu'île*, sous la direction de Catherine Arlaud. Dans cet ouvrage, les archéologues et les chercheurs parlent de l'aménagement de parcs souterrains de stationnement au cœur de la Presqu'île lyonnaise à la fin des années 1980, notamment sous la place des Terreaux.

À la page 351, il est mentionné que l'aménagement d'un **grand fossé sur la place des Terreaux** « provoque la démolition des maisons situées *extra muros*¹⁴. Ces habitats, dont les élévations étaient heureusement sauvegardées sous le glacis¹⁵ sur environ 2 à 3 m de hauteur, ont révélé pour la première fois **des techniques de construction en pisé durant le Moyen Âge** ». (fig.10)

Ces rares indices laissent entrevoir une continuité silencieuse de la construction en terre à Lyon. Ce savoir-faire, transmis sans traces abondantes, prépare pourtant le terrain à une véritable reconnaissance au XIX^e siècle, lorsque le pisé devient un acteur majeur de l'urbanisation lyonnaise.

14. Expression latine signifiant « hors des murs », se référant à une zone située à l'extérieur de l'enceinte urbaine. (Latin).

15. Talus incliné au pied d'un mur ou d'une fortification, améliorant la stabilité et l'écoulement de l'eau. (Architecture militaire).



Figure 10 : Photographie : Claude Essertel / fonds Lyon Figaro, Bibliothèque municipale de Lyon, coll. « Photographes en Rhône-Alpes », Numelyo. Source : Archives de Lyon.

1.2.3 Le XIX^e siècle : l'âge d'or du pisé et l'essor de la Croix-Rousse

Le XIX^e siècle marque l'âge d'or du pisé de terre et, par la même occasion, le développement de nouveaux quartiers, notamment sur **les pentes de la Croix-Rousse, où l'urbanisation est étroitement liée à la terre crue.**

Cette période coïncide avec **l'essor industriel et démographique** de la ville. La Croix-Rousse, qui se démarque par les canuts, attire les ouvriers et devient un quartier de la fabrication de la soie, mais aussi un quartier populaire. **Le besoin de construire en masse, rapidement et à bas coût**, fait de la terre crue, extraite des alentours, l'un des matériaux les plus employés. Le pisé de terre est largement utilisé pour **la construction de logements, d'ateliers et de bâtiments industriels.**

« Ces résultats témoignent aussi d'une grande diversité architecturale du bâti recensé, avec des immeubles de grande hauteur, des maisons et de petits immeubles, des édifices publics, des bâtiments industriels, riches demeures périurbaines » (*Construire la ville en terre*, 2016, p.62-73).

L'emploi du pisé de terre est présent sur l'ensemble de la ville de Lyon au début du XIX^e siècle et accompagne son développement.

Dans la thèse d'Emmanuel Mille, on retrouve le recensement de différentes constructions en pisé de terre qui sont restées dans l'ombre durant plusieurs décennies. Une des raisons de leur **invisibilité** a été **l'enduit** dont les façades sont traitées et qui commence à tomber, usé par le temps. Une autre raison est l'utilisation de **différents matériaux au sein d'un même bâtiment**. Souvent, la façade sur rue des immeubles a été construite en pierre et cache la présence de la terre à l'intérieur.

Au cœur de cet essor, une figure se distingue par son engagement et ses recherches autour du pisé : **François Cointeraux**. Par ses écrits, ses inventions et ses expérimentations, il donne à la terre crue une dimension nouvelle, cherchant à la rendre plus durable, plus technique et accessible à tous.



Figure 11 : Photo : Mur pignon d'un immeuble construit en pisé de terre, vers 1870 ,43 rue Coste à Caluire-et-Cuire, Plateau de la Croix-Rousse. Source : E. Mille, CRAterre-ENSAG, Le pisé en milieu urbain : l'exemple lyonnais, plateforme Satché.

1.2.4 François Cointeraux

L'un des plus **grands architectes pionniers et inventeurs des constructions en pisé** dans les années 1800 a été François Cointeraux. Il est né en 1740 en région lyonnaise et décédé en 1830. Initialement maître-maçon, il devient architecte autodidacte durant la période de l'industrialisation et se proclame « architecte rural » ou « professeur d'architecture rurale ».

Dès son plus jeune âge, il est introduit à **la maçonnerie et à l'agriculture** par son oncle, Nicolas Fauconnet, qui est à la fois maçon et exploitant d'un domaine agricole. Plus tard, il devient l'élève de l'architecte Léonard Roux, dans le but d'étudier le dessin, la perspective et la sculpture. Il développe également des compétences dans la réalisation de peintures à fresque et de trompe-l'œil.

Il commence sa vie professionnelle à Lyon et à Grenoble en tant **qu'entrepreneur en bâtiments en pierre de taille et en pisé**. Il finit par devenir expert et arpenteur juré de la ville de Lyon. Durant cette période de sa vie, il réfléchit aux usages du pisé et aux nouvelles techniques de construction et de mise en œuvre.

Son invention la plus emblématique est le « **nouveau pisé** » ou « **pierres moulées** ». (fig.12 et 13) Elle consiste à produire des séries de modules en terre comprimée mécaniquement grâce à une machine : un coffrage formé de deux banches parallèles et de closoirs contenant un système de pression. Il obtiendra un brevet plus tard, en 1807, pour cet instrument nommé *crécise*.

Le *crécise* lui permettra de développer d'autres inventions et techniques de construction, comme le *nouveau toit* (fig. 14 et 15), les colonnes en pisé et les moulures.

Il déménage à Paris en 1788 après avoir été récompensé en 1787 par l'Académie d'Amiens pour un projet de bâtiments agricoles incombustibles en pisé. À Paris, il continue de travailler sur des projets jusqu'à la Révolution, **ouvre des écoles et commence à écrire et à produire des documents graphiques** pour répandre son savoir sur le pisé (*Le pisé : Ô ma divine maîtresse !*, p.2-4).

Il insiste, dans plusieurs de ses écrits, sur son intérêt pour le pisé et sur le lien qu'il fait entre architecture et agriculture. Son objectif est de **rendre l'architecture plus accessible, économique et durable grâce à la terre crue**. Cet intérêt pour le matériau et ses objectifs architecturaux le mènent à devenir inventeur, écrivain et professeur. À partir de 1790, il publie

environ **60 brochures et traités**, traduits parfois en **huit langues**. Il développe des méthodes et des outils pour faire évoluer et faciliter la construction en pisé, comme *Le nouveau pisé*.

Il ouvre également son école d'architecture à Lyon, Paris et Grenoble pour apprendre à des artisans et agriculteurs à construire eux-mêmes (*The Art of Earth Architecture*, p.308-310). C'est ainsi qu'il est considéré aujourd'hui comme **le premier architecte de l'histoire à avoir étudié, enseigné et pratiqué une forme moderne d'architecture en terre**. Il est également vu comme un visionnaire grâce à son esprit pionnier, qui le pousse à promouvoir une auto-construction durable (*The Art of Earth Architecture*, p.308).

Tout au long de cette étude, nous allons nous appuyer sur ses écrits et les documents graphiques qu'il a produits pour comprendre la réalité de la construction du pisé et les progrès réalisés dans les années 1800.

L'héritage de François Cointeraux dépasse son époque : ses recherches et ses écrits ont contribué à une meilleure compréhension des qualités constructives de la terre et de ses potentialités locales. Pour prolonger cette réflexion, il devient essentiel d'observer la provenance même de cette matière et la manière dont elle a façonné le territoire lyonnais.

Les Inventions et le travail de François Cointeraux

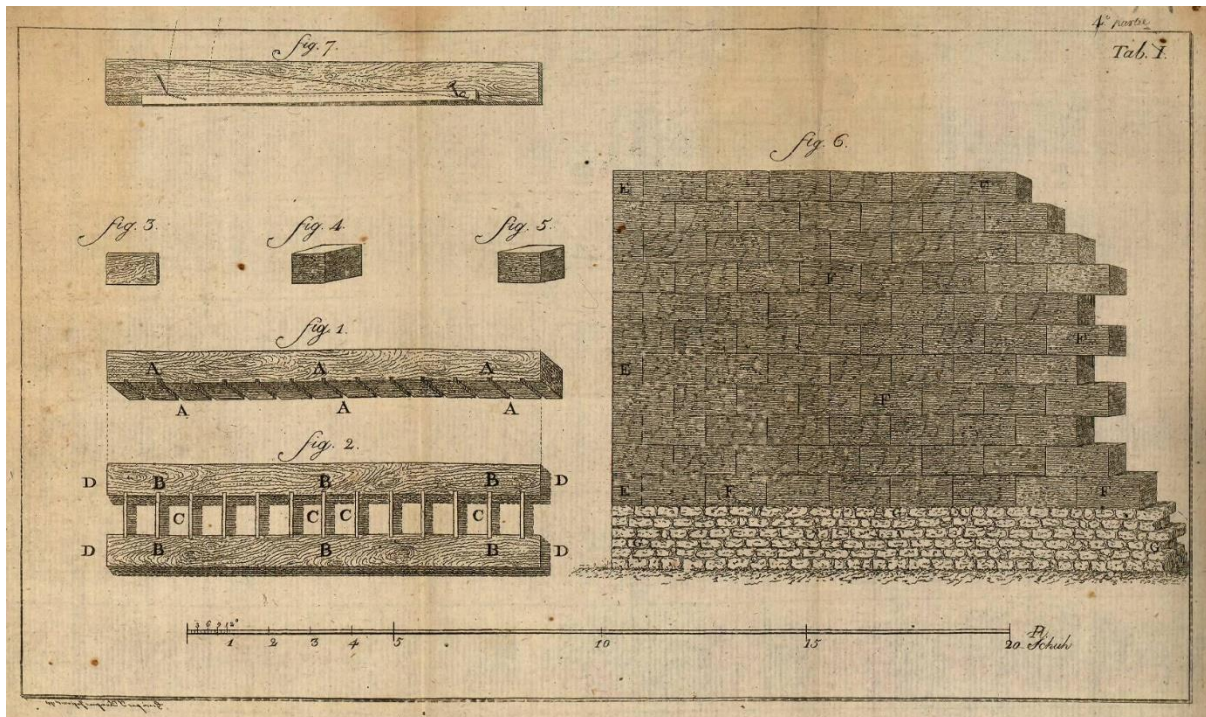


Figure 12: Dessin : Planche du “nouveau pisé” montrant les dispositifs de coffrage (fig. 1–2), modules moulés (fig. 3–5) et principe d’élévation en terre appareillée (fig. 6). Source : François Cointeraux, École d’architecture rurale, 4^e cahier, Tab. I, 179.

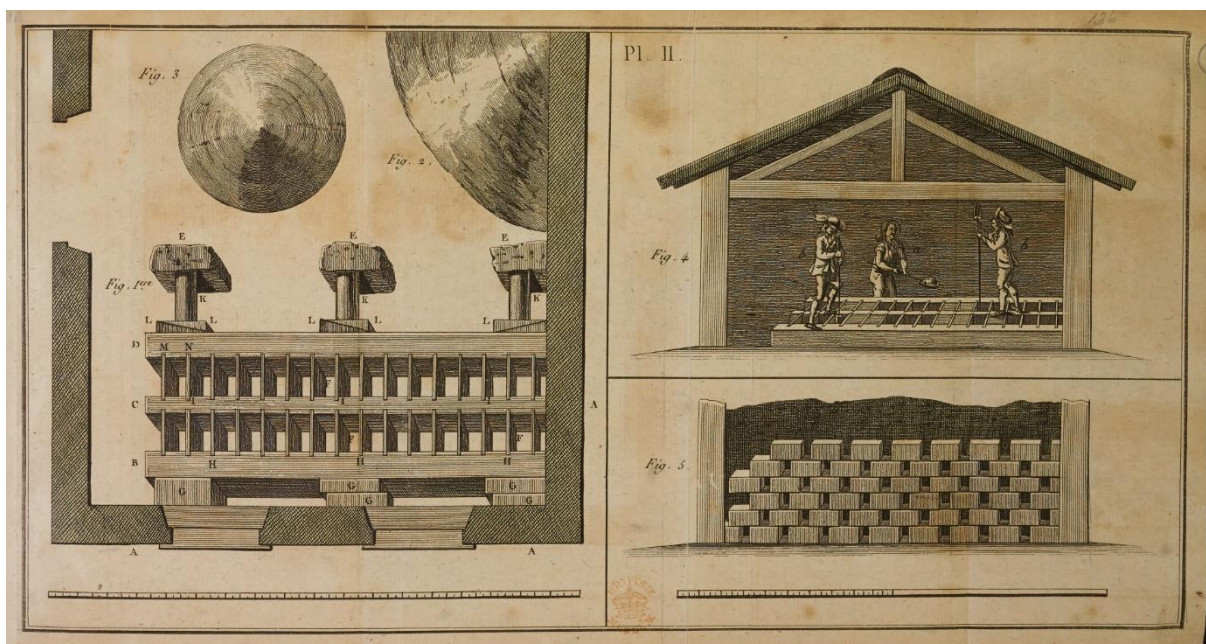


Figure 13 : Dessin : moule à compartiments pour les “pierres moulées” du nouveau pisé (fig. 1–3), et à droite, la mise en œuvre (fig. 4–5). Source : François Cointeraux, École d’architecture rurale, Quatrième cahier, Pl. II, 1791.

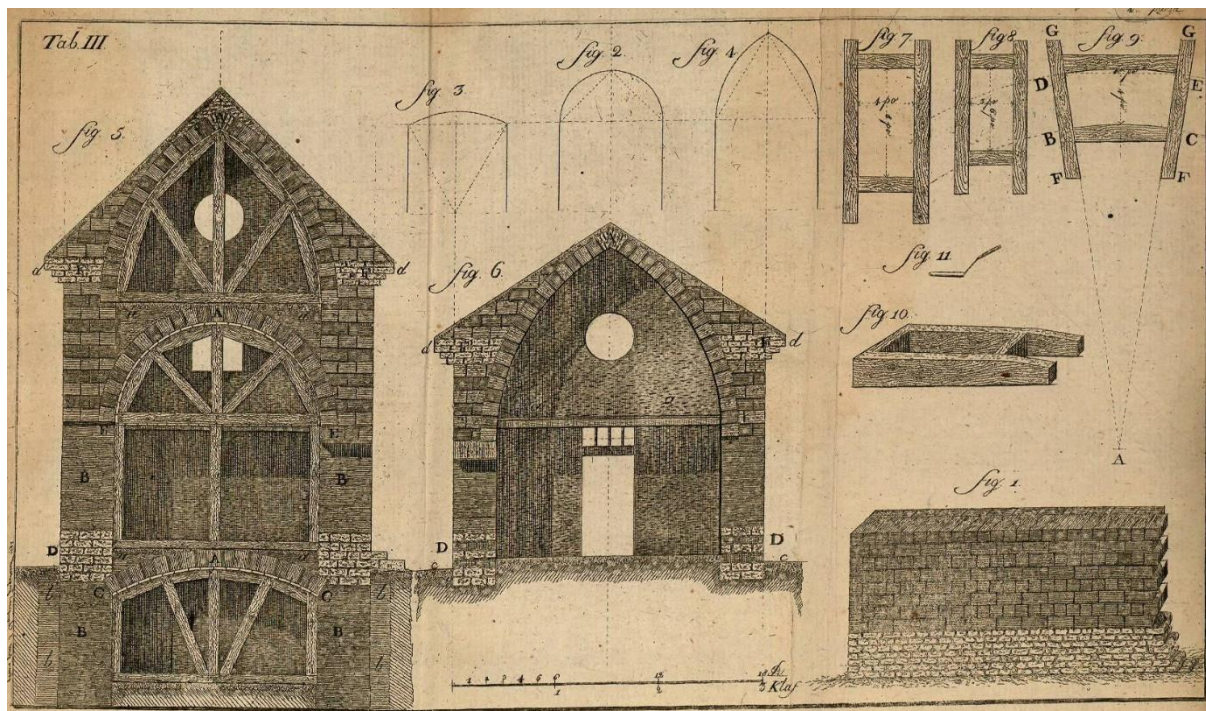


Figure 14 : Dessin : Bâtiment rural incombustible en pisé avec élévations, voûtes et cadres de coffrage (Tab. III). Source : François Cointeraux, École d'architecture rurale, premier cahier, seconde édition, Planche III, 1793, CNAM.

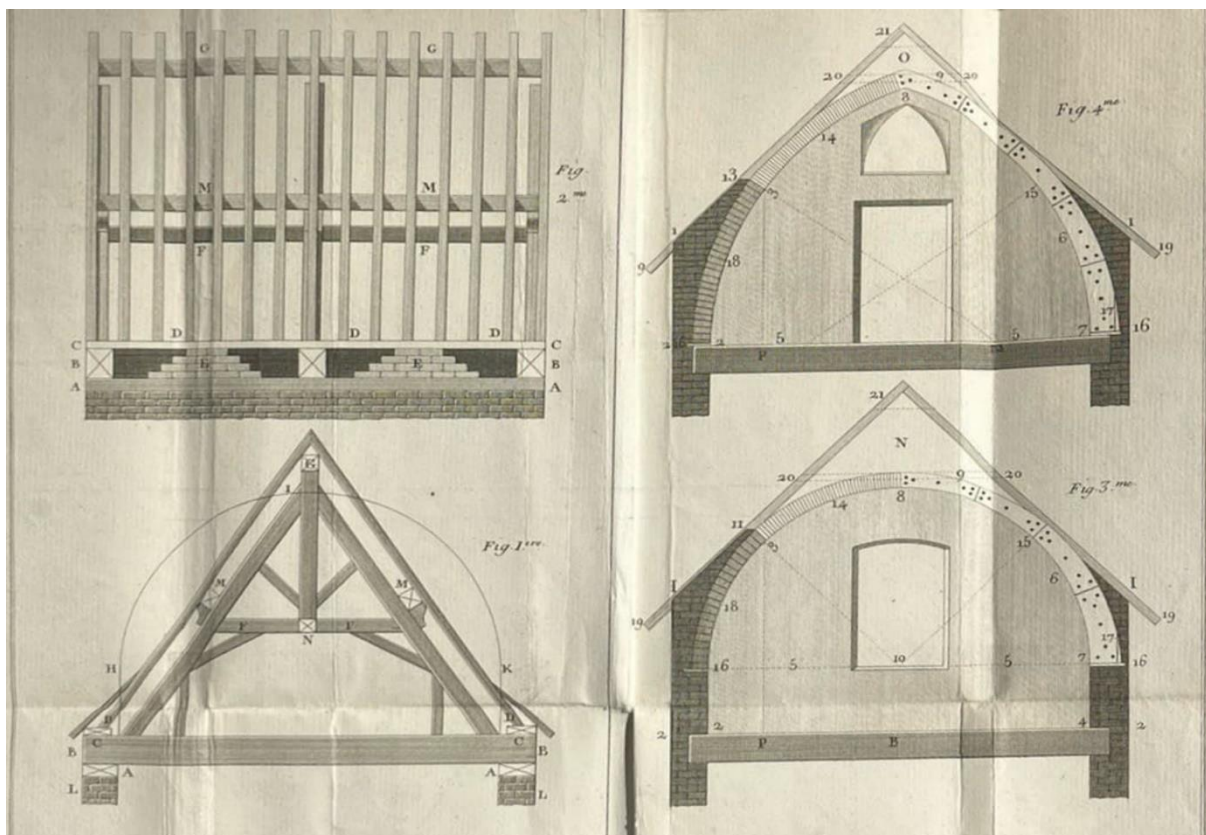


Figure 15 : Dessin : Schémas du "nouveau toit" incombustible, montrant la charpente triangulaire (fig. 1), la structure porteuse en bois (fig. 2) et la voûte de couverture en terre (fig. 3-4). Source : François Cointeraux, Aux maçons et charpentiers des villes et des villages, Paris, 1790, Scan de l'auteur.

1.2.5 Les sources de terre : un approvisionnement local et diversifié

La question de l'approvisionnement en terre est essentielle pour comprendre la logique constructive du pisé à Lyon.

Comme le souligne Emmanuel Mille, la terre utilisée pour le pisé à Lyon provenait de **sources locales et diversifiées**, comme les excavations dues à la construction de fondations, de caves ou de vides sanitaires. À la page 33 du guide *La construction en pisé* de Paulin et Jean-Baptiste, il est indiqué que la terre utilisée pour le pisé pouvait provenir **des excavations** suite à la création des infrastructures d'un bâtiment. Le volume représente approximativement la cubature des murs. **L'extraction sur site** permettait de valoriser cette terre mais aussi de réduire complètement les coûts de transport. Le besoin de ramener de la matière sur le chantier, mais aussi de l'évacuer, disparaissait avec le emploi de la terre pour la construction du pisé.

D'autres sources d'approvisionnement en terre ont été identifiées, comme **les travaux de terrassement** d'îlots ou de rues. À Lyon, ce emploi a été observé notamment à la Croix-Rousse, mais il est très courant d'observer cette manière de s'approvisionner en terre dans d'autres régions du monde où la terre crue est utilisée dans le domaine de la construction.

Nous allons maintenant nous intéresser à la situation géographique de la ville et aux particularités de celle-ci, qui ont eu une grande influence sur l'évolution du pisé au sein de Lyon.

1.2.6 Les inondations et l'évolution de la réglementation

Le positionnement géographique de la ville de Lyon la rend vulnérable aux inondations. Bien qu'elles n'aient pas empêché la ville de croître et de se développer, elles ont causé des destructions et des traumatismes dont le pisé a été victime.

Les inondations de **1840** et surtout celles de **1856** ont laissé une forte empreinte sur l'urbanisme de la ville et sur ses réglementations. **L'effondrement de nombreuses constructions** suite à ces crues dévastatrices a mis en évidence la vulnérabilité des bâtiments en pisé face à l'eau. Les Archives municipales de Lyon gardent des traces et des informations précises sur ces inondations et leurs dégâts. (fig.16 et17)

La crue de 1840 a impacté principalement les quartiers situés en bord du Rhône. Les bâtiments ont subi des infiltrations d'eau et **les constructions en pisé ont été fissurées**. À la page 16 du *Petit guide des architectures en pisé à Lyon*, les auteurs informent que les autorités ont tenté de **limiter, voire d'interdire, le pisé par un décret imposant la construction d'un soubassement de 1,50 m en pierre** pour tout bâtiment en pisé, et **limitant sa hauteur à 5 m**.

La crue du 31 mai 1856 a été une véritable catastrophe urbaine pour la rive gauche du Rhône. **La digue de la Tête d'Or cède**, une puissante vague emporte la vie de 18 personnes et provoque **l'effondrement de 1 185 maisons en pisé**, selon le site du PHIACC.

Suite à ce drame, l'arrêté préfectoral du 19 juin 1856 est imposé par la ville. Il stipule :

« En conséquence, il ne sera plus à l'avenir élevé, dans toute l'étendue de l'agglomération lyonnaise, de constructions autres qu'en bonne maçonnerie de chaux et de sable. » (*Petit guide des architectures en pisé à Lyon*, p.17)

La disparition du pisé, forcée par le traumatisme des inondations et par les autorités, entraîne l'exode des classes populaires de Lyon vers les banlieues et favorise la précarité et l'insalubrité. Les quartiers détruits sont reconstruits en pierre et en brique par la bourgeoisie, qui peut se permettre le coût de ces matériaux.

Ces inondations répétées poussent la ville à **construire et renforcer des digues**, et en 1872 un **nouveau décret** est établi. **Il autorise à nouveau la construction en pisé, mais impose une réglementation plus stricte**, comprenant par exemple **un soubassement de 2 m en pierre et des enduits imperméables**.

La fin du XIX^e siècle est marquée par le début de **l'ère industrielle** et l'apparition de nouveaux matériaux de construction. Emmanuel Mille et Dorothée Alex notent que **le béton armé et la brique** s'imposent progressivement grâce à leur résistance à l'eau et aux incendies, **éloignant la terre crue** et le bois du domaine de la construction. L'apparition des voies ferrées facilite le transport des matériaux et participe à la baisse de leur coût.

Les crues du XIX^e siècle et les décrets qui s'ensuivent transforment durablement les pratiques. Au XX^e siècle, avec l'essor du béton et de la brique, la terre se fait de plus en plus discrète, masquée sous les enduits ou effacée par les reconstructions.



Figure 16 : Photo : Inondation du Rhône, à Lyon : avenue de Saxe ; l'église Saint-Pothin en arrière-plan, vers juin 1856 : contretype d'une épreuve / d'après un cliché Louis Froissart. Source : Archives municipales de Lyon, cote 3PH/597.



Figure 17 : Photo : Inondation du Rhône, à Lyon : dégâts : rue Madame (actuellement rue P. Corneille), 9 juin 1856 / cliché Louis Froissart. Source : Archives municipales de Lyon, cote 3PH/598.

1.2.7 Le XX^e siècle : l'oubli progressif

Le pisé devient, au début du XX^e siècle, **un signe de pauvreté**, et les bâtiments en pisé sont considérés comme insalubres, vétustes et inconfortables. La bourgeoisie, qui prend progressivement la place des ouvriers dans la ville, prône l'emploi de matériaux « nobles » comme la pierre, ou modernes comme le béton.

Le pisé subit alors un effacement urbain par deux moyens : **la démolition et le masquage**.

Beaucoup de bâtiments en pisé sont détruits à partir du XX^e siècle en raison du manque d'intérêt pour ce matériau, du **désir de modernisation** de la ville et de la dévalorisation de ces immeubles. Sur la rive gauche du Rhône, de nombreux bâtiments en pisé ont été détruits au profit de l'extension du quartier d'affaires de la Part-Dieu. Peu à peu, d'autres bâtiments disparaissent, remplacés par des constructions plus rentables et plus en accord avec le développement économique de la ville. Nous voyons la trace de certains et nous assistons à leurs démolition grâce aux recensement faits par Anne-Sophie Cléménçon et Dominique Bertin au début des années 1980. On remarque donc que ces bâtiments continuent à être supprimés du paysage.

Une autre raison de l'effacement du pisé depuis le début du XX^e siècle est **son invisibilisation**. Les façades en pisé sont recouvertes de chaux ou de ciment pour répondre aux normes esthétiques bourgeoises et augmenter leur résistance à l'eau.

Malgré cet effacement, des repérages et études patientes permettent de retrouver des traces précises du pisé à Lyon : recensements d'Emmanuel Mille, relevés plus anciens (Cléménçon, Bertin), observations de terrain. Ce travail rend visible ce qui était resté caché et offre une base solide pour dresser l'inventaire.

Etude réalisé par Emanuel Mille sur la démolition des pavillons de la cité Philippe de la Salle



Figure 18 : Illustrations 276, 277 et 278 : Évolution de la cité Philippe de la Salle au XXe siècle. Soirce : E. Mille.

A gauche : situation vers 1920 : aménagement de la voirie et construction des premières maisons groupées (d'ap. AML 5s)

Au milieu : état en 1947 (source : géoportail)

A droite : état actuel, après remplacement des pavillons par des immeubles vers 1970.



Figure 19 : Photos 279 et 280 : vue des pavillons de la cité Ph. De la Salle vers 1970, avant leur démolition, photo : P. Clavel.
Sources : fonds en ligne de la Bibliothèque Municipale de Lyon.

1.2.8 Recensement des bâtiments en pisé à Lyon

Le travail et recensement des bâtiments en pisé à Lyon a été mené par Emmanuel Mille, qui a également produit une carte.

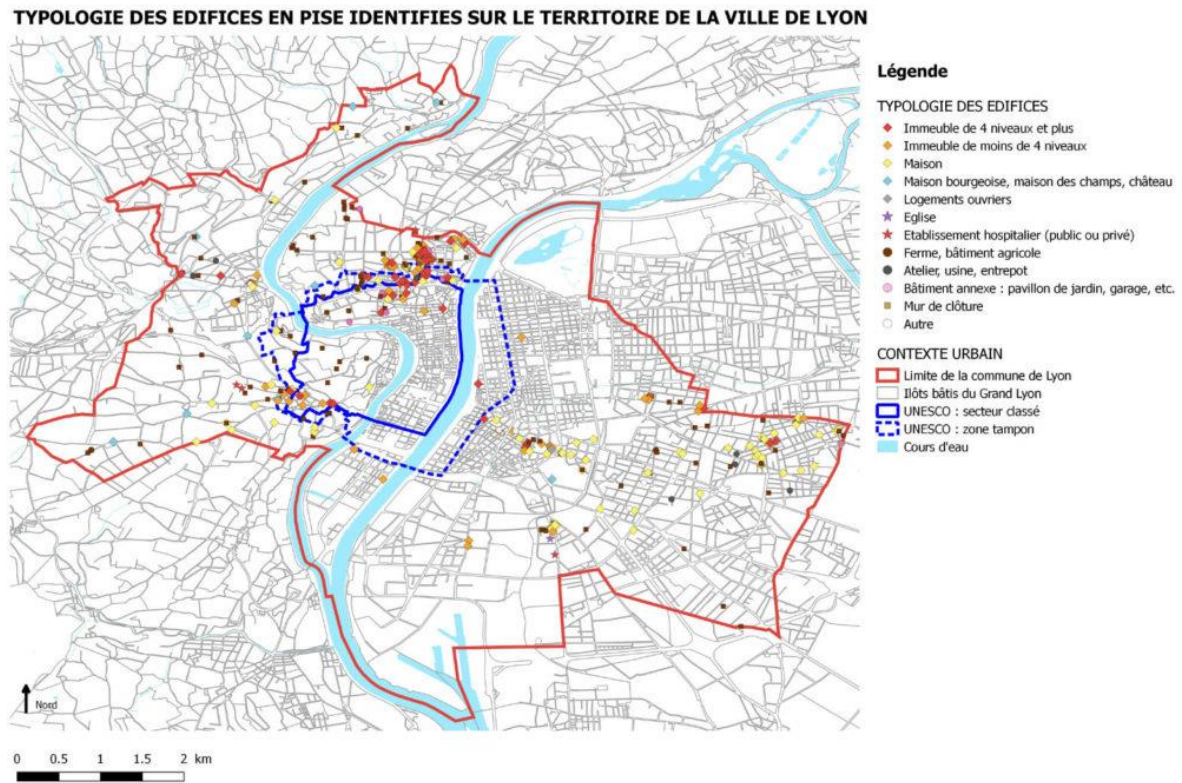


Figure 20 : Carte : Localisation et catégories du corpus bâti sur le territoire de la commune de Lyon. Sources : Carte : E. Mille, CRATERre-ENSAG. Fond de carte : Métropole de Lyon, Agence d'urbanisme.

Cette carte permet de voir **la grande présence** de ces bâtiments dans la région lyonnaise et la concentration des constructions dans certaines parties de la ville. Cela est lié aux périodes de construction, mais aussi à leur **situation topographique**, qui leur a permis d'éviter les inondations.

2. Analyse des bâtiments contenant du pisé en région lyonnaise

Pour mieux comprendre l'utilisation du pisé à Lyon, j'ai cherché des écrits et des documents graphiques qui montrent **différentes techniques de construction, les outils employés, mais aussi les progrès atteints dans le domaine du pisé dans les années 1800**, avant l'arrêt de l'utilisation de la terre crue dans le monde du bâtiment. Toutes les informations qui composent mon étude sont tirées de plusieurs écrits de François Cointeraux, des analyses de Dorothée Alex et d'Emmanuel Mille, ainsi que du livre *L'art de bâtir en terre* de Jean Dethier.

Les écrits de François Cointeraux permettent de faire ressortir des techniques traditionnelles grâce à des descriptions du déroulement des chantiers, des processus de construction de certains bâtiments et de leur architecture. Un autre point intéressant est son statut d'inventeur, clairement visible dans ses œuvres, car il a rédigé des essais et des textes dans lesquels il fait part de ses nouvelles inventions. Cela nous permet de voir les avancées techniques dans la construction du pisé.

Dorothée Alex a écrit un mémoire intitulé *Petit guide des architectures en pisé à Lyon* en 2011 et Emmanuel Mille a rédigé la thèse *Construire la ville en terre – Le pisé, matériau essentiel de l'extension urbaine de Lyon (XVe-XIXe siècles)* en 2023. Leurs travaux recensent et décrivent des bâtiments en terre crue dans la région lyonnaise et parlent des méthodes de construction en pisé.

Le livre *The Art of Earth Architecture* nous apporte des informations supplémentaires sur l'impact de François Cointeraux à l'échelle nationale et internationale. Il énonce également, brièvement, les techniques de construction hybrides.

Dans cette analyse de documents écrits et graphiques, je vais présenter premièrement les techniques et le processus de construction en pisé observés à Lyon et les outils nécessaires. Par la suite, je composerai une description des bâtiments en pisé et de l'ensemble du patrimoine en terre crue à Lyon. L'objectif sera de comprendre la réalité du terrain et du processus de construction, de créer une image claire de ce qu'est ou de ce que peut être un bâtiment en pisé, et de décortiquer les différents éléments qui composent ces constructions en terre ainsi que les matériaux qui les accompagnent.

Nous allons nous servir de cette analyse, dans un second temps, pour créer une idée précise des différents matériaux employés pour accompagner la terre crue, leur importance et leurs fonctions. De ce constat surgira la notion de bâtiment hybride, en termes de matérialité, ou de structure mixte.

2.1 Analyse de la matérialité de cinq bâtiments contenant du pisé et toujours existants à Lyon

Nous allons nous pencher sur une analyse plus rapide de cinq bâtiments de Lyon. Cette analyse prendra la forme d'une liste de bâtiments construits en, ou avec, du pisé. L'objectif sera **d'observer la matérialité des constructions, le rapport entre la terre et les autres matériaux**, généralement la pierre, et la place qu'ils occupent dans chaque bâtiment. Cela nous aidera à constituer une image plus claire de la réalité matérielle du patrimoine lyonnais en terre crue.

Je vais me concentrer uniquement sur **des immeubles encore existants**, ce qui veut dire qu'ils datent plutôt des années 1800. Ce choix est fait car les informations peuvent être vérifiées et les immeubles visités, mais aussi parce que ce sont les derniers bâtiments construits en pisé que l'État a tenté d'encadrer par des règles d'urbanisme. Ces immeubles ont survécu 200 ans et représentent l'avancement ultime des techniques de construction en pisé de l'époque. Les recensements des constructions d'Emmanuel Mille se sont avérés très utiles pour la constitution de notre liste.

Localisation et photos	Descriptions
23, 25, 27 rue du Mail  <i>Figure 21 : Photo : Immeubles situés aux 23, 25 et 27, rue du Mail (CL-178, 179 et 180). Etat des murs mitoyens après démolition des bâtiments des n°25, n°23 et 27 (photo : A-S. Cléménçon). Source : E. Mille</i>	Les immeubles sont édifiés dans les années 1840. La découverte du pisé a été faite en 2017, suite à la destruction du bâtiment du 25 rue du Mail. Les immeubles comptent de 3 à 4 niveaux. Dans les pignons sud du 27 rue du Mail, la pierre est détectée dans les chaînages d'angle¹⁶ et constitue également le soubassement, qui représente toute la hauteur du rez-de-chaussée. Il est plus haut sur rue que sur cour. Les façades sur rue et sur cour semblent être en pierre, et le reste des pignons est en pisé. On constate également la présence du bois sur certaines zones des pignons, et les planchers semblent être en bois (<i>Mille</i>, p.224-228).

27 impasse Gigodot (CL 131)



Figure 22 : Photo : Façade de l'immeuble-atelier du 27 impasse Gigodot (Lyon 4^e, Croix-Rousse), bâtiment en pisé enduit et remanié. Source : Inventaire général du patrimoine culturel, Région Auvergne-Rhône-Alpes, IVR82_20136901338NUCAQ.

L'immeuble fait 23 mètres de haut. Malgré la hauteur, toutes les façades sont en pisé sauf les jambages d'ouverture¹⁷ qui sont en pierres. Il a été initialement construit en retrait sur une parcelle privée, ce qui pourrait expliquer le choix des matériaux. (Mille, p.228). C'est le seul immeuble des années 1800 construit complètement en pisé qui a pu être recensé.

1 place des Tapis (CL-143)



Figure 23 : Photo : Immeuble de cinq niveaux situé au 1, place des Tapis (Lyon 4e, CL-143). Source : vue Google.

L'immeuble a été construit en 1838. Il a 4 étages et une hauteur de 21 mètres. Du pisé a été trouvé dans un mur du 2^e étage (Mille, p.229). La façade semble être en pierre.

7 rue Pailleron (CL-202)



Figure 24 : Photo: Immeuble situé au 1, rue Pailleron (Lyon 4e, CL-201). Détail du pisé visible en pignon est. Source : Service des Balmes de la Ville de Lyon.

L'immeuble a été construit entre 1840 et 1844. Il a 5 étages et une hauteur de 21 mètres. Le pisé a été détecté dans le pignon est, le pignon ouest est très probablement en pisé aussi. Sur le côté sud, le chaînage¹⁸ est en pierre, ce qui prouve que la façade sur rue est en maçonnerie de pierre. La façade nord possède un chaînage en bois, elle est pratiquement aveugle, ce qui indique que cette façade est très probablement en pisé (Mille, p.230).

12, rue Jacquard



Figure 25 : Photo : L'intérieur de l'immeuble de trois étages situé au 12, rue Jacquard (Lyon 4^e) lors des travaux menés en 2015 qui ont relevé la présence de pisé de terre dans les murs mitoyens perpendiculaires à la rue. Source : E. Mille

L'immeuble de 3 étages et 20 mètres de hauteur a probablement été construit après 1830, qui marque la création de la rue Jacquard. Les façades sont construites en pierre, ce qui cache la présence du pisé dans le bâtiment. Les murs mitoyens¹⁹ en pisé ont été découverts en 2015 après des travaux (Mille, p.111, 229).

16. Chaînage réalisé dans les angles d'un bâtiment pour en rigidifier la structure. (Dicobat, Eyrolles).

17. Montants latéraux d'une baie (porte, fenêtre) soutenant le linteau. (Pérouse de Montclos, Dictionnaire d'architecture).

18. Renfort horizontal ou vertical en béton, bois ou métal assurant la cohésion d'un ouvrage. (Dicobat, Eyrolles).

19. Mur séparant deux propriétés privées et appartenant pour moitié à chacun des propriétaires. (Larousse).

On conclut que **dans les constructions des années 1800, le pisé est presque constamment accompagné par de la maçonnerie en pierre et par des planchers et un toit en bois.** D'un bâtiment à l'autre, la quantité de terre et de pierre utilisée pour l'ensemble des murs varie énormément. Dans certains immeubles, la pierre se contente d'occuper la place du soubassement, plus ou moins haut. Dans d'autres cas, elle constitue les façades principales, laissant la terre pour les mitoyens, les pignons ou les murs intérieurs.

Ce mélange de matériaux peut être vu comme un véritable assemblage d'immeuble. Voici deux définitions du mot *assemblage* qui appuient la légitimité de l'usage de ce terme dans ce contexte :

« *Art contemporain* – Œuvre à trois dimensions dans laquelle sont réunis divers matériaux ou objets hétérogènes. »

« *Technique* – Action, manière de réunir différentes pièces préalablement ajustées pour qu'elles forment un ensemble rigide ; résultat de cette action. » (*Larousse*).

Chaque immeuble possède **différentes techniques d'assemblage**, puisque dans chacun d'eux, les matériaux sont placés et utilisés différemment. Ces bâtiments sont très divers par la quantité et la manière dont le pisé et les autres matériaux sont mis en rapport les uns avec les autres. Ces observations, accompagnées par l'étude réalisée sur l'histoire de Lyon et celle du pisé, nous permettent d'affirmer que chaque bâtiment a été pensé en fonction des besoins, des moyens financiers et de l'image qu'il devait donner aux passants. Ces facteurs renforcent le statut du pisé comme matériau flexible, économique et intéressant en termes de propriétés.

Nous allons essayer de déduire, de comprendre et de comparer les différentes techniques d'assemblage de ces immeubles.

Dans la plupart des bâtiments, **la pierre** est utilisée dans la conception **des éléments structurels porteurs**. À Mail et Pailleron, elle est utilisée dans les chaînages d'angles. Les façades de beaucoup de bâtiments sont en pierre pour deux raisons : d'un côté pour l'intérêt structurel, et de l'autre pour des **raisons esthétiques**, afin de donner une image plus noble à l'immeuble. Le sujet des façades en pierre est beaucoup abordé et réglementé après les inondations lyonnaises, comme nous avons pu le voir auparavant.

On remarque que le nombre de façades en pisé et en pierre varie :

- À Gigodot, toutes les façades sont en pisé, ce qui reste rare pour l'époque.
- À Pailleron, seule la façade sur rue est en pierre.

- À Mail et à Jacquard, les façades sur rue et sur cour sont en pierre, et les pignons sont en pisé.
- À Tapis, toutes les façades sont en pierre, mais des murs intérieurs en pisé ont été détectés.

Nous n'avons pas plus de détails sur les murs intérieurs des autres immeubles. Nous pouvons seulement faire **des hypothèses** (fig.39), en gardant en tête que l'intérêt principal de l'usage de la terre est son bas coût. Pour les immeubles contenant au moins des pignons en pisé, il serait logique d'avoir des murs intérieurs en pisé pour réduire le coût de construction, puisque les économies n'auraient pas été faites au niveau des murs extérieurs en priorité.

Une autre hypothèse serait que les murs porteurs intérieurs soient pensés comme des éléments structurels résistants aux inondations, pour assurer la solidité de l'immeuble, tandis que les pignons ou certaines façades seraient en pisé pour améliorer le confort thermique.

La dernière hypothèse serait que, dans les bâtiments ayant des façades en pierre, la terre soit utilisée pour les cloisons afin de réduire légèrement les coûts. Tous les éléments porteurs, comme les murs et les façades, seraient en pierre pour être plus résistants à l'eau et aux inondations.

Concernant les **planchers dans ces immeubles**, ils sont le plus souvent **en bois**. Dans les cas où nous n'avons pas de précisions sur la nature des planchers, il est raisonnable de déduire qu'ils le sont également. Le matériau est léger et permet de minimiser les charges qui reposent sur les murs et façades en pisé. De plus, plusieurs ouvrages confirment que le bois est le seul matériau utilisé pour la construction des planchers.

On trouve la phrase suivante dans le livre *Planchers et parquets : du XVI^e au XIX^e siècle* :

« Dans l'habitat ancien français, les planchers étaient traditionnellement en bois ; ce n'est qu'à la fin du XIX^e siècle que les planchers métalliques, puis en béton, commencent à se diffuser. »
(Togni, 2006, p.10)

Si on s'intéresse davantage au cas de Lyon, on apprend, à la page 31 de l'*AVAP Pentes de la Croix-Rousse* (diagnostic réalisé par le Grand Lyon), que les immeubles dits *canuts* se caractérisent par des planchers en bois, souvent « à la française », adaptés aux grandes portées des ateliers. Les *canuts* sont souvent réalisés en pisé, puisque l'objectif est de créer des locaux pour les ouvriers. Comme nous l'avons vu précédemment, ils utilisent ce matériau également pour se loger dans des quartiers comme la Croix-Rousse.

Dans le *Petit guide des architectures en pisé à Lyon*, on trouve :

« À Lyon, où l'architecture en pisé a été largement pratiquée, les planchers intermédiaires sont traditionnellement réalisés en bois, conformément aux usages français de l'époque. » (Alex, 2012, p.18)

Le bois est également utilisé pour réaliser **la charpente et le toit des immeubles**, et cela n'est pas uniquement une caractéristique des bâtiments en pisé jusqu'au XX^e siècle. Dans son livre *Architecture. Méthode et vocabulaire* (2000), Jean-Marie Pérouse de Montclos définit la charpente comme un ouvrage de bois couvrant les bâtiments avant l'arrivée du métal et du béton dans la construction, ce qui correspond au début du XX^e siècle.

La conclusion que nous pouvons en tirer est que le bâtiment en pisé des années 1800 n'est plus défini par un nombre d'étages ou un pourcentage précis d'éléments en terre crue. **Ce qui caractérise la construction d'un bâtiment contenant du pisé, c'est l'usage intelligent de divers matériaux pour trouver une réponse adaptée aux besoins de chaque constructeur.** Les éléments pris en compte sont : la zone et le risque d'inondation, le budget disponible, le statut des clients, l'image souhaitée du bâtiment, le confort thermique recherché et les réglementations imposées par la ville.

Ces éléments et la diversité d'assemblages des bâtiments que nous avons comparés nous amènent à nous questionner sur l'intégration contemporaine du pisé dans le monde de l'architecture et du bâtiment. Nous pourrions ultérieurement nous pencher davantage sur l'usage de plusieurs matériaux dans un bâtiment et sur les différentes techniques d'assemblage de ces matériaux, parmi lesquels se trouverait le pisé. Ces études seront réalisées dans le chapitre 3 du mémoire et auront comme base les hypothèses que nous avons émises précédemment concernant la composition des murs.

2.2 Analyse d'une maison construite par François Cointeraux et des techniques de construction

L'emploi massif de la terre et le développement des techniques traditionnelles de construction du pisé ont également influencé les architectes locaux et conduit à diverses **expérimentations, recherches et inventions**.

Nous allons nous intéresser aux constructions et inventions de **François Cointeraux**, le dernier architecte ayant laissé une grande empreinte par ses avancées dans le domaine des constructions en pisé. Nous allons observer ses travaux et ses avancées historiques les plus récentes : comment il est arrivé à les mettre en place, comment elles découlent des techniques ancestrales et comment elles se combinent au savoir-faire traditionnel.

L'objectif est d'observer, dans un premier temps, **ses inventions**, mais également de les mettre en rapport avec **les techniques de construction traditionnelles** que François Cointeraux décrit. Les points manquants seront complétés avec des études plus récentes sur le pisé à Lyon. Cela nous permettra d'avoir une vision complète de son travail, du processus de construction, des outils et du chantier.

Suite à cette étape, nous finirons par **analyser une maison** qu'il a construite dans le département de La Bresse. Dans l'un de ses ouvrages, il nous fournit des documents graphiques et la description de cette construction. Ce qui nous intéresse est de comprendre comment il applique ses connaissances sur le pisé et comment il intègre ses inventions dans un projet réel.

2.2.1 Construction et outils

Nous allons décortiquer **les étapes de construction** et les outils employés sur un chantier pour mieux comprendre comment était construit, à Lyon, jusqu'aux années 1800, un bâtiment durable contenant du pisé. La majorité des informations sont extraites des œuvres écrites par François Cointeraux et complétées par des analyses contemporaines. Cela nous permettra de comprendre par la suite comment cet architecte dirigeait la construction et les chantiers des bâtiments.

Pour construire des murs en pisé, il est nécessaire de **s'approvisionner en terres** adaptées, permettant une cohésion maximale. Pour cela, les chantiers se déroulent au printemps et en automne, car la teneur en eau est optimale durant ces périodes (*École d'architecture, 2^e cahier, p.2*). La terre prélevée ne doit pas contenir un taux d'humidité trop bas ou trop élevé pour favoriser la cohésion capillaire et doit être d'une consistance homogène pour éviter la fissuration de la construction (*The Art of Earth Architecture, Jean Dethier, p.36*). François Cointeraux recommande également de mélanger des terres dites grasses et maigres pour éviter cette fissuration (*École d'architecture, 2^e cahier, p.24*).

L'extraction des terres est locale, de préférence au bas des pentes, comme dans les fonds de vallées, au pied des coteaux ou lors du creusement de puits, car grâce à l'écoulement des eaux de pluie, la terre y est plus déliée et plus divisée (*École d'architecture, 2^e cahier, p.2*). La terre est souvent argileuse, parfois contenant des sables et des graviers ou, comme mentionné auparavant, des déchets de construction favorisant le remploi de certains matériaux. Du mâchefer et du béton maigre pouvaient être ajoutés au XIX^e siècle (*Thèse Construire la ville en terre, p.70, 75*).

Une fois les terres choisies, le chantier commence par la construction du soubassement en maçonnerie appareillée. Il est généralement en pierre, mais peut aussi être construit en briques.

Le soubassement peut atteindre une hauteur de 80 cm et sert à protéger le pisé des infiltrations d'eau. Les réglementations concernant sa hauteur ont beaucoup varié au XIX^e siècle et ont parfois été fixées à 1,20 m ou 2 m. Un gâchis de mortier (terre et chaux) est appliqué sur le haut du soubassement une fois qu'il est construit, afin de boucher les joints entre les pierres. Cela permet de créer une base lisse et fiable pour l'installation du mur en pisé, en évitant l'écoulement de la terre dans les joints lors de la compression de celle-ci.

Une fois que le soubassement est terminé, **les murs en pisé** peuvent être construits. Le pisé est une technique qui ne nécessite pas d'instruments complexes : la façon de construire et les outils sont simples, accessibles à tout le monde. La construction traditionnelle est effectuée sur place ; elle est décrite dans la majorité des écrits et études que j'ai analysés. Pour construire un mur en pisé sur site, nous devons avoir à disposition un pisoir et installer un coffrage composé de deux banches, de montants, de clés, de coins et d'écarteurs. Ces éléments sont listés et expliqués par Dorothée Alex (*Petit guide du pisé*, p.21).

Définitions et explications :

- **Le coffrage** (fig.26) est un moule en bois qui permet de créer des briques crues ou des "pierres factices" par la compression de la terre.

Les banches-coffrages de base sont illustrées en fig. 1 et fig. 2 (Pl. I), complétées par des éléments latéraux en fig. 3 et fig. 4 et des cales en fig. 5 et 6.

- **Les coins** (fig.26) sont de petits éléments en bois permettant de fixer les clés aux montants. Ils sont représentés en fig. 5 et 6 (Pl. I), montrés en insertion dans les banches.

- **Les banches** (fig.26 et 27) sont des panneaux de 2 à 4 m de long et de 80 à 100 cm de haut, entre lesquels la terre est insérée. Les panneaux principaux, avec leurs traverses et systèmes d'accroche, apparaissent en fig. 1 et 2 (Pl. I) et leurs variantes et renforts en fig. 7, 8, 9 et 10 (Pl. II).

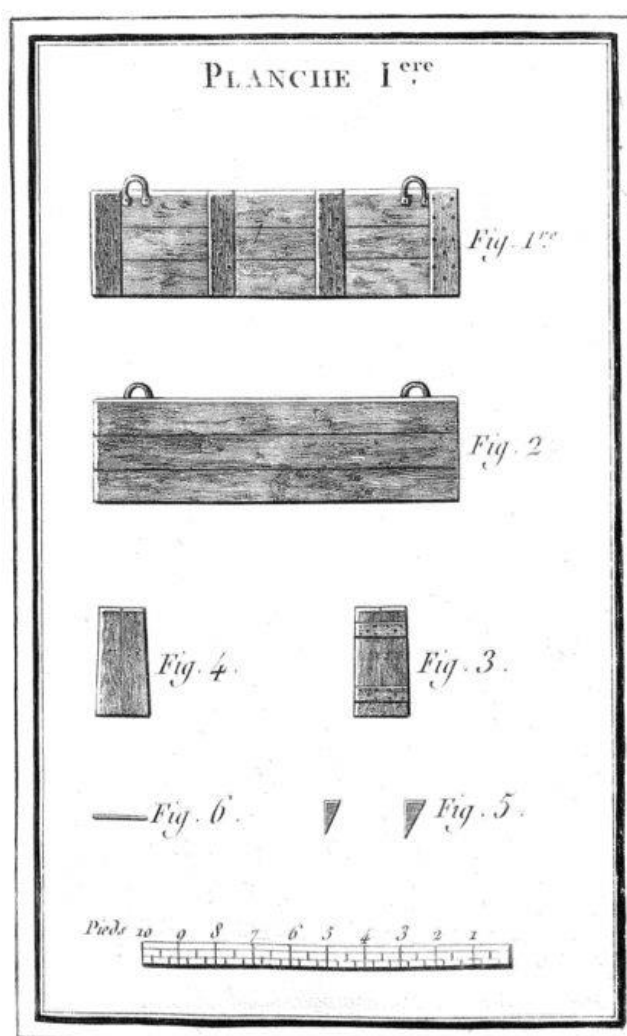


Figure 26 : Dessin : Planches I présentant les principaux outils du pisé : banches et éléments de coffrage (fig. 1 à 6). Source : François Cointeraux, École d'architecture rurale, planches techniques.

- **Les écarteurs** (fig.27) sont des éléments en bois placés à l'intérieur du coffrage afin de maintenir l'écartement constant entre les deux panneaux.

Dans les planches, leur fonction est visible dans l'assemblage global de fig. 11 (Pl. II), où les pièces A et E assurent l'écartement interne du coffrage.

- **Les montants** (fig.27) sont les pièces en bois verticales posées contre la face extérieure des panneaux afin de stabiliser l'ensemble.

Ils sont visibles sur le grand assemblage du coffrage représenté en fig. 11 (Pl. II), identifiés par les lettres C et D, flanquant les panneaux pour en assurer la tenue.

- **Les clés** (fig.27) sont des éléments en bois qui bloquent les montants et maintiennent la pression du coffrage.

Elles sont visibles en fig. 12 (Pl. II), accompagnées de la petite hachette servant à les ajuster (fig. 13).

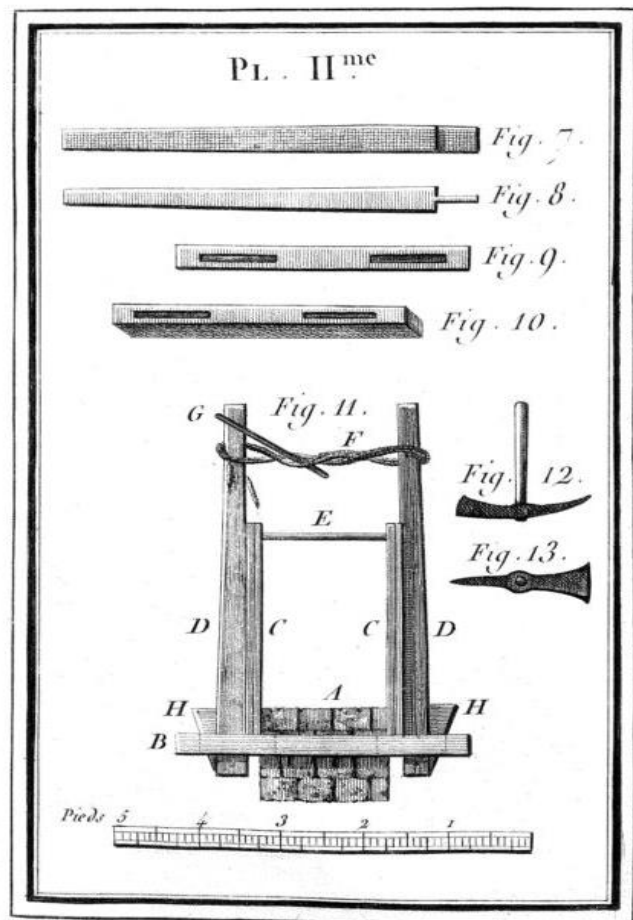


Figure 27 : Dessin : Planches II présentant les principaux outils du pisé : montants, écarteurs, clés et coins du système d'assemblage (fig. 7 à 13). Source : François Cointeraux, École d'architecture rurale, planches techniques.

- **Le psoir** (fig.28) est l'outil utilisé pour compacter la terre. Il est composé de deux éléments : une semelle en bois et un manche. Les différents modèles représentés par Cointeraux apparaissent en fig. 14, 15 et 16 (Pl. III), montrant plusieurs formes de semelles adaptées soit au tassage global, soit au travail des angles et des zones resserrées.

Pour l'ajustement des coffrages, des marteaux, des clous, des scies et des haches sont utilisés (*École d'architecture, 2^e cahier, p.24*).

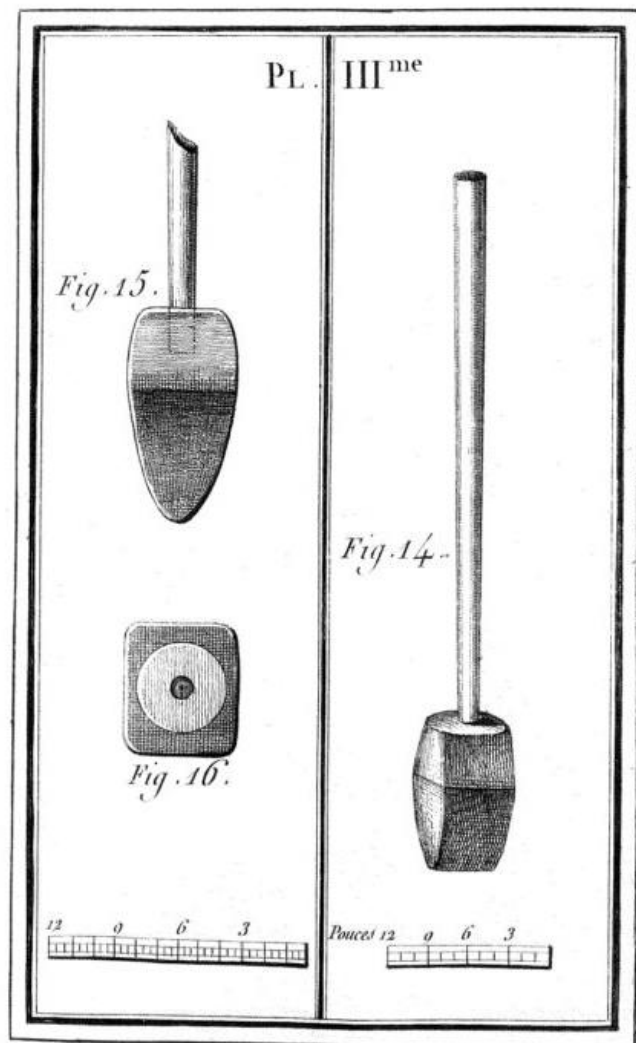


Figure 28 : Dessin : III présentant les principaux outils du pisé : différents modèles de psoirs utilisés pour le tassage de la terre (fig. 14 à 16). Source : François Cointeraux, *École d'architecture rurale, planches techniques*.

Les murs

Après l'installation du coffrage sur le soubassement, la construction des murs en pisé peut commencer. Premièrement, on coule de fines couches de terre humide. Dans les différentes sources, l'épaisseur de ces couches varie entre 12 cm selon Dorothée Alex et 20 cm selon Emmanuel Mille. Elles sont comprimées avec le pisoir pour atteindre une épaisseur d'environ 8 cm. Il doit rester le moins d'air possible dans la terre pour assurer sa densité et sa cohésion. Entre ces couches de terre, on place, dans un angle, un gâchis de mortier pour consolider le mur.

Une fois que la terre compactée atteint une hauteur d'environ 80 cm, elle est décoffrée et laissée à sécher à l'air libre. Les coffrages sont ensuite posés sur le haut du bloc déjà construit, une fois le niveau terminé, pour continuer à créer de nouveaux blocs et à élever le mur. (fig.29)

Les murs sont d'une épaisseur de « plus de deux pieds », soit environ 65 cm selon Cointeraux (*De la distribution des bâtiments de pisé*, p.1), et selon Dorothée Alex, cette épaisseur varie entre 40 et 60 cm (*Guide du pisé*, p.23). L'inexactitude est due au fait que l'épaisseur varie en fonction de la hauteur : les murs sont généralement plus épais à la base, et plus on monte, moins ils le sont, pour gagner en stabilité. Cette réduction d'épaisseur crée une inclinaison appelée *fruit*.

Le montage est relativement rapide : il est possible de construire trois pans de mur par jour. Il arrive que des planches horizontales soient insérées tous les trois niveaux dans la terre pour servir de tirants ou de guides, ou que des morceaux de bois soient noyés dans la terre, plutôt en haut des murs. Les tirants peuvent aussi être métalliques ; on les détecte facilement en façade puisqu'ils traversent les murs et sont fixés à l'extérieur par une croix ou un X.

Pour créer les fenêtres, lors de la construction du mur, on place les jambages de l'ouverture dans les banches, qui restent en place après le décoffrage. Un encadrement est souvent créé pour éviter l'effondrement du mur, car les ouvertures fragilisent le pisé : le matériau est très sensible à la traction. L'encadrement est généralement réalisé en bois ou en pierre et peut être accompagné d'un arc de décharge constitué de deux planches disposées sous la forme d'un V inversé. Cet arc permet de soulager les linteaux²⁰. (*Guide Pisé* p.21-23 ; Thèse *Construire la ville en terre* p.71-73, *Ecole d'architecture 2nd cahier*, p.14-16)

20. Élément horizontal situé au-dessus d'une ouverture et supportant la charge du mur. (Larousse)



Figure 29 : Photo : Ouvriers en cours de montage d'un coffrage-banche pour pisé. Source : fonds « CRATerre/1261 »

Murs et colonnes – le nouveau pisé

Une autre méthode de construction en pisé est celle de l'assemblage modulaire (fig.30). Cette technique a été inventée par François Cointeraux, qui l'a nommée « nouveau pisé ». Elle consiste à créer de petits modules en terre moulés, puis empilés par la suite pour former différents éléments en pisé (*Du nouveau pisé ou l'art de faire le pisé par appareil*, p.4). Il existe plusieurs appellations pour cette technique : *nouveau pisé*, *assemblage modulaire*, *moulage*. Les trois termes seront utilisés dans cette étude pour désigner cette technique.

Dans son écrit *Du Nouveau Pisé ou L'art de faire le pisé par appareillage*, rédigé en septembre 1806, François Cointeraux décrit avec clarté son invention. Ces moules sont utilisés pour la construction de murs (fig.12 et 13), de cloisons, de pilastres, de piliers et de colonnes de différentes formes et dimensions. **Les colonnes et les piliers représentent une véritable nouveauté** dans le monde de la construction en terre crue. Avec les moules conçus pour la création des colonnes, qu'il a pris soin de dessiner, il est possible de construire des colonnes de 12 et de 24 pouces de diamètre, des piliers hexagonaux de 13 pouces de diamètre, chaque assise mesurant 10 pouces de hauteur. Les piliers peuvent également être carrés, quadrangulaires ou octogonaux. La construction d'une petite colonne avec cette technique prend environ 30 minutes (p.10).

Pour la construction des petites colonnes, l'architecte utilise un assemblage plus simple, alors que pour la construction des colonnes ou des piliers plus épais, il divise un module en plusieurs sections qu'il assemble pour atteindre le diamètre final de l'objet construit. Il explique que construire les objets par assemblage de cette manière permet de manier plus facilement les moules et les modules, car les éléments sont plus légers que dans le cas d'une colonne ou d'un pilier coffré en un seul morceau. Cela permet un travail plus facile pour les bâtisseurs avec des modules et des sections légères, ainsi que la possibilité d'avoir des moules en bois moins chers et moins lourds (p.8). Le moule en bois est réalisé en bois dur, comme le chêne, afin de garantir la résistance lors de la compression de la terre et en raison de l'effet lisse qu'il donne aux modules de terre moulés (p.12).

On comprend que Cointeraux invente cette technique pour repousser les limites de la construction des éléments en pisé et rivaliser avec les éléments habituellement construits en pierre ou en bois. La technique traditionnelle est améliorée pour que la terre devienne un élément participant à l'esthétique du bâtiment, grâce à la liberté des formes qu'elle peut proposer et à la rapidité de leur réalisation, remplaçant ainsi d'autres matériaux comme la

pierre et le bois. François Cointeraux exprime l'objectif de son invention à la fin de son œuvre en écrivant : « Nos successeurs profiteront de tous ces nouveaux objets : le riche, le pauvre n'useront plus autant de bois... puisqu'à l'avenir tout se fera en comprimant simplement dans des moules la terre. » (p.18)

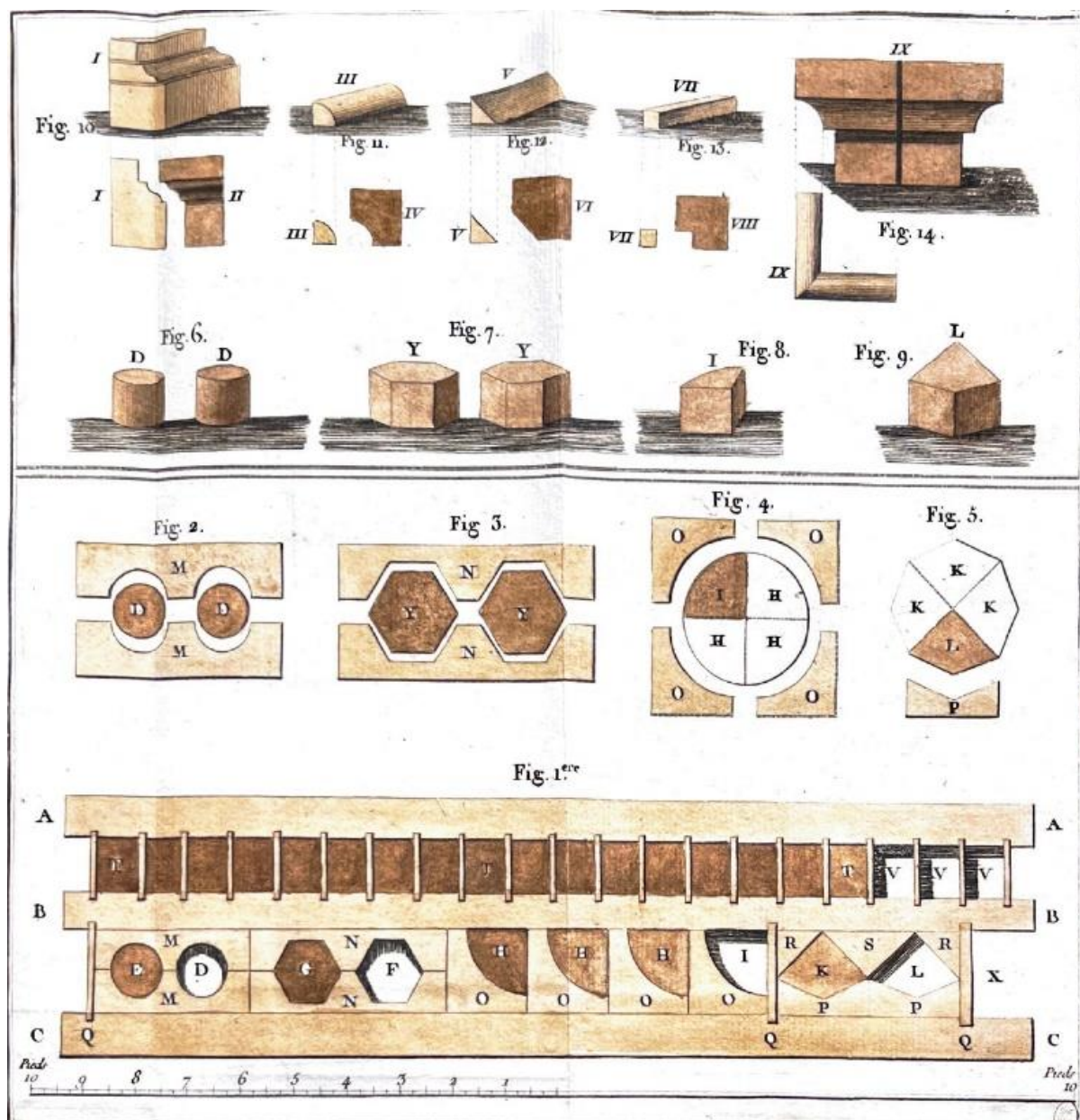


Figure 30 : Dessin : Planche IV présentant les éléments moulés du "nouveau pisé" : modules cylindriques et polygonaux (fig. 6 à 9), blocs hexagonaux (fig. 3), ainsi que les pièces décoratives de couronnement et d'aboutement — proches de chapiteaux, corniches et modénatures²¹ — destinées à orner colonnes, piles et extrémités d'assemblages (fig. 10 à 14). Les figures 2 à 5 montrent les possibilités de combinaisons pour former colonnes, anneaux ou structures composées. Source : Livres et Modèles de Cointeraux sur les constructions et cultures, Pl. IV.

21. Élément horizontal situé au-dessus d'une ouverture et supportant la charge du mur. (Larousse)

Planchers et charpente

L'étape qui suit la construction des murs, des colonnes et des piliers en pisé est la mise en place des planchers, puis de la charpente. Les deux composantes du bâtiment sont posées sur des semelles en bois ou en mortier, ancrées dans les murs. Les planchers, tout comme la charpente, sont réalisés en bois.

Les charpentiers peuvent intervenir avant l'étape de la construction du toit, en aidant les maçons à achever la construction des murs. La collaboration entre les deux métiers permet un gain de temps, une meilleure cohérence entre les deux composantes du bâtiment et une diminution des risques.

« Maçons et charpentiers travaillent de concert pour hâter le bouquet. » (*Aux maçons et charpentiers*, p.32)

Leur entraide prend encore plus de sens dans une nouvelle manière de construire proposée par François Cointeraux, qu'il appelle le *Nouveau Toit* (fig.31) . Dans cette technique, les murs en maçonnerie (pisé) montent jusqu'au grenier, et la charpente vient se poser directement dessus. L'architecte vante sa résistance au feu, l'appelant également *toit incombustible*, mais aussi la volumétrie et l'espace qu'il libère dans le grenier en permettant l'installation de nouveaux usages (exemple à mettre).

La charpente est le plus souvent composée de pannes²², et le toit est recouvert de tuiles²³ creuses en terre cuite (*Livres et modèles de Cointeraux*, p.2 ; *Les leçons de la terre – François Cointeraux*, p.8).

22. Pièce horizontale de charpente recevant les chevrons. (Dicobat, Eyrolles).

23. Tuile en terre cuite en forme de demi-canal utilisée pour les toitures traditionnelles. (Larousse : tuile).

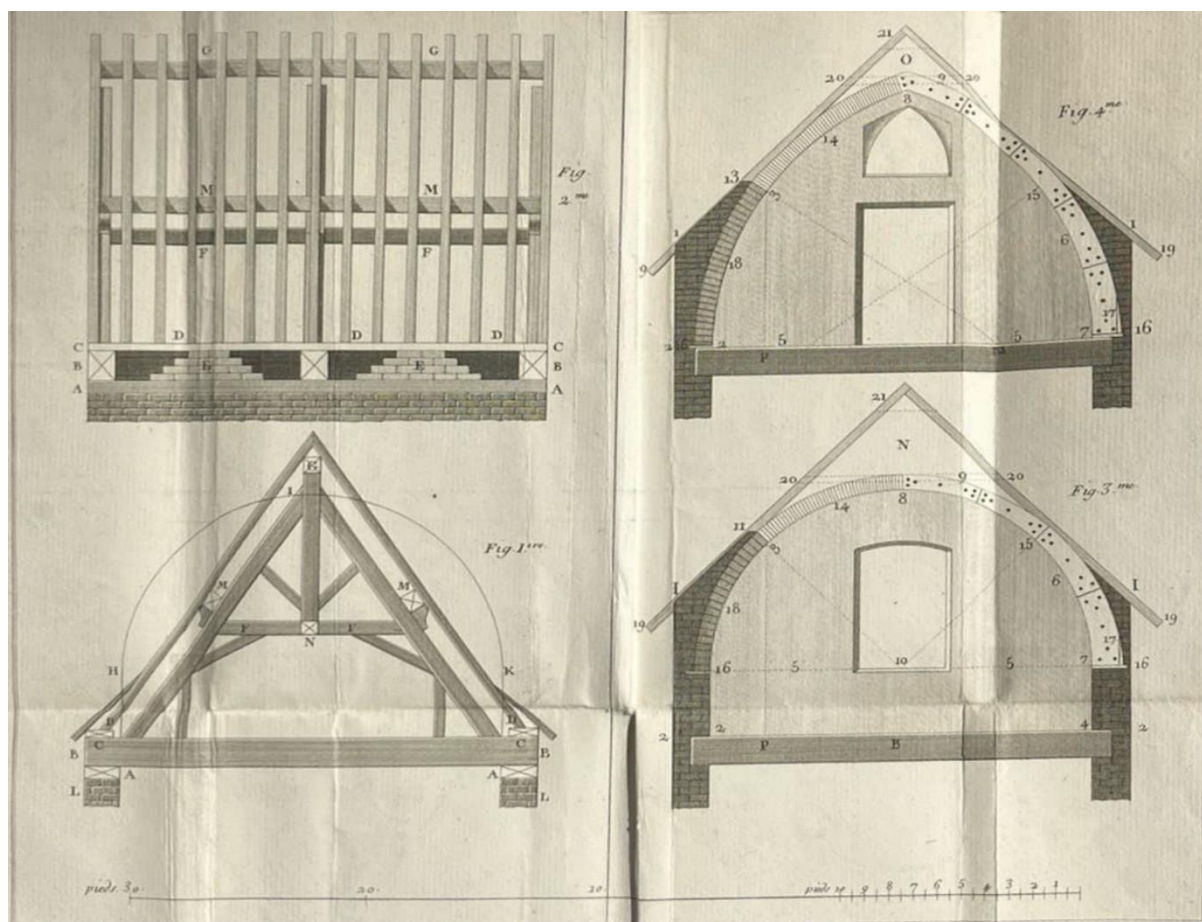


Figure 31 : Illustration : Schémas du "nouveau toit", montrant la charpente triangulaire (fig. 1), la structure porteuse en bois (fig. 2) et la voûte de couverture en terre (fig. 3–4). Source : François Cointeraux, *Aux maçon »s et charpentiers des villes et des villages*, Paris, 1790, Scan de l'auteur.

Enduit

Les toits de certaines constructions plus anciennes n'étaient pas assez bien dimensionnés à l'époque pour protéger les bâtiments de la pluie. Pour protéger les façades en terre de l'humidité, elles ont été ultérieurement recouvertes d'un enduit qui n'était pas prévu initialement. Cet enduit est un mélange de sable, de mortier, de chaux grasse et de terre, ce qui lui donne une couleur beige (*Guide du pisé*, p.24). Cet enduit a tendance à tomber par plaques, ce qui a permis la découverte d'un certain nombre de bâtiments ou de murs en pisé. On remarque néanmoins que, dans les années 1800, certains architectes commencent à prévoir la protection des façades en terre par une peinture à la chaux (*De la distribution des bâtiments de pisé*, p.1). Certaines façades sont même recouvertes d'un habillage²⁴ en pierre ou en brique, ce qui rend la détection du pisé encore plus compliquée.

Dans certains cas, ces enduits, d'abord appliqués pour des raisons de protection, prennent progressivement une dimension plus esthétique. Sous l'influence d'auteurs comme Cointeraux, ils deviennent un moyen d'uniformiser la façade et de rapprocher visuellement le pisé des constructions en pierre, afin d'atténuer son image de matériau « rustique » (Cointeraux, *École d'architecture rurale*, 1790). Les chaînages d'angle, bandeaux²⁵, encadrements ou frontons²⁶ que l'architecte dessine dans ces livres, ne sont pas réalisés en pierre mais en enduit à base de chaux, de sable et de terre, appliqué en surépaisseur et modelé pour imiter la modénature de la pierre. Cette technique, fréquemment décrite par Cointeraux, contribue encore davantage à l'effacement visuel du pisé sous un habillage qui reprend les codes des façades en maçonnerie plus "noble". Peu à peu, ces traitements finissent par masquer totalement la nature terre crue des murs, rendant la reconnaissance du pisé difficile sans dégradation de l'enduit ou intervention sur la façade.

24. Action de recouvrir une paroi d'un matériau de finition. (Larousse).

25. Moulure ou bande horizontale marquant un niveau de façade. (Larousse).

26. Couronnement triangulaire ou courbe ornant la partie supérieure d'une façade ou d'une baie. (Larousse).

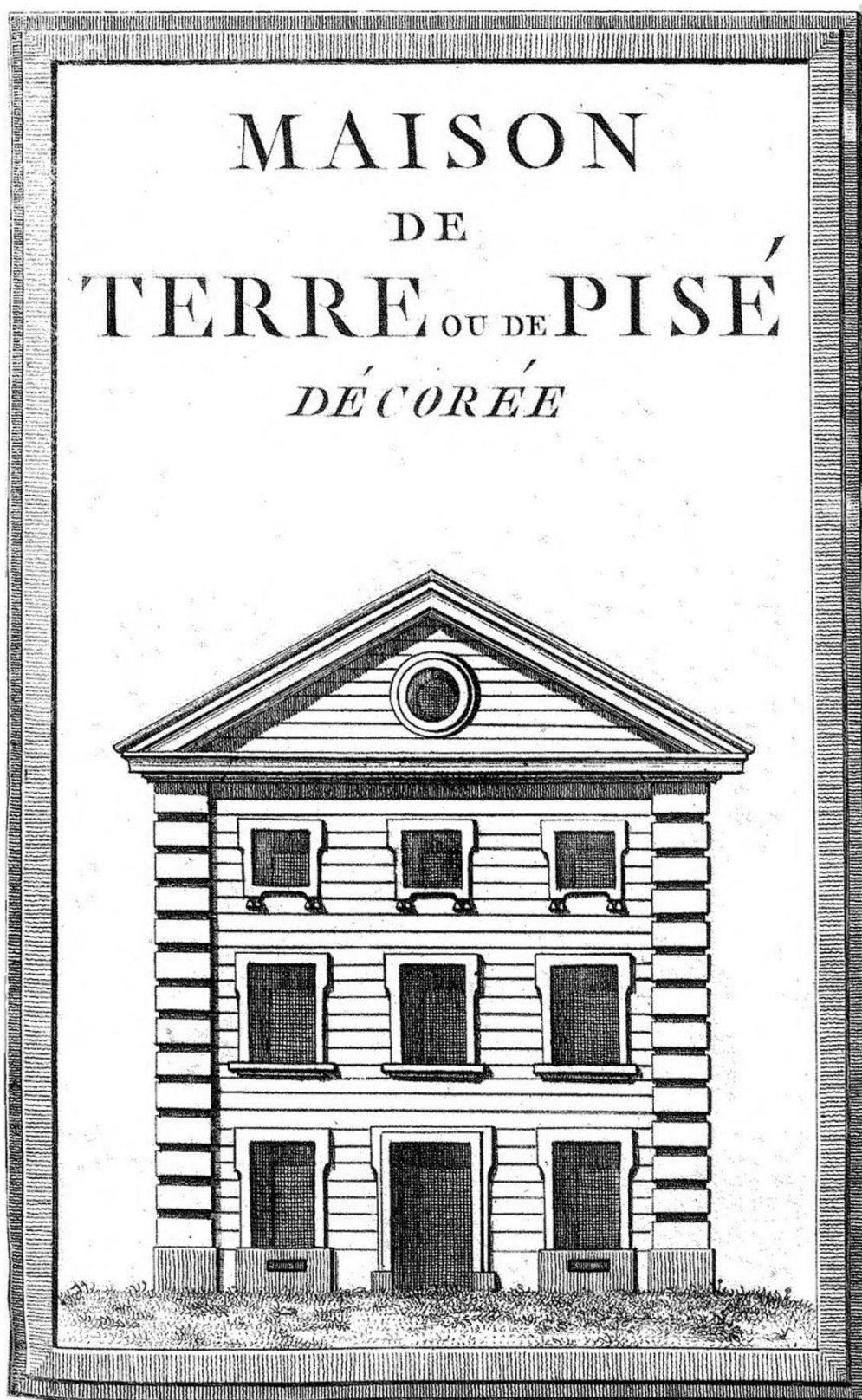


Figure 32 : Dessin : Façade d'une « Maison de terre ou de pisé décorée » présentant des enduits moulés imitant la pierre, chaînages d'angle, bandeaux horizontaux, encadrements et fronton oculus, destinés à ennoblir l'architecture en terre crue. Source : François Cointeraux, *École d'architecture rurale*, ca. 1790–1793.

On comprend que les bâtiments en pisé ont une **organisation de chantier spécifique**, avec des étapes bien définies. Le bâtiment est **divisé en plusieurs parties** qui ont une **matérialité bien précise**, correspondant à leur emplacement dans l'édifice et, de ce fait, à leur relation avec les éléments en pisé. Le soubassement est réalisé en pierre, car sa matérialité doit répondre au problème des remontées capillaires d'humidité pour protéger les murs en terre, qui sont fragiles face à l'eau. Les planchers et la charpente sont en bois, car ces éléments doivent être légers pour ne pas abîmer les murs en terre, mais aussi parce que, traditionnellement, c'est le matériau de prédilection pour la construction de ces éléments. Le bois est également intéressant par sa facilité d'assemblage et de manipulation, surtout en hauteur. Il peut être utilisé sur de grandes portées, c'est un matériau chaleureux et un bon isolant thermique et acoustique.

On remarque que les bâtiments en pisé se sont adaptés d'une manière très logique et naturelle à la présence de la terre, afin de combler ses failles et ses faiblesses tout en favorisant son emploi pour la construction de bâtiments durables. Cette **adaptation** a pris la forme d'une **hybridation en termes de matériaux**, chacun jouant son rôle pour répondre au mieux aux contraintes engendrées par l'utilisation de la terre. Cela fait comprendre que, quand on parle de bâtiment en pisé, il s'agit réellement d'un bâtiment construit avec du pisé, dans lequel d'autres matériaux l'accompagnent naturellement.

2.2.2 Description d'un bâtiment en pisé

Nous avons vu une description générale de la construction en pisé de la région lyonnaise, maintenant il est temps de se pencher sur des exemples plus précis.

Pour cela, vous trouverez **l'analyse d'une maison construite par François Cointeraux**. Toutes les informations sont tirées de son propre ouvrage dédié à ce bâtiment, intitulé *Suite du traité d'architecture rurale*. Il y donne des informations sur le chantier, sur certains détails de construction, sur les techniques de construction et sur la matérialité. Toutes ces informations sont accompagnées d'explications et de quelques documents graphiques, comme des plans, des élévations et surtout une coupe. Ce qui va être particulièrement intéressant dans cette analyse sera **d'observer les avancées des techniques de construction en pisé et le rapport entre les différents matériaux avec la terre**.

L'auteur utilise le nom « Maison de Bresse » en parlant de cette construction. Son nom nous fait comprendre qu'elle se situe dans le département de la Bresse. Elle sort du territoire lyonnais, mais est construite par François Cointeraux, qui propage le savoir-faire et la construction du pisé lyonnais. La maison dispose d'un rez-de-chaussée, d'un entre-sole, de deux étages et d'un grenier. Elle possède quelques balcons secondaires et un balcon principal soutenu par des colonnes. D'autres ornements peuvent également être observés en façade. Les matériaux principaux sont la terre, la pierre et le bois.

Les documents graphiques de la Maison de Bresse :



Figures 33, 34, 35 et 36 : Dessins : Plans du rez-de-chaussée, de l'entresol, du 1^{er} étage et du 2^e étage de la Maison de Bresse en pisé (Pl. I à Pl. IV), montrant la distribution intérieure et l'organisation fonctionnelle du bâtiment. Source : François Cointeraux, École d'architecture rurale, ca. 1790–1793.

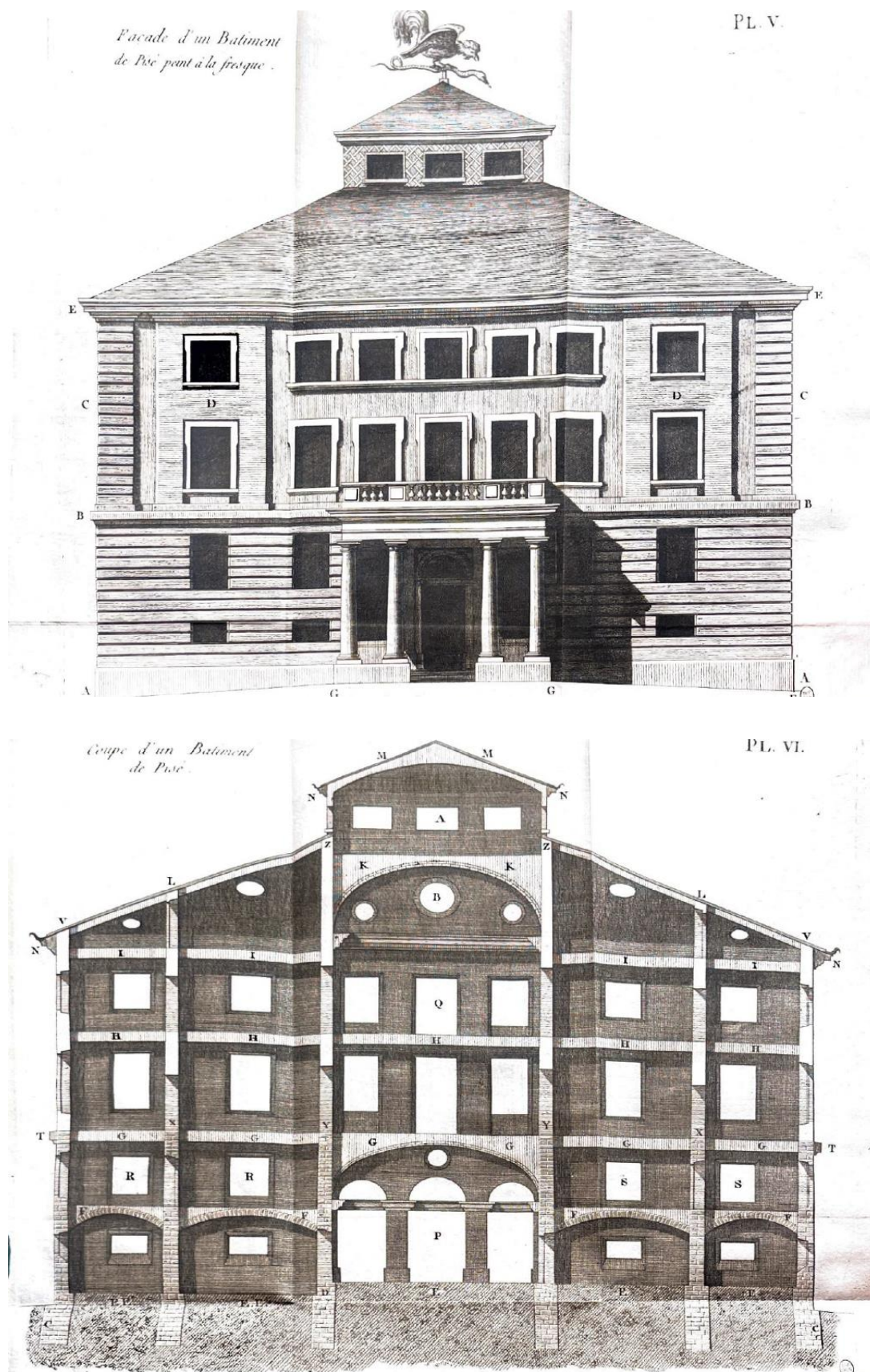


Figure 37 et 38 : Dessins : Façade (Pl. V) et coupe (Pl. VI) de la Maison de Bresse en pisé, montrant l'usage d'enduits imitant la pierre ainsi que les planchers en bois et murs porteurs en béton de terre.
Source : François Cointeraux, École d'architecture rurale, ca. 1790–1793.

L'emplacement de la maison et son environnement :

Le bâtiment se trouve sur une monticule. L'architecte explique que, du sol de la cour et du jardin, il y a une hauteur de 21 à 25 pieds ; il a volontairement pris de loin une pente douce.

L'objectif est de la placer en hauteur pour offrir une belle vue depuis la maison, tout en gardant un accès confortable. Il est intéressant de noter que c'est une recommandation fréquente pour les constructions en terre crue, afin d'éviter tout risque d'inondation (*Suite du traité d'architecture rurale*, p.22).

Fondations et haut soubassement en pierre :

Les fondations font 5 pieds de profondeur, et le soubassement (A) commence au sol et s'arrête au cordon (B). L'architecte précise qu'il occupe généralement la hauteur du rez-de-chaussée, mais que, dans ce cas, il comprend la hauteur du rez-de-chaussée et de l'entresol (les étages de service). Ces éléments sont en pierre et, par ailleurs, l'architecte illustre dans les documents graphiques la matérialité de toutes les composantes du bâtiment (*Suite du traité d'architecture rurale*, p.26 et p.28).

Murs en pisé :

Sur la planche 5, une des façades de la maison est illustrée. La section se trouvant entre B et E est en pisé. En façade, le pisé est recouvert d'une peinture à fresque et d'un enduit pour créer différents effets. L'intention est de donner l'impression que cette partie est construite en pierre de taille filante, grâce au relief et aux ombres créées par le traitement du pisé (*Suite du traité d'architecture rurale*, p.24).

Les murs en pisé sont faits en toises carrées de pisé. Sur la coupe, on voit que leur construction commence à partir du cordon (T), qui se trouve au-dessus de l'entre-sole, jusqu'au grand toit de la maison. La hauteur des murs en pisé n'est pas constante : elle varie en fonction de leur emplacement par rapport au toit. On trouve des murs de 24 pieds et 6 pouces (de T à N), de 29 pieds (de X à L) et de 35 pieds et 6 pouces (de Y à N). Ils sont élevés jusqu'à la couverture du toit pour créer plusieurs points d'appui et supprimer ainsi la charpente (*Suite du traité d'architecture rurale*, p.29-30).

Le toit et les planchers :

Étant donné que la charpente est supprimée, le toit représente plutôt une couverture légère. Aucun détail sur la matérialité des deux éléments n'est donné, mais nous pouvons en déduire, à l'aide des documents graphiques, que le bois reste présent en toiture et que les planchers sont construits en bois, comme dans la technique traditionnelle.

Les liaisons des murs :

Les liaisons des murs en façade avec tout le corps du bâtiment sont faites en bois. Les solives²⁷ sont clouées à la place des harpons en fer, et les tirants en fer sont remplacés par des happes de fer plat, plus légères (*Suite du traité d'architecture rurale*, p.30).

Colonnes :

François Cointeraux indique qu'il n'est pas nécessaire de faire les colonnes en pierre, car elles sont chères. Il suggère de les réaliser soit en moellons, soit en pisé, en y plaçant un axe en bois au centre. Les chapiteaux et les bases des colonnes sont moulés à l'aide de plâtre. Les colonnes soutiennent le balcon et tout l'entablement au-dessus, qui peut être fait avec des moellons de pisé (*Ex. 4^e cahier*). Les colonnes en pisé sont économiques, et si elles se dégradent au bout de 60 ans, elles sont facilement réparables. Le poteau en bois est suffisant par lui-même pour soutenir le balcon en cas de besoin (*Suite du traité d'architecture rurale*, p.18).

Cet élément de la maison est particulièrement intéressant par son aspect hybride et représente également une innovation. Pour leur construction, l'architecte utilise son invention, qui est la technique du *nouveau pisé*. De plus, la terre n'est pas un élément commun pour la construction d'une colonne et figure seulement dans les écrits de François Cointeraux. Ultérieurement, nous allons consacrer une partie de cette étude à ces colonnes pour comprendre l'intérêt des constructions hybrides contenant de la terre et les dernières avancées du pisé des années 1800.

27. Élément horizontal supportant un plancher et reposant sur les murs ou les poutres. (Larousse).

Balcons :

Les deux grands balcons ont une balustrade²⁹ en pierre de taille, car ils sont soutenus par des colonnes. Le balcon secondaire, en porte-à-faux, soutenu par des consoles²⁸, dispose d'une balustrade en fer. Il n'existe pas de documents illustrant les balcons (*Suite du traité d'architecture rurale*, p.24).

Les seuils, les appuis et les linteaux :

Les seuils et les appuis des portes et des fenêtres sont en pierre, car ils sont trop souvent humectés et dégradés par la pluie, la neige et le verglas (*Suite du traité d'architecture rurale*, p.25). Les linteaux sont remplacés par des solives en bois pour alléger la structure, mais aussi pour faire des économies (*Suite du traité d'architecture rurale*, p.30).

Cette analyse détaillée de la maison de Bresse permet de mieux comprendre la logique constructive de François Cointeraux et les principes qui guident son usage du pisé. À travers ce bâtiment, il démontre que la terre, associée à la pierre et au bois, peut former un système architectural cohérent, économique et durable. Cette complémentarité entre les matériaux ouvre la voie à une réflexion plus large sur les structures hybrides et sur la manière dont le pisé s'intègre dans des constructions mixtes. C'est ce que nous allons étudier dans la partie suivante.

28. Élément en saillie servant de support pour une corniche, un balcon ou un linteau. (Larousse)

29. Garde-corps composé de balustres supportant une main courante. (Larousse).

2.3 L'aspect mixte des constructions contenant du pisé

Étant donné que la pierre prend de plus en plus de place dans les immeubles en pisé des années 1800, les questions qui se posent alors sont les suivantes : dans quel cas parle-t-on d'un immeuble en pisé ? Est-il correct d'utiliser le terme *bâtiment en pisé* quand l'utilisation de cette technique de construction en terre crue implique directement l'emploi d'autres matériaux ?

On parle donc réellement de bâtiment en pisé lorsqu'on ne construit pas de soubassement en pierre ou en brique, et lorsque l'entièreté des murs est réalisée en terre crue. Comme on a pu le voir à Lyon, dans les constructions analysées, cela reste très rare et se limite aux bâtiments agricoles. Ce fait n'indique pas forcément l'absence historique de maisons entièrement faites en pisé, mais plutôt leur fragilité à traverser le temps et à perdurer.

Traditionnellement, les bâtiments en pisé, le plus souvent des maisons, disposaient d'un soubassement en pierre pour augmenter la résistance de la construction à l'eau. L'intégration de la pierre prouve que **la technique traditionnelle s'adapte au climat et à l'environnement par la diversification des matériaux** dans les bâtiments. Des règles et des proportions ont été définies pour assurer cette résistance tout en limitant les coûts. L'objectif est clair : utiliser la pierre pour se protéger, mais construire avec un maximum de terre. Ces proportions n'ont pas changé avant les traumatismes des inondations de Lyon dans les années 1800, qui ont provoqué l'instauration de règles d'urbanisme encadrant l'usage du pisé.

Dans la ville de Lyon des années 1800, **on cherche à construire toujours plus haut et à bas coût** pour accueillir la population croissante en raison de l'industrialisation. Le pisé est choisi naturellement pour répondre à la problématique des coûts de construction. Les bâtisseurs et les architectes se mettent donc à pousser les limites du pisé pour comprendre quelles sont ses performances maximales en termes de hauteur et de résistance. Le résultat de ce phénomène est la hauteur importante atteinte par certains immeubles construits entièrement en terre ou avec un soubassement en pierre. En termes de hauteur, ils rivalisent avec des immeubles faits entièrement en pierre.

En parallèle, les lois du XIX^e siècle visant à éviter les effondrements des bâtiments après les inondations s'imposent. On commence donc à se retrouver avec **des soubassements en pierre de 1,20 m ou 2 m**, ou avec **des façades sur rue obligatoirement construites en pierre**. **La notion de soubassement commence presque à disparaître**, car celui-ci peut atteindre la

hauteur d'un ou de plusieurs étages. Cela aide à **gagner en hauteur**, mais aussi en **apport lumineux**, grâce aux grandes fenêtres que permet la façade en pierre.

C'est ainsi que la relation entre le pisé et la maçonnerie en pierre change : ce sont désormais des **matériaux qui se complètent mutuellement** en fonction des réglementations, des envies, des coûts et des besoins. La notion **d'immeuble hybride**, adapté à chaque cas, prend alors tout son sens. Les propriétés et les caractéristiques des matériaux guident l'assemblage des bâtiments.

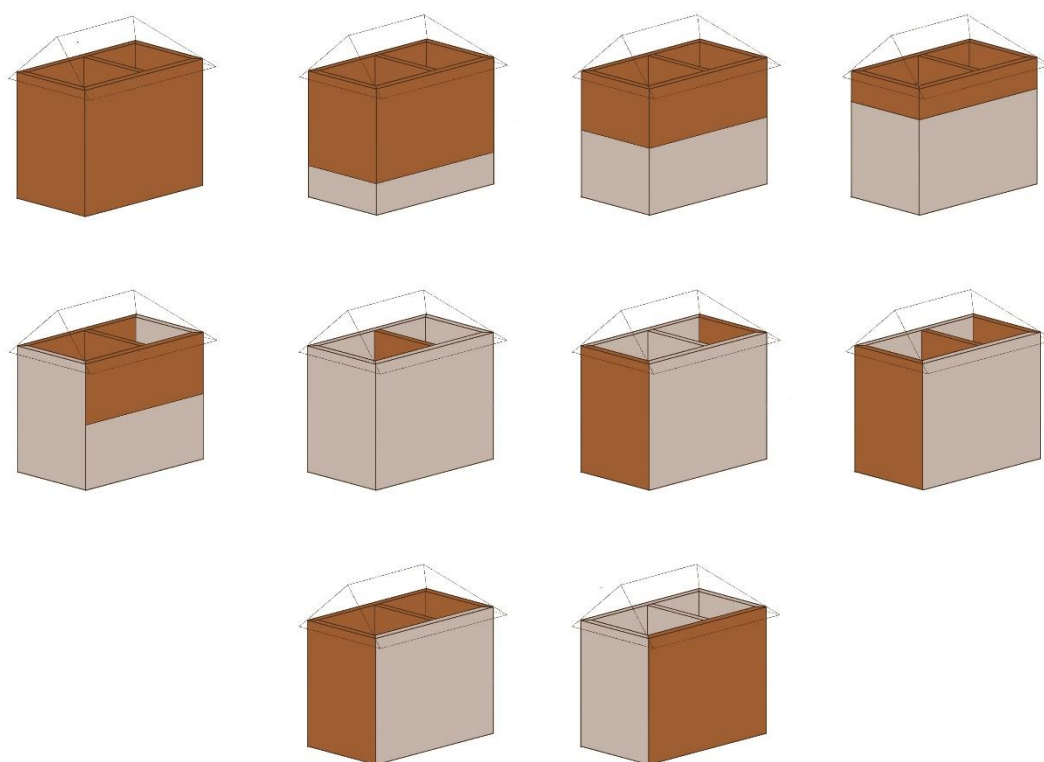


Figure 39 : Dessin : Exploration des différentes configurations d'association entre le pisé (en brun) et la pierre (en gris) observées dans les bâtiments lyonnais. Ce travail graphique illustre plusieurs manières d'articuler les deux matériaux. Source : dessin de l'autrice.



Figure 40 : Photo : Façades d'immeubles du XIX^e siècle bordant la place de la Croix-Rousse (Lyon 4^e), dont l'immeuble de six niveaux situé au n° 1. Ces bâtiments, aujourd'hui enduits et uniformisés, masquent souvent des structures anciennes en pisé caractéristiques du plateau comme les murs mitoyens, les pignons et certains refends intérieurs en pisé. Source : E. Mille.

Un autre phénomène intéressant réside dans les nouvelles techniques de construction qui apparaissent à cette période, grâce aux architectes et bâtisseurs qui s'intéressent grandement au pisé. Cet intérêt pourrait venir, d'une part, de l'environnement industriel qui pousse à la **recherche de nouvelles inventions**, et d'autre part, des changements dans les habitudes de construction en pisé, ce qui encourage à voir plus loin.

Nous avons étudié jusqu'à présent les constructions et inventions de François Cointeraux. Le *nouveau pisé* pousse lui aussi les limites du pisé et de l'image que l'on se fait des bâtiments en terre. Il ouvre les horizons des possibilités de construction en terre, car la technique du *nouveau pisé* consiste à mouler et à assembler des murs, des colonnes ou d'autres éléments architecturaux. Le pisé devient un objet d'ornement, ce qui lui permet également d'intéresser plusieurs classes sociales. Il semble être le **prédécesseur du pisé industrialisé** que l'on connaît aujourd'hui.

Une autre invention de l'architecte est le *Nouveau Toit*, où les murs en pisé remontent dans le grenier en remplaçant ou en accompagnant la charpente. Cela évoque, encore une fois, la libération du pisé : on déconstruit les règles qui encadraient son usage traditionnel. Il n'a plus de place fixe dans le bâtiment ; il est employé selon ses forces et ses faiblesses. Au niveau du toit, il allège la charpente, libère de l'espace et limite les risques d'incendie.

Toutes ces circonstances façonnent la technique traditionnelle de construction en pisé. Les Lyonnais **adaptent le pisé aux lois, aux besoins et à ses propres caractéristiques**, le faisant évoluer. **La terre crue n'est plus le matériau des pauvres, mais un moyen de réduire les coûts de construction pour une grande partie des classes sociales.** Même les plus riches l'utilisent, puisque certains bourgeois construisent des immeubles pour les louer aux ouvriers, tandis que d'autres bâtissent des maisons et immeubles contenant du pisé pour y vivre eux-mêmes.

On conclut que la place du pisé et son usage sont un véritable sujet à cette époque. Ils sont remis en question autant au sein de la société que dans les bâtiments. On s'en méfie à cause de sa vulnérabilité à l'eau et des traumatismes liés aux inondations, mais on y porte également un intérêt grâce à sa résistance au feu, à ses performances en matière d'isolation, à sa disponibilité et à son faible coût.

Au final, ce sont ces caractéristiques très variées et son prix qui sont au cœur du débat et de la remise en question de son usage. Le résultat est une expérimentation avec le pisé qui s'avère très intéressante. On parvient à construire des bâtiments intelligents et optimisés, qui mettent

au service de l'architecture les propriétés des différents matériaux en fonction des besoins. Ces constructions sont au final des bâtiments hybrides en termes de matériaux.

Malheureusement, la terre crue **et le principe de construction des structures mixtes disparaissent avec l'arrivée du béton**, considéré comme un remplaçant du pisé et limitant également le nombre de constructions en pierre. Le béton devient un matériau « miracle », synonyme d'innovation, peu coûteux et capable de remplacer beaucoup d'autres matériaux grâce à ses propriétés. Il parvient à être utilisé par toutes les classes sociales et, de ce fait, monopolise le monde de la construction.

Aujourd'hui, la place du béton se retrouve elle aussi remise en question à cause des découvertes sur son impact écologique et environnemental. Son utilisation excessive a également provoqué ou accentué l'oubli des architectures vernaculaires et des savoir-faire, notamment à Lyon. Cette remise en question concernant le béton nous permet de revenir aux techniques de construction antérieures à son usage massif.

Les structures mixtes contenant du pisé me semblent être une solution équilibrée et raisonnable pour plusieurs raisons. Premièrement, le pisé est intéressant par son aspect écologique et par ses propriétés : la terre est un matériau biosourcé, résistant au feu et offrant une isolation thermique et acoustique performante. Deuxièmement, le retour de la construction en pisé en France marque une liaison avec l'histoire de Lyon, son architecture et son passé industriel. Troisièmement, la construction hybride est intéressante par son usage intelligent des matériaux, ce qui correspond aux principes des bâtiments durables, confortables, peu énergivores et à faible empreinte carbone.

Ce principe permet également de trouver un équilibre dans l'usage du béton, en lui attribuant une place raisonnée au sein d'un bâtiment ou d'autres infrastructures. Cet équilibre met à profit, pour l'architecture, les innovations et les avancées technologiques du béton, par exemple pour la création de fondations solides dans les zones inondables ou dans d'autres situations similaires.

3 Prototype de colonne en pisé conçue pour la maison de Bresse par François Cointeraux

L'étude du prototype de colonne en pisé conçu pour la maison de Bresse (fig. 37) par François Cointeraux permet d'aborder la terre non plus seulement comme un matériau du passé, mais comme un support d'expérimentation et de réflexion pour la construction d'aujourd'hui. À travers ce travail, il s'agit de comprendre comment Cointeraux a cherché à moderniser la mise en œuvre du pisé tout en conservant l'esprit des savoir-faire vernaculaires.

Ce chapitre présente d'abord une **analyse approfondie des pièces écrites et graphiques** des colonnes en pisé conçues par Cointeraux, afin d'en comprendre la logique constructive et la recherche d'efficacité qu'il développe à travers ses prototypes. Il s'attache ensuite au suivi de la construction du prototype réalisé dans le cadre de cette étude, en observant les choix techniques, les contraintes rencontrées et les ajustements nécessaires. Enfin, **un retour d'expérience** permet d'envisager **comment ce modèle peut évoluer** et trouver une place dans les pratiques contemporaines.

Il faut comprendre que ces dernières découvertes et inventions sont le résultat de son expérience et de son travail. Il décrit et illustre les colonnes en pisé, notamment la colonne avec un noyau central en bois, mais nous n'avons aucune trace qui témoigne de son réel intérêt et de son efficacité.

Les observations de cette mise en œuvre nous permettront d'aller plus loin, de regarder le travail de l'architecte avec un œil critique, de comprendre si son travail a un réel intérêt et de proposer des alternatives ainsi que des solutions contemporaines pour améliorer le système qu'il propose ou résoudre les failles détectées.

Construire ce prototype représente une étape importante dans la réflexion sur la réintégration du pisé dans la construction actuelle. Par l'association de la terre à d'autres matériaux, il ouvre la voie à de nouvelles structures capables de renforcer et de valoriser ce matériau. Cette approche, fondée sur la complémentarité des matières, permet d'imaginer le pisé non plus comme une exception, mais comme une composante possible d'une architecture contemporaine plus large, où le principe mis en œuvre dans cette colonne pourrait s'appliquer à d'autres éléments du bâtiment.

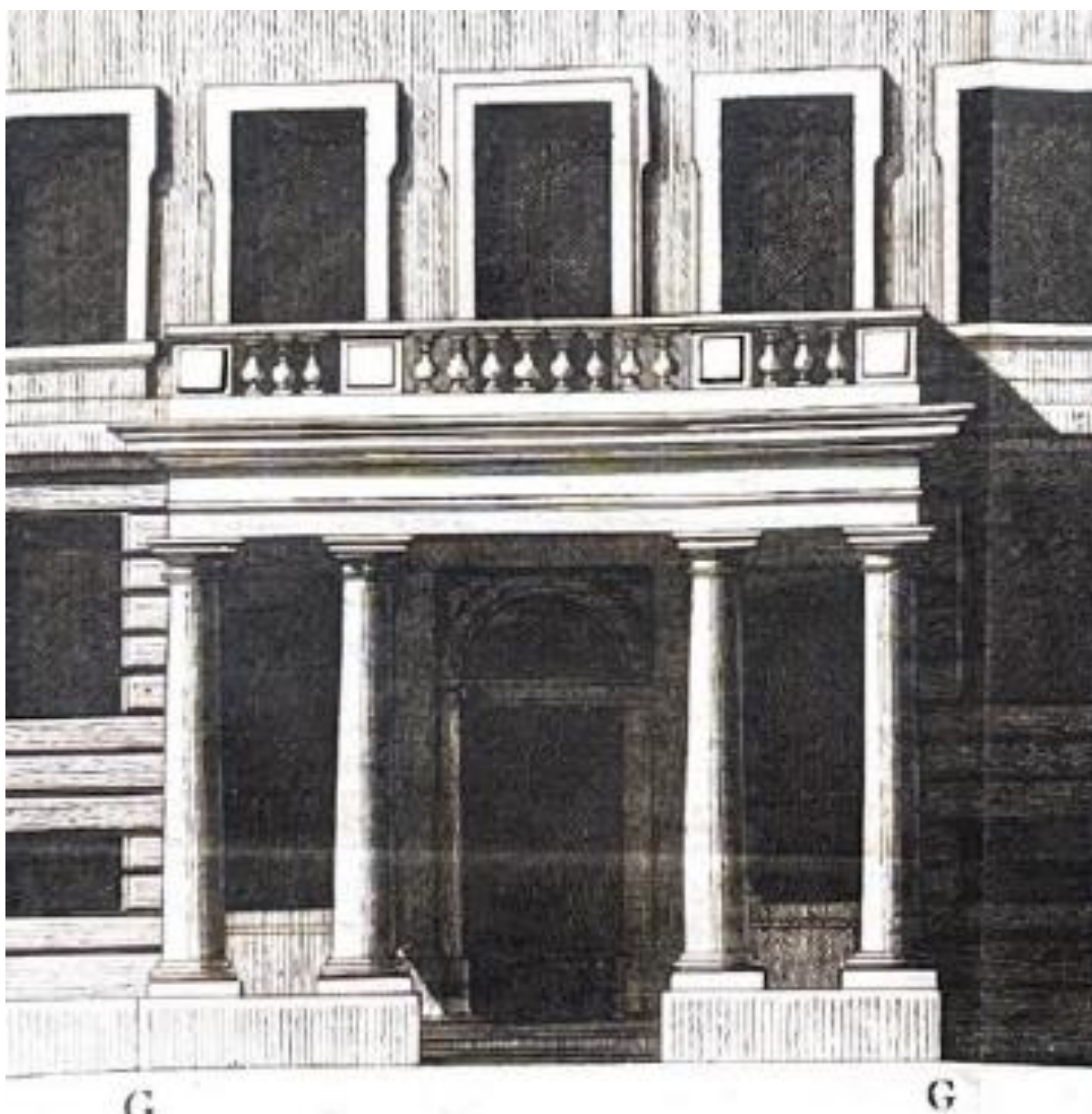


Figure 41 : Dessin : Extrait de l'élévation de la Maison de Bresse, montrant les colonnes en pisé conçu par François Cointeraux et son travail d'expérimentation sur la modernisation des éléments architecturaux en terre crue.

3.1 Analyse approfondie des colonnes en pisé de François Cointeraux

Nous allons procéder à des recherches et à une analyse des colonnes en pisé conçues par François Cointeraux pour une maison à Pont-de-Vaux, dans le département de l'Ain, autrefois pays de la Bresse. L'objectif est de **comprendre l'aspect structurel et esthétique** de ces éléments architecturaux, **comment ils ont été construits et comment nous allons procéder à leur reproduction** ultérieurement. Pour cette analyse, nous allons utiliser les descriptions et les documents graphiques de la maison de Bresse qu'il nous fournit, mais également des dessins de détails et des schémas de construction qu'il a réalisés.

Avant de commencer l'étude et la construction de la colonne, nous allons déterminer l'objectif et les attentes :

L'objectif est d'étudier et d'appliquer la technique de construction d'une colonne composite élaborée par un architecte pionnier du pisé, et d'expérimenter pour comprendre si cette technique est réellement réalisable. Cet expériment nous permettra de démontrer la possibilité de la mise en œuvre de cette colonne dont nous n'avons aucune trace physique et d'explorer les pistes d'améliorations possibles en intégrant des exemples contemporains de constructions en pisé. L'intérêt se trouve également dans le passage à l'acte de construction, qui nécessite une étude et une recherche amenant à l'élargissement du spectre de connaissances sur le pisé.

3.1.1 Analyse des documents graphiques

Nous trouverons le texte descriptif des colonnes dans l'œuvre *De la distribution des bâtiments de pisé* écrite par François Cointeraux.

Dans cette œuvre, les colonnes sont décrites aux pages 18 et 19. Nous allons soustraire les phrases qui décrivent leur apparence, leur construction et leur composition. Pour mieux comprendre, nous allons extraire les phrases qui contiennent des informations concernant les colonnes. Ces phrases seront complétées par des analyses et des hypothèses afin d'obtenir l'image la plus précise possible de ces constructions. Cela nous aidera également à comprendre comment construire un prototype.

Cette analyse sera organisée par thématiques pour mieux regrouper les informations et les retrouver plus facilement par la suite.

Nouveau pisé

Il faut utiliser « ...du plâtre pour faire les moulures des bases et des chapiteaux ».

Nous pouvons déduire que François Cointeraux fait référence à la technique du *nouveau pisé*.

Cette méthode consiste à mouler de la terre crue pour créer des pièces et les assembler.

Matérialité et proportions dans une structure mixte

En ce qui concerne la matérialité globale et la composition du fût :

« ...on peut faire ces colonnes avec le pisé ; et en y plaçant un axe en bois, on trouvera qu'avec ce bâti de charpente, on soutiendra à merveille le balcon et tout l'entablement au-dessus des colonnes... »

Le **poteau central en bois** devient donc un élément primordial pour augmenter la résistance de la colonne et sert également de précaution en cas d'érosion du pisé. C'est une bonne solution pour prévenir les incidents dus aux inondations ou à la détérioration liée au temps. L'élément en bois permet de maintenir les fonctions de soutien de la colonne le temps de sa réparation.

Cela est également confirmé par l'auteur dans les phrases suivantes :

« Mais si une colonne est moins durable en pisé ! Ne trouvera-t-on pas le gain par son économie, pour la faire reconstruire après soixante ans qu'elle peut être regardée ? »

« ...le noyau en bois que l'on peut mettre au centre du pisé est capable de supporter le poids total d'une maison entière... »

L'expression « le noyau en bois [...] est capable de supporter le poids total d'une maison entière » paraît exagérée et semble être utilisée dans le but de rassurer les lecteurs et le propriétaire de la maison sur la résistance et la fiabilité des colonnes ainsi que sur le système hybride imaginé.

Dans le cas où nous voudrions reproduire cette construction dans un bâtiment contemporain, il faudrait réfléchir au **rôle que nous voulons attribuer à chaque matériaux** et effectuer des calculs pour déterminer les dimensions des différents éléments de la colonne et de ceux qui reposent dessus. Ces calculs sont primordiaux pour assurer la capacité du noyau de la colonne à reprendre temporairement les charges nécessaires en cas d'accident.

Dimensions et aspect des colonnes

Nous pouvons calculer les dimensions des colonnes grâce aux indications données par le texte, mais surtout grâce aux documents graphiques accompagnés d'une échelle (fig. 36 - 38).

Le texte indique l'information suivante :

« Elles embrassent la hauteur de deux étages. »

Sur l'élévation, la hauteur du rez-de-chaussée est de 12 pieds (environ 3,7 m), sachant qu'il est légèrement enterré. La hauteur du premier et du deuxième étage est de 11 pieds chacun (environ 3,4 m).

Nous pouvons voir sur le document graphique que les colonnes ne font pas exactement la hauteur de deux étages : il faut retirer la hauteur du soubassement et du plancher du balcon. À l'aide des échelles de grandeur présentes sur certains plans dessinés à la même échelle, nous pouvons obtenir la hauteur des colonnes, soit environ 14,8 pieds (4,5 m) en pleine hauteur.

Sur l'élévation du côté jardin, intitulée *Façade d'un bâtiment de pisé peint à la fresque*, nous pouvons voir que les colonnes sont rondes et semblent être des colonnes toscanes romaines. Elles sont posées sur un soubassement général de 2,3 pieds (0,7 m) de hauteur.

Elles sont composées de :

- une base de 1,2 pied (0,40 m) de hauteur, composée d'une plinthe de 0,7 pied (0,2 m) de hauteur et de 3 pieds (0,9 m) de largeur, ainsi que d'un tore avec des filets de 0,7 pied (0,2 m) de hauteur et de 2,85 et 2,4 pieds (0,85 et 0,7 m) de largeur ;
- un fût de 12,35 pieds (3,75 m) de hauteur et 1,75 pied (0,5 m) de diamètre ;
- un chapiteau de 1,2 pied (0,35 m) de hauteur et de 3, 1,8 et 1,3 pieds (0,9, 0,55 et 0,4 m) de diamètre.

(Les mesures ont été prélevées sur les scans (fig. 36 – 38) des documents graphiques dessinés à la main par François Cointeraux. Les unités de mesure étant en pieds, une conversion en mètres et un arrondissement des valeurs ont été effectués afin d'obtenir des dimensions précises et exploitables. Il existe donc une légère marge d'erreur, mais les dimensions semblent cohérentes.)

Nous disposons seulement d'élévations et de plans qui ne donnent pas le détail de construction de ces colonnes en particulier. Cependant, François Cointeraux a pris soin de décrire et d'illustrer des exemples de colonnes construites en pisé.

On remarque que, pour la construction des colonnes qu'il illustre, l'architecte utilise son invention, qui est le *nouveau pisé* (fig. 12, 13, 30).

Nous remarquons que **les colonnes** décrites dans son analyse **de la maison de Bresse sont un mélange des deux exemples présentés dans ses dessins de détail** (fig. 42, 43). Les colonnes de la maison de Bresse sont rondes et contiennent un espace au milieu destiné à accueillir un axe en bois, ou plus précisément un poteau en bois.

L'observation des proportions et de la forme générale de la colonne permet de comprendre la logique constructive qui guide son dessin. Pour aller plus loin, il est nécessaire d'analyser plus précisément la composition des matériaux et les choix techniques qui en déterminent la résistance et la stabilité. Cela nous permettra de définir les dimensions et les détails des éléments qui composent la colonne à prendre en compte lors de la construction.

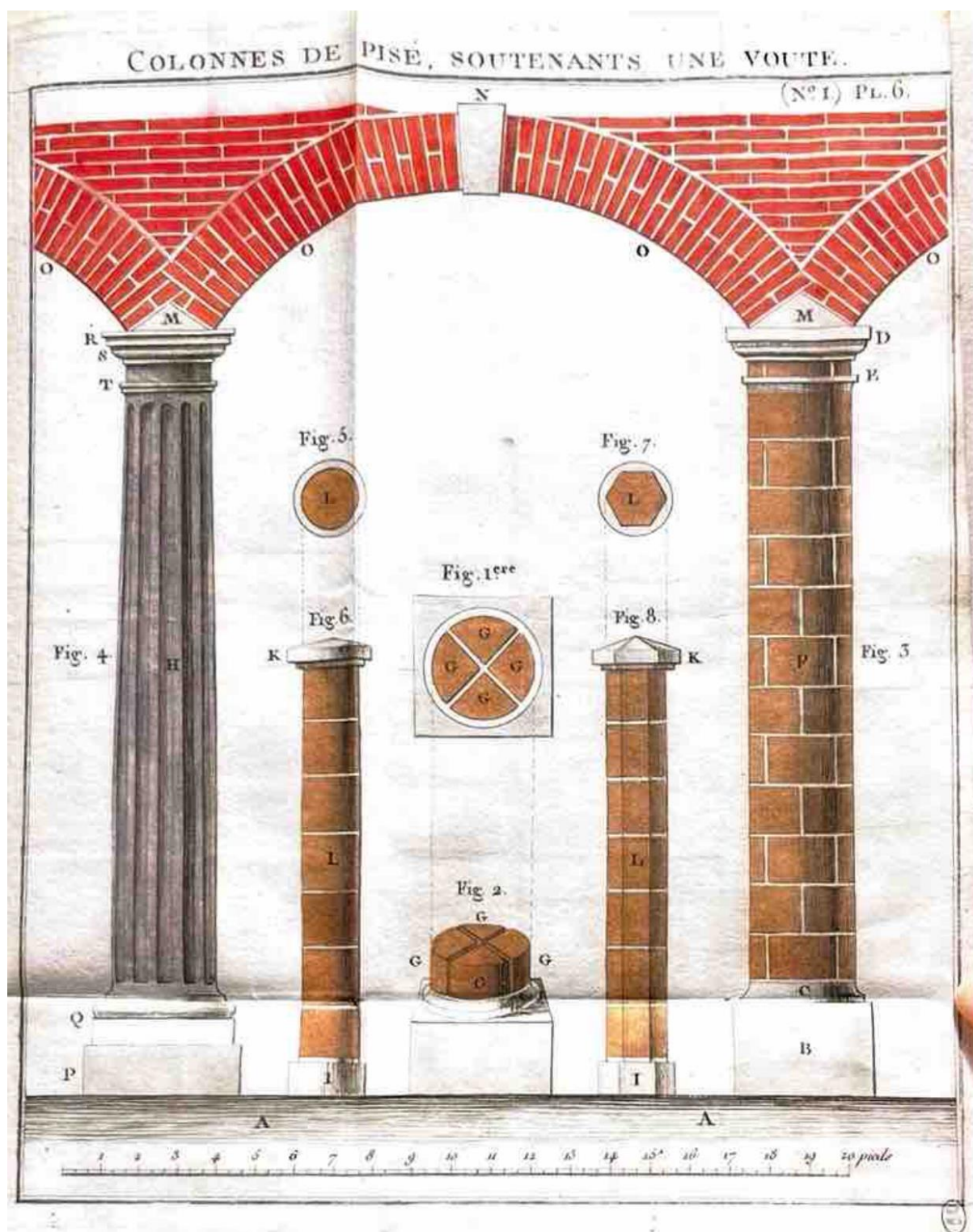


Figure 42 : Dessin : Colonnes de pisé soutenant une voûte (Pl. 6), montrant les colonnes et les assemblages de blocs de terre comprimée expérimentés par Cointeraux. Cette planche témoigne de sa volonté de moderniser le pisé en l'adaptant aux formes architecturales classiques. Source : François Cointeraux, École d'architecture rurale, Deuxième Cahier (N°1), ca. 1790–1793, BNF (scanné par l'auteur).

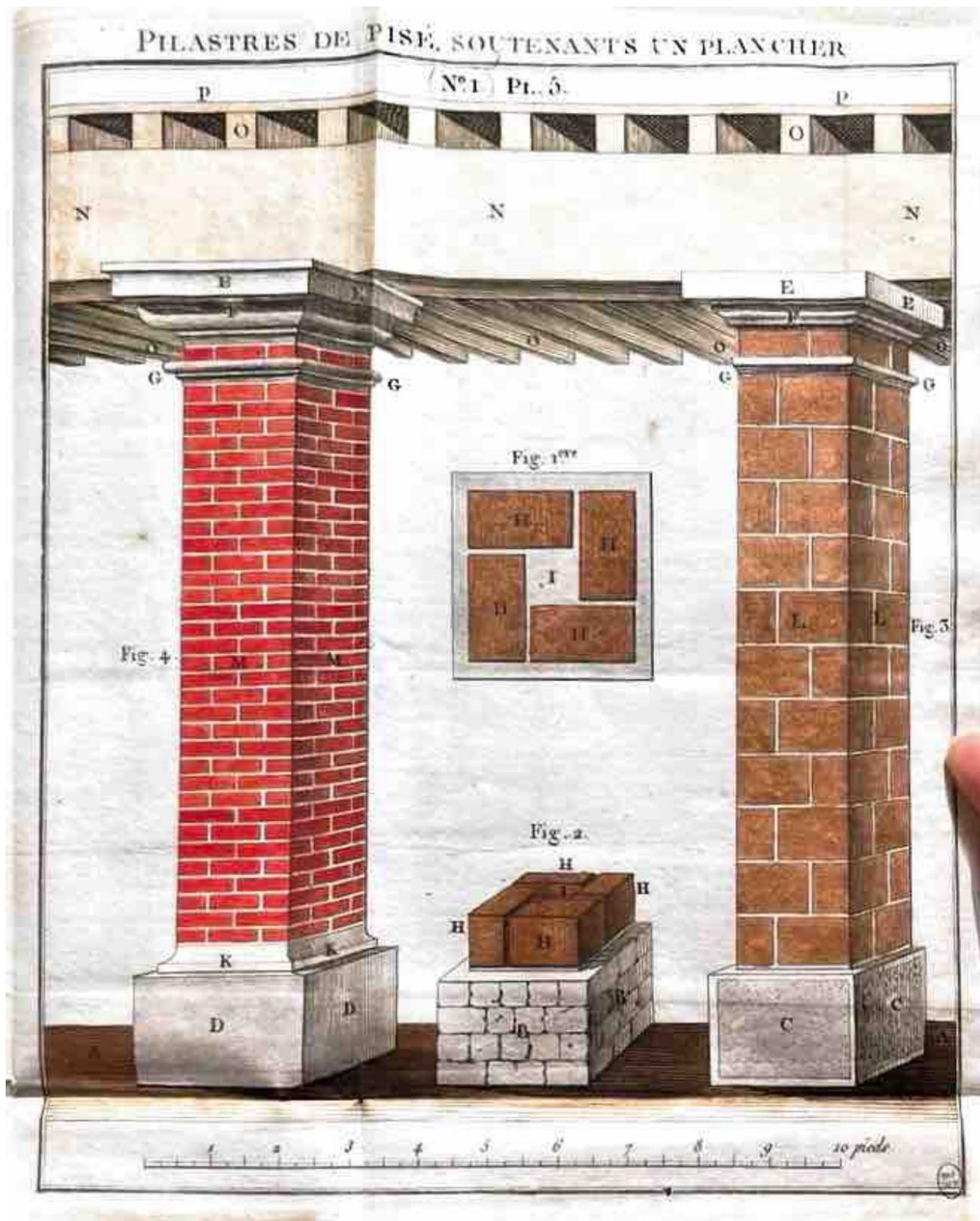


Figure 43 : Dessin : Pilastres de pisé soutenant un plancher (Pl. 5, N°1), présentant différents assemblages de blocs de terre comprimée et les solutions proposées par Cointeraux pour stabiliser les structures verticales en pisé. Cette planche illustre ses recherches sur la capacité portante du matériau et sur l'adaptation des formes classiques aux techniques de terre crue. Source : François Cointeraux, École d'architecture rurale, Deuxième Cahier (N°1), ca. 1790-179, BNF (scanné par l'auteur).

3.1.2 Details et processus de conception

Nous allons procéder à une réflexion sur les méthodes employées pour la construction d'un prototype de **colonne en pisé, avec un soubassement en pierre et un noyau en bois**. Ce qui nous intéresse est d'étudier **la jonction et l'interaction des différents matériaux** dans cette construction composite.

Dans la construction de ce prototype, je serai accompagnée par l'atelier de fabrication de l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Paris-Val de Seine. J'ai donc approché les dirigeants de l'atelier afin de discuter avec eux du projet et d'aborder également des sujets tels que la disponibilité et la récupération de matériaux, les outils disponibles, les détails et les modalités de construction. J'ai aussi contacté un fournisseur de terre de pisé pour lui poser des questions concernant la quantité de terre nécessaire et les modalités de transport.

Nous avons décidé de **reproduire seulement une partie de la colonne**, pour des raisons de déplacement, de stockage et d'impossibilité de construire jusqu'à une hauteur de 4,5 m (la hauteur extraite des documents graphiques). Le prototype aura une hauteur totale de 1,2 m. Le tore et le réglet en terre moulée ne seront pas réalisés. Nous allons nous concentrer sur l'assemblage de la base en pierre, du poteau en bois placé au centre et du fût composé de modules de pisé moulés.

Cependant, des croquis seront réalisés pour illustrer les détails de construction de l'ensemble de la colonne.

Nous savons que la base de la colonne est de 70 cm de hauteur, 90 cm de largeur et de longueur. Elle est faite en pierre, mais nous n'avons pas de détails concernant le type de pierre utilisé. Je pourrais récupérer de la **pierre calcaire**. Cette pierre sera facile à travailler et nous permettra de réutiliser de la matière inutilisée après la création d'autres projets de l'école. Les dimensions de la base que nous allons réaliser ne seront pas identiques à celles dessinées par François Cointeraux. Nous allons adapter les dimensions à celles des modules de pierre disponibles et à la décision de ne pas reproduire le tore et le réglet en terre moulée présents dans les dessins. De plus, une hauteur de 70 cm est inutile pour notre expérience et représenterait un gaspillage de matière. La décision de ne pas reproduire le tore et le réglet est prise afin que nous puissions nous concentrer sur la jonction des matériaux et l'assemblage de la base en pierre, du poteau en bois et des modules de pisé.

Avec la pierre disponible, nous pouvons réaliser quatre blocs de 15 cm de hauteur, 31 cm de largeur et 62 cm de longueur, pour les assembler et obtenir **une base de 30 cm de hauteur, 62 cm de largeur et de longueur**. Cette base convient au fût de la colonne, qui fera 50 cm de diamètre, comme indiqué par l'architecte.

Nous connaissons **les dimensions du fût, qui sont de 50 cm de diamètre**. L'étape suivante est donc de déterminer la section de bois qui se trouvera au centre du fût.

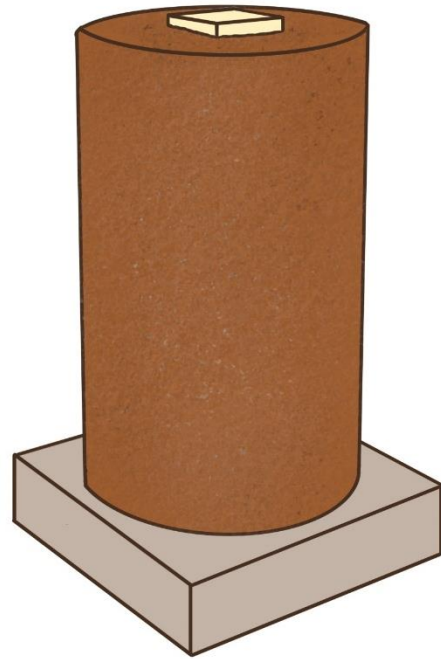


Figure 44 : Dessin : Schéma du prototype montrant la base en pierre obtenue par l'assemblage de quatre blocs de 15 × 31 × 62 cm et le fût en pisé de 50 cm de diamètre, conformément aux dimensions définies par l'architecte. Source : dessin de l'autrice.

Pour déterminer les mesures du poteau en bois, nous allons d'abord **évaluer le poids de la charge permanente** qui est censée retomber sur les colonnes dans le projet de la maison de Bresse. Pour cela, il faut calculer le poids total du balcon, puis déterminer quelle est la charge qui repose sur chaque poteau et quelle doit être sa section pour pouvoir, à elle seule, soutenir le poids nécessaire en cas d'accident. Nous allons essayer d'optimiser la section en bois et, pour cela, nous allons réfléchir à des points tels que le type de bois utilisé (et typique de la région), le type de liaisons (articulation, encastrement) ou encore la forme la plus stable et la plus intéressante pour la création et l'assemblage des modules de pisé moulé.

Prendre les mesures des éléments composant le balcon de la maison de Bresse (fig. 34, 37) nous aidera à vérifier et démontrer, à travers un exemple réel, s'il est possible d'intégrer un poteau en bois dans une colonne en pisé tout en gardant une proportion de terre prédominante.

Le balcon a une aire totale de 25,8 m² et une aire capable d'accueillir des personnes de 16 m².

La structure du balcon, le plancher, est sûrement faite en bois. Cela n'est pas décrit dans les ouvrages, mais nous savons, grâce aux recherches effectuées sur les cinq bâtiments en pisé, que les planchers sont faits en bois et que c'est le matériau utilisé par défaut pour ces éléments. De plus, nous pouvons le deviner dans les documents graphiques, notamment les coupes.

Le balcon est donc constitué d'un plancher en bois, d'un entablement au-dessus des colonnes fait soit en plâtre soit en terre (p.18), d'une poutre en pierre entre l'entablement et les colonnes et d'une balustrade en pierre de taille (p.22) d'une longueur d'environ 12 m.

Nous allons nous intéresser au poids total de ce balcon, et plus précisément à la charge permanente qui sera reprise par la façade et les colonnes. Pour cela, nous allons calculer le poids de chaque élément qui le compose.

(Les mesures ont été prélevées sur les scans des documents graphiques dessinés à la main par François Cointeraux. Les unités de mesure étant en pieds, une conversion en mètres et un arrondissement des valeurs ont été effectués afin d'obtenir des dimensions précises et exploitables. Il existe donc une légère marge d'erreur, mais les dimensions semblent cohérentes.)

Le plancher en bois :

Le type de bois n'est pas donné par l'architecte, mais nous pouvons supposer qu'il s'agit de sapin ou d'épicéa, bois fortement utilisés au XIX^e siècle dans la région lyonnaise car ils étaient les plus disponibles.

Le poids de 1 m² de plancher en bois est d'environ 25 kg.

$$25,8 \times 25 = \mathbf{645 \text{ kg}}$$

Le plancher du balcon de 25,8 m² pèse donc environ 645 kg.

La balustrade en pierre de taille :

Pour calculer le poids total de la balustrade de 12 m de longueur, nous allons d'abord calculer le poids de chaque élément qui la compose, puis les additionner.

La pierre choisie sera une pierre calcaire dure, qui a une densité $\rho = 2\,500 \text{ kg/m}^3$.

28 balustres d'une hauteur de 0,70 m et d'un diamètre moyen de 0,18 m (rayon de 0,09 m)

$$\text{Volume d'un balustre} = \pi \times r^2 \times h = 3,14 \times 0,09^2 \times 0,70 = 0,0178 \text{ m}^3$$

$$\text{Volume de 28 balustres} = 0,0178 \times 28 = 0,499 \text{ m}^3$$

$$\text{Poids de 28 balustres} = \rho \times V = 2\,500 \times 0,499 = \mathbf{1\,247 \text{ kg}}$$

4 blocs de pierre de 0,60 m de largeur, 0,25 m d'épaisseur et 0,70 m de hauteur

$$\text{Volume d'un bloc} = L \times l \times h = 0,60 \times 0,25 \times 0,70 = 0,105 \text{ m}^3$$

$$\text{Volume de 4 blocs} = 4 \times 0,105 = 0,420 \text{ m}^3$$

$$\text{Poids de 4 blocs} = \rho \times V = 2\,500 \times 0,420 = \mathbf{1\,050 \text{ kg}}$$

Base continue de 12 m de longueur avec une section de 0,30 m sur 0,25 m

$$\text{Volume de la base} = \text{section} \times L = 0,30 \times 0,25 \times 12 = 0,90 \text{ m}^3$$

$$\text{Poids de la base} = \rho \times V = 2\,500 \times 0,90 = \mathbf{2\,250 \text{ kg}}$$

Main courante de 12 m de longueur et une section de 0,15 m sur 0,25 m

$$\text{Volume} = \text{section} \times L = 0,15 \times 0,25 \times 12 = 0,45 \text{ m}^3$$

$$\text{Poids de la main courante} = \rho \times V = 2\,500 \times 0,45 = \mathbf{1\,125 \text{ kg}}$$

Poids total de la balustrade en pierre de taille :

$$1\,247 + 1\,050 + 2\,250 + 1\,125 = \mathbf{5,67 \text{ t}}$$

L'entablement en terre :

La terre est privilégiée car les colonnes et une partie conséquente de la maison sont réalisées en terre, ce qui permet de garder une unité visuelle.

L'architecte ne décrit pas les proportions précises ni les détails de construction et d'assemblage de cet entablement, mais nous allons utiliser les documents graphiques pour estimer les proportions.

L'entablement a une longueur totale approximative de 14,6 m, une largeur de 0,80 m et une épaisseur de 0,40 m. La section de l'entablement ressemble à un triangle, nous allons donc diviser le poids total par deux.

Le pisé a une densité qui varie entre $1\,800\text{ kg/m}^3$ et $2\,200\text{ kg/m}^3$; nous choisissons donc $\rho = 2\,000\text{ kg/m}^3$.

Volume de l'entablement (section carrée) = section $\times$ L = $0,80 \times 0,40 \times 14,6 = 4,67\text{ m}^3$

Poids de l'entablement (section carrée) = $\rho \times V = 2\,000 \times 4,67 = \mathbf{9\,344\text{ kg}}$

Poids final de l'entablement (section triangulaire) = $9\,344 / 2 = \mathbf{4\,672\text{ kg}}$

Corps en maçonnerie :

Les corps de maçonnerie sont des poutres en pierre qui reposent sur les colonnes. Elles font une longueur totale de 12m environs, une largeur de 50 cm , ce qui correspond au diamètre de la colonne, et une hauteur de 1.25 m.

La pierre choisie sera une pierre calcaire dure, qui a une densité $\rho = 2\,500\text{ kg/m}^3$.

$7,5 \times 2500 = \mathbf{18\,750\text{ kg} = 18.8\text{ t}}$

Poids total du balcon :

Poids total = $645 + 5\,672 + 4\,672 + 18\,750 = \mathbf{29\,739\text{kg} = 29,74\text{ t}}$

Maintenant que nous connaissons le poids total approximatif du balcon, qui représente la charge permanente retombant sur la façade et les deux colonnes, nous allons procéder au calcul de la charge qui repose sur une seule colonne.

Dans une construction parfaite et symétrique, les retombées des charges se font de manière uniforme. Nous appliquerons l'hypothèse selon laquelle 50 % des charges retombent sur la ligne murale, la façade, et les autres 50 % sont équitablement réparties sur les deux colonnes. Il en résulte que chaque colonne porte un quart du poids total du balcon.

Charges permanentes supportées par une colonne :

Poids du balcon / 4 = $29,74\text{ t} / 4 = 7,44\text{ t} \approx \mathbf{73,05\text{ kN}}$

L'étape suivante consiste à **déterminer la section d'un poteau en bois de 3,75 m de hauteur** capable de soutenir une charge de 7,44 t (soit un effort de calcul de 73,05 kN) sans risque de flambement. Aucun détail n'est donné par François Cointeraux sur les assemblages et les jonctions du poteau en bois avec le soubassement en pierre. Nous allons donc réfléchir à ce sujet.

Le poteau sera lié au soubassement en pierre par une articulation, et au balcon par un encastrement. Le pied du poteau est articulé grâce à un goujon d'ancrage³⁰, qui bloque les déplacements latéraux tout en maintenant une liberté de rotation. Cette articulation fonctionne comme une petite rotule : elle stabilise le poteau en empêchant le glissement au sol, mais elle laisse le bois pivoter légèrement, ce qui permet d'éviter des contraintes inutiles et les risques d'arrachement ou de cisaillement. Dans ce schéma — poteau articulé en bas et encasté en haut — le coefficient de flambement est pris égal à $k = 0,70$.

L'encastrement en tête de poteau bloque toute rotation et tout déplacement horizontal, assurant le contreventement latéral de la structure et ajoutant de la stabilité. Nous n'allons pas reproduire l'articulation dans le prototype, mais nous l'étudions ici pour compléter la compréhension du système composite terre-bois.

Le bois utilisé est du sapin ou de l'épicéa de structure (classe C24). Les données nécessaires proviennent de l'Eurocode 5 (vérification du flambement). Cointeraux indique que le noyau en bois doit être capable de reprendre seul la charge permanente du balcon. Notre objectif est donc de déterminer la section minimale du poteau permettant de reprendre cette charge dans le cas où la terre serait affaiblie, dégradée ou même absente.

30. Tige métallique insérée dans un support pour fixer solidement un élément porteur. (Construction).

Données de calcul du poteau en bois (bois C24 – Eurocode 5) :

Longueur réelle : $L = 3\,750\text{ mm}$

Schéma d'appuis : tête encastrée / pied articulé $\rightarrow$ coefficient $k = 0,70$

Longueur de flambement :

$$l_0 = k \times L = 0,70 \times 3\,750 = 2\,625\text{ mm}$$

Effort de calcul :

$$N_n = 73,05\text{ kN} = 73\,050\text{ N}$$

Propriétés du bois C24 :

Module d'élasticité : $E_{0,\text{mean}} = 11\,000\text{ N/mm}^2$

Résistance caractéristique en compression : $f_{c,0,k} = 21\text{ N/mm}^2$

Coefficient de modification : $k_{\text{mod}} = 0,6$

Coefficient partiel : $\gamma^M = 1,3$

Résistance de calcul en compression parallèle au fil :

$$f_{c,0,d} = (k_{\text{mod}} \times f_{c,0,k}) / \gamma^M$$

$$f_{c,0,d} = (0,6 \times 21) / 1,3 = 9,692\text{ N/mm}^2$$

Courbe de flambement : $\alpha = 0,20$

Formules utilisées pour une section carrée de côté a :

$$A = a^2$$

$$I = a^4 / 12$$

$$i = a / \sqrt{12}$$

$$N_{cr} = (\pi^2 \times E \times I) / l_0^2$$

$$\lambda_{rel} = \sqrt{(A \times f_{c,0,k} / N_{cr})}$$

$$\phi = 1/2 \times [1 + \alpha(\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2]$$

$$k_c = 1 / [\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_{rel}^2}]$$

$$N_{c,Rd}(a) = k_c \times f_{c,0,d} \times A$$

Condition de stabilité :

$$N_{c,Rd}(a) \geq N_d$$

Recherche de la section minimale :

Nous cherchons la section a telle que $N_{c,Rd}(a) \geq 73,05 \text{ kN}$.

Les résultats obtenus sont les suivants :

Pour $a = 113 \text{ mm} \rightarrow N_{c,Rd} \approx \mathbf{74,4 \text{ kN}}$

La section minimale théorique est donc d'environ $113 \times 113 \text{ mm}$, soit environ $11,3 \times 11,3 \text{ cm}$.

Vérification avec une section de $14 \times 14 \text{ cm}$:

Pour $a = 140 \text{ mm}$:

$$A = 19\,600 \text{ mm}^2$$

$$k_c \approx 0,759$$

$$N_{c,Rd} = 0,759 \times 9,692 \times 19\,600 \approx 144,2 \text{ kN}$$

On vérifie donc :

$$144,2 \text{ kN} > 73,05 \text{ kN}$$

La section $14 \times 14 \text{ cm}$ offre une marge de sécurité très confortable vis-à-vis du flambement.

Conclusion sur le dimensionnement :

Les calculs montrent qu'une section minimale d'environ $11,3 \times 11,3$ cm suffit pour reprendre la charge permanente de 7,44 t (73,05 kN) sans risque de flambement.

Cependant, cette valeur constitue un minimum théorique et la forme des modules en pisé serait fragile à cause des angles trop petits.

De plus, utiliser un poteau **d'une section de 14cm x 14 cm** permet d'éliminer des imprécisions d'exécution lors de la compression de la terre, des déformations différées du bois (fluage), des variations hygrométriques et des surcharges accidentelles et des interactions avec la terre comprimée.

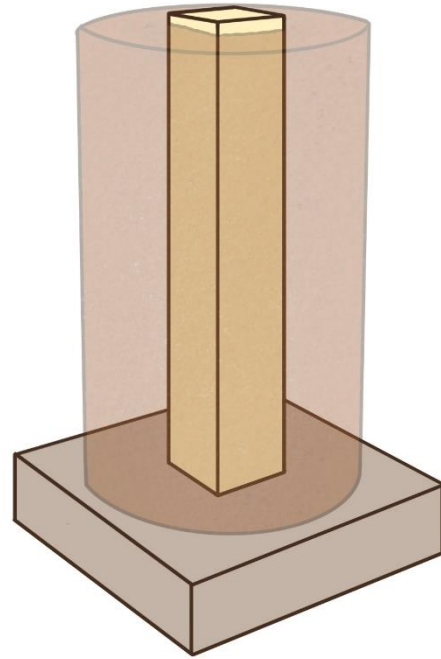


Figure 45 : Dessin : Schéma du prototype montrant la base en pierre et le fût en pisé de 50 cm de diamètre, ici représenté en transparence pour révéler le poteau en bois intérieur de section 14×14 cm. Source : dessin de l'autrice.

Cette section reste compatible avec l'échelle de la colonne, tout en apportant une robustesse supplémentaire indispensable à une structure composite terre-bois fonctionnant dans des conditions réelles.

Articulation du poteau en bois à la base en pierre :

Pour lier le poteau en bois et la pierre, nous allons chercher des informations dans le *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI^e au XVI^e siècle* d'Eugène Viollet-le-Duc, puisque François Cointeraux ne nous donne pas de détails à ce sujet.

Une des possibilités de jonction du poteau au socle, par une articulation, est de la réaliser à l'aide d'un **goujon**. Viollet-le-Duc affirme, à la page 423 de son 4^e volume, qu'« ... il existe un goujon également en cuivre en I ; un autre goujon en cuivre maintient le bras supérieur, la traverse et le montant. Tous les joints et goujons sont coulés en plomb avec beaucoup de soin. » Nous allons utiliser cette technique pour réaliser notre articulation, mais nous n'allons pas couler de plomb à cause de sa toxicité. Une autre technique courante consiste à remplacer le plomb par du mortier de chaux, ce que nous allons faire. Maintenant que nous avons récolté les informations nécessaires sur la base en pierre, le poteau en bois et leur jonction, nous allons nous intéresser à la création des modules de pisé.

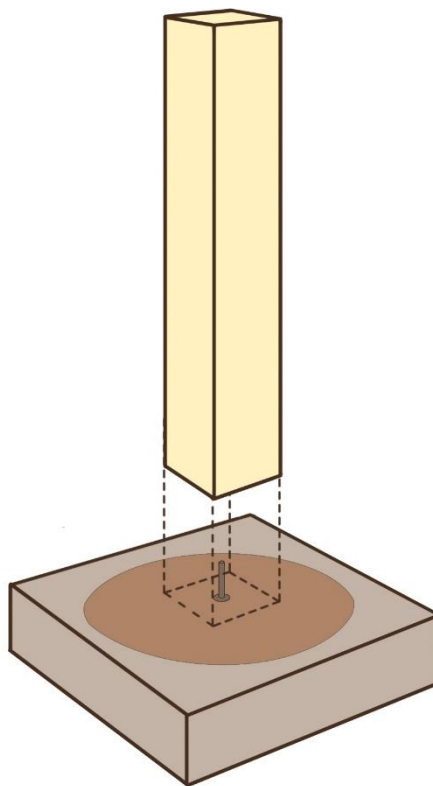


Figure 46 : Dessin : Schéma illustrant l'articulation entre le poteau en bois et la base en pierre, réalisée grâce à un goujon d'ancrage en inox et à une couche de mortier de chaux assurant stabilité et protection contre les remontées d'humidité. Source : dessin de l'autrice.

Modules en pisé :

Ces modules sont créés grâce à des **moules en bois**. Nous avons pu voir sur l'un des dessins (fig. 30) de François Cointeraux un exemple de moules. Nous allons nous en inspirer pour confectionner des moules adaptés à notre colonne, qui est en forme de cylindre avec un diamètre de 50 cm et un noyau central carré de 14 cm sur 14 cm.

Pour déterminer la forme des moules, la section de la colonne a été divisée en quatre, tout en prenant en compte les dimensions de l'axe central en bois. La hauteur des moules est de 30 cm ; elle a été prélevée dans les documents graphiques de l'architecte (fig. 30).

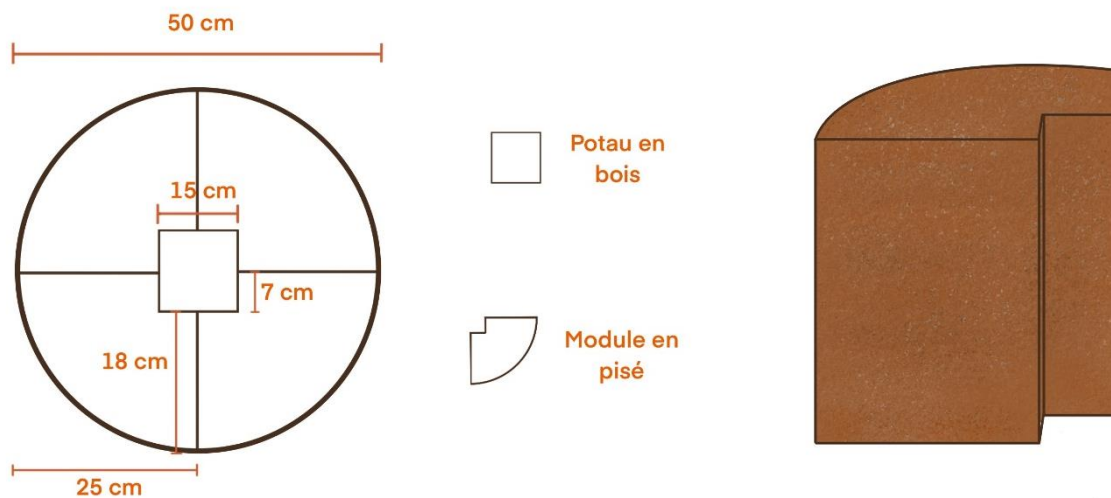


Figure 47 et 48 : Dessins : Le premier schéma montre la division de la section de la colonne (50 cm de diamètre) en quatre parties autour d'un noyau en bois de 14 cm x 14 cm, permettant de définir précisément la géométrie des moules de 30 cm de hauteur. Le second schéma illustre la forme d'un module en pisé obtenu à partir du moule en bois. Source : dessins de l'autrice.

Moule :

Dans ces dessins (fig. 30), nous retrouvons aussi la composition du système entier de moulage et de compression. François Cointeraux nous indique les différentes parties : nous pouvons observer sur l'image le *maître-moule* qui renferme plusieurs petits moules. Le grand moule permet de fixer les éléments du petit moule et d'assurer la résistance lorsque la terre est tassée. Pour la réalisation des moules de notre prototype, nous allons adapter ce système. Nous allons créer un grand moule, qui ne sera pas identique à celui de l'architecte. Il sera plus petit, étant donné que nous avons besoin de lui uniquement pour fixer un seul petit moule composé de deux éléments.

Pour confectionner les moules, nous allons récupérer des plaques de bois à la récupérathèque, découper les formes nécessaires et les coller ensemble en les superposant pour créer la masse nécessaire. Les longueurs maximales des formes sont de 25 cm. La décision d'ajouter 10 cm autour a été prise pour garantir la résistance du moule face à la pression exercée par la compression de la terre.

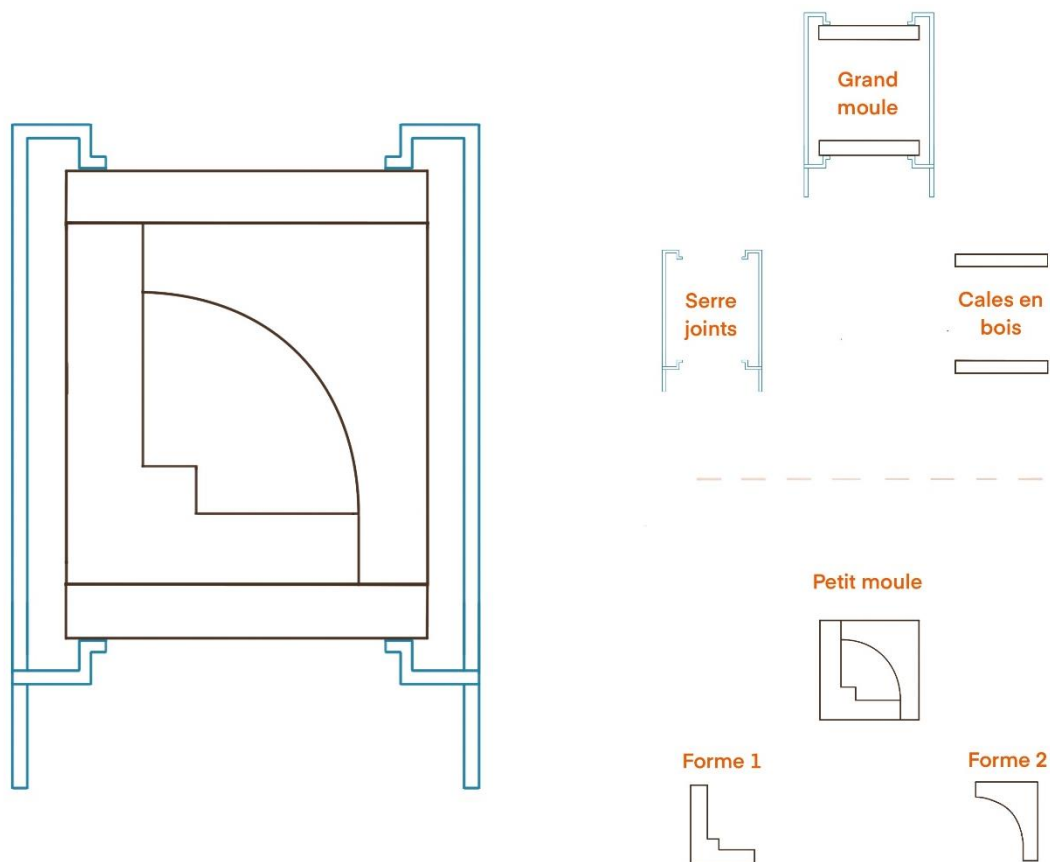


Figure 49 : Dessin : À gauche, schéma du moule inspiré du système de Cointeraux. À droite, décomposition des éléments : grand moule, petit moule et formes qui les composent. Source : dessin de l'autrice.

Une fois le moule terminé, il suffira de verser des couches de **15 à 20 cm de terre** et de les **tasser avec un petit poteau en bois à section carrée**, qui fera office de putoir. Ce choix est fait car le poids du poteau sera utile pour le tassage, et la section carrée est la forme la plus adaptée pour tasser dans un moule de la forme que nous avons déterminée.

Les modules de pisé seront directement **confectionnés sur des planches de bois** afin d'être facilement transportables. **Ils sécheront une vingtaine de jours** avant d'être prêts pour l'assemblage de la colonne. Ces modules seront **fixés** les uns aux autres **à l'aide d'un mortier de terre**.

Voici le résumé du processus d'assemblage de la colonne : nous allons donc réaliser la base en pierre, articuler le poteau à l'aide du goujon et du mortier de terre, confectionner des modules en terre grâce au moule (ou plutôt au moule préparé au préalable), attendre que le pisé soit prêt à être manipulé, puis assembler ces modules autour du poteau en bois en les fixant avec du mortier de chaux.

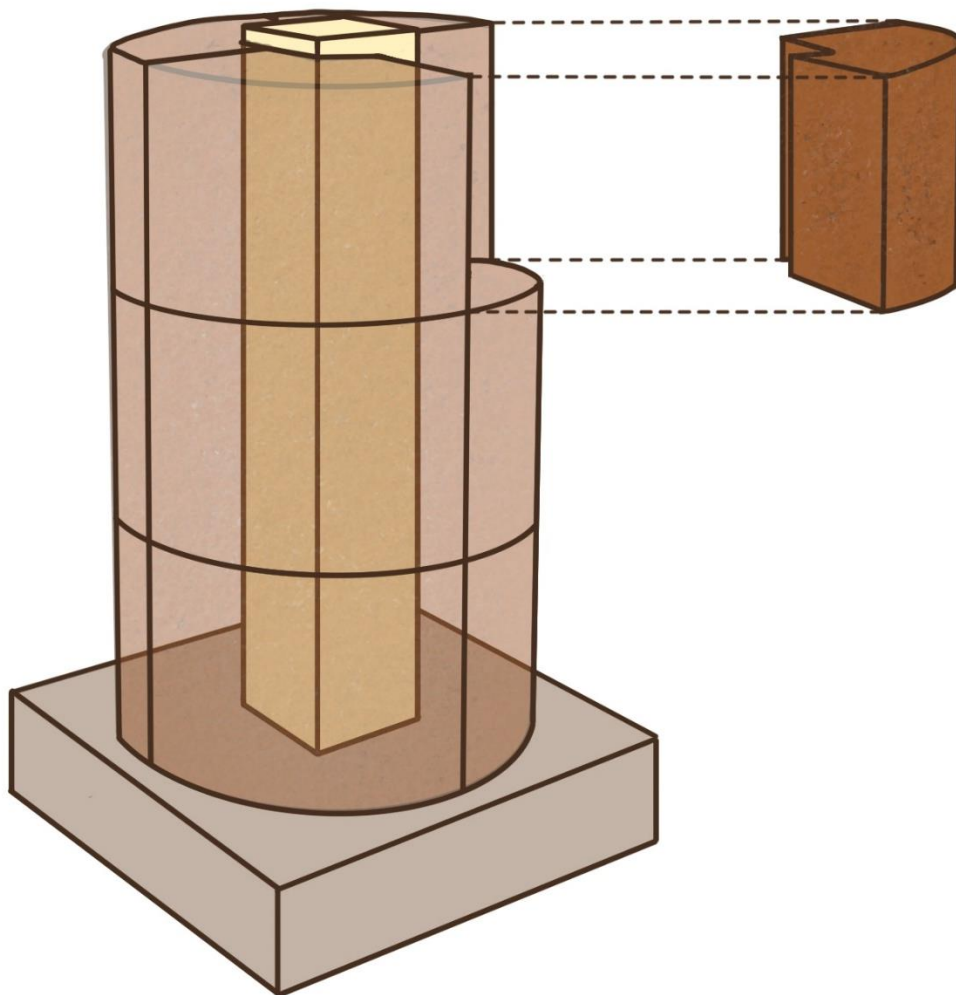


Figure 50 : Dessin : Schéma illustrant le processus d'assemblage des modules en pisé autour du poteau en bois, chaque module venant s'emboîter successivement pour former le fût de la colonne. Source : dessin de l'autrice.

Encastrement du poteau en bois au corps en pierre :

Nous sommes maintenant prêts à passer à la construction de la colonne, à réaliser un suivi de construction du prototype et à nous confronter à la réalité de sa mise en œuvre. Mais avant cette étape nous allons nous intéresser à **l'encastrement de la tête de poteau au corps en pierre maintenant le balcon et à la fabrication du tore, de la scotie et de l'échine**. Même si ces éléments ne seront pas reproduits dans le prototype, cette étude rapide nous permettra de compléter les recherches autour de cette colonne composite.

Dans le contexte lyonnais du début du XIX^e siècle, **l'encastrement d'un poteau en bois dans un corps de maçonnerie** (une poutre en pierre) se faisait généralement par un **logement taillé directement dans la pierre**, dans lequel le bois était simplement posé, calé et bloqué à la chaux. Cette technique, courante dans les traboules, coursives et escaliers des immeubles canuts, reposait sur une culture constructive où pierre calcaire locale et chaux hydraulique formaient un ensemble perspirant et durable. L'objectif de cette pratique était surtout de laisser les matériaux travailler : la chaux régulait l'humidité, amortissait les variations du bois et permettait un assemblage réversible, robuste et compatible avec les savoir-faire artisans de l'époque. Ce type d'encastrement constituait ainsi la solution la plus naturelle et la plus cohérente dans le contexte technique et climatique lyonnais. Cela est décrit dans le *Plan de sauvegarde et de mise en valeur du Vieux Lyon 30.09.1997*.

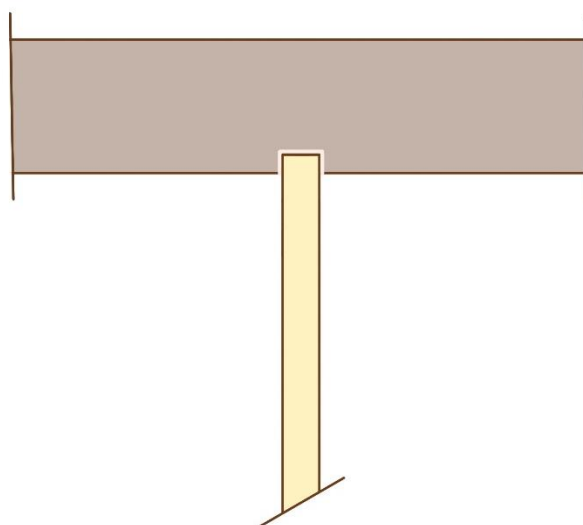


Figure 51 : Dessin : Schéma d'un poteau en bois encastré dans une poutre en pierre, selon les pratiques constructives lyonnaises du début du XIX^e siècle. Le bois est logé dans une réservation taillée dans la pierre, puis calé et bloqué à la chaux Source : dessin de l'autrice.

Tore et chapiteau – nouveau pisé:

Cointeraux a développé sa technique de *nouveau pisé* notamment pour fabriquer des modules capables de former le tore, la scotie ou encore l'échine des colonnes. Ces éléments peuvent être **tassés dans des moules en plâtre**, comme il le décrit dans le texte analysé précédemment et comme l'illustrent les documents graphiques qu'il fournit à propos de ses coffrages.

Maintenant que l'ensemble des composants d'une colonne composite en pisé, organisée autour d'un axe central en bois, a été analysé, nous pouvons passer à la construction du prototype.

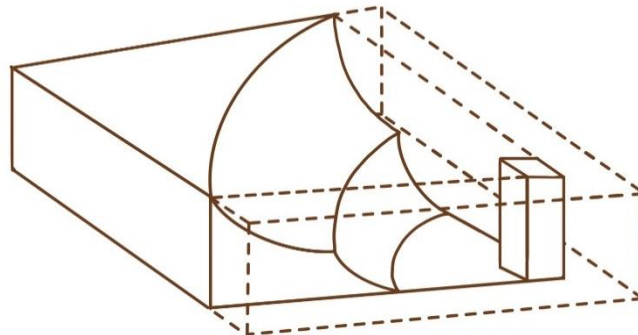


Figure 52 : Dessin : Schéma représentant une interprétation des dessins de François Cointeraux, adaptée à la fabrication de modules en pisé pour la colonne étudiée. Source : dessin de l'autrice.

3.2 Suivi de construction du prototype

Avant de commencer la construction du prototype et le suivi de celui-ci, je tiens à rappeler sa nature expérimentale. Cela signifie que tout sera documenté : autant les réussites que les échecs, ainsi que les solutions trouvées.

Ce suivi sera illustré par des photos prises tout au long du processus de travail. L'objectif est de déterminer les points forts et faibles de ce système, de détecter des incohérences si elles existent et d'avoir un regard critique et objectif sur ce système afin de proposer des solutions et des pistes d'amélioration et d'adaptation au mode de construction contemporain.

3.2.1 Le moule en bois

Forme finale du moule :

Pour la conception de ce premier élément, qui est aussi l'outil principal de la construction du pisé, j'ai été guidée et aidée par l'atelier bois de l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Paris-Val de Seine.

La discussion avec les moniteurs de l'atelier, qui sont menuisiers, et architecte pour l'un d'entre eux, m'a permis de choisir une technique de construction du moule, la matière employée et les outils avec lesquels j'ai travaillé.

La première étape dans la création de ce moule est **sa conception et sa forme**.

Nous voulons une colonne avec une section ronde de 50 cm de diamètre et un poteau en bois de section carrée, avec des côtés de 14 cm.

Comme mentionné auparavant, j'ai commencé par dessiner une coupe de cette colonne (fig. 47).

Le choix de **couper la section en quatre** m'a permis de garder une cohérence avec les dessins de l'architecte et m'a semblé le plus adapté pour fabriquer des modules de pisé assez massifs pour garantir leur solidité et la rapidité d'assemblage, tout en restant suffisamment petits et donc plus légers pour permettre à une ou deux personnes de les déplacer.

Dans l'ensemble, elle rentre dans un carré de 25 cm de largeur et de longueur. Ses surfaces de contact entre deux modules sont de 18 cm et celles en contact avec le poteau central de 7 cm. La hauteur du moule est de 30 cm ; cette information a été prélevée dans les dessins de détail de l'architecte.

Pour assurer la solidité du moule, que ce soit face à la poussée exercée par la terre lors de sa compression ou à la force exercée par la fixation dans le grand moule, nous allons choisir des parois de 10 cm d'épaisseur.

Comme mentionné lors du processus de conception, le grand moule sera inspiré de celui de Cointeraux, mais adapté aux moyens disponibles, nous avons besoin d'un seul petit moule, contrairement aux nombreux petits moules imbriqués dans le grand moule de l'architecte.

Il est important de **pouvoir ouvrir le moule** pour extraire le module de pisé sans l'abîmer. Pour cela, la forme est scindée en deux.

Le moule est composé de plusieurs plaques de bois que j'ai pu récupérer à la récupérathèque.

Ces plaques sont de différents types de bois et de dimensions variées ; l'objectif a été de les assembler en une seule pièce. Elles sont de tailles différentes, mais la dimension minimale choisie est de 45 cm. Ce choix a été fait pour que la section des modules en pisé puisse rentrer à l'intérieur avec des marges supplémentaires d'au moins 10 cm de chaque côté, ce qui correspond à la surface des plaques de bois utilisées pour le moule.

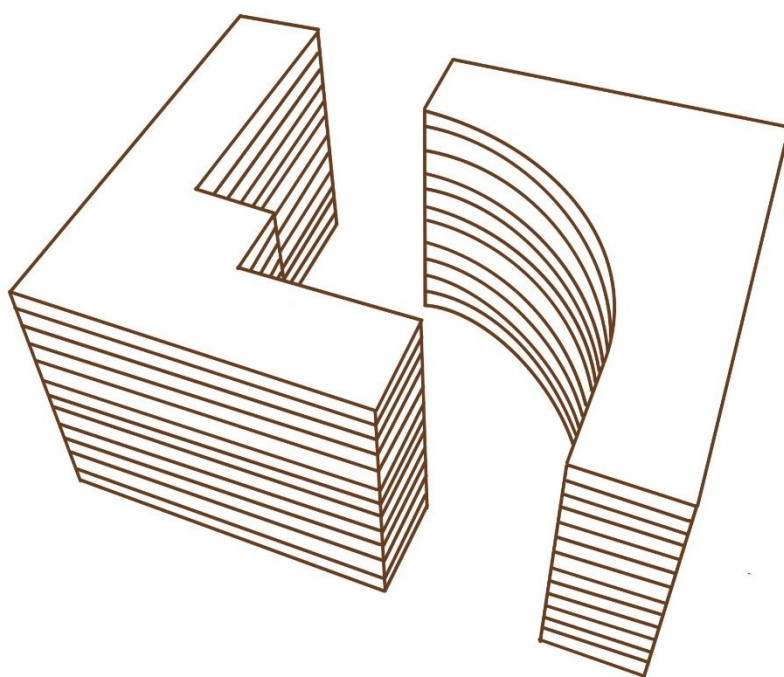


Figure 53 : Dessin : Axonométrie du moule en bois composé de plaques récupérées et superposées.
Source : dessin de l'autrice.

Découpe des planches de bois et réalisation du moule :

Maintenant que les plaques sont choisies, nous passons à la réalisation d'un **patron**. Je commence par dessiner les deux formes du moule sur une plaque.



Figure 54 : Photo : Traçage des contours du moule sur une plaque de bois. Source : photo de l'auteur.

Elle est fixée sur une table à l'aide de serre-joints³¹. À l'aide d'une perceuse, je réalise des trous à des points stratégiques de la plaque, autour du dessin, pour permettre l'introduction d'une scie sauteuse³² avec laquelle la découpe est effectuée.

Une fois les patrons découpés, ils nécessitent un ponçage des bords pour qu'ils soient lisses et précis.



Figure 55 : Photo : Découpe du patron dans la plaque de bois à l'aide d'une perceuse et d'une scie sauteuse, la pièce étant maintenue par des serre-joints. Source : photo de l'auteure.

31. Outil de serrage composé de deux mors permettant de maintenir fermement des pièces entre elles pendant l'usinage ou le collage. (Dicobat, Outillage)

32. Outil électroportatif dont la lame effectue un mouvement alternatif pour réaliser des découpes courbes ou complexes. (Outillage).

L'étape suivante consiste à **reproduire le dessin** à l'aide des patrons sur l'ensemble des plaques de bois, puis à les découper. La méthode de découpe est la même que celle utilisée pour les patrons.



Figure 56 : Photo : Reproduction des formes et découpe des différentes plaques composant le futur moule, à partir des gabarits préalablement réalisés. Source : photo de l'auteure.

L'étape finale consiste à **éliminer le bois excédentaire** tout autour des formes en bois. Pour cela, nous allons nous servir des patrons, d'une affleureuse³³ et d'une installation créée pour fixer les patrons et les autres formes. Cette dernière étape consiste à visser les patrons dans l'installation, poser dessus une forme et la serrer avec des sauterelles mécaniques³⁴ afin de copier la forme exacte du patron à l'aide de l'affleureuse.

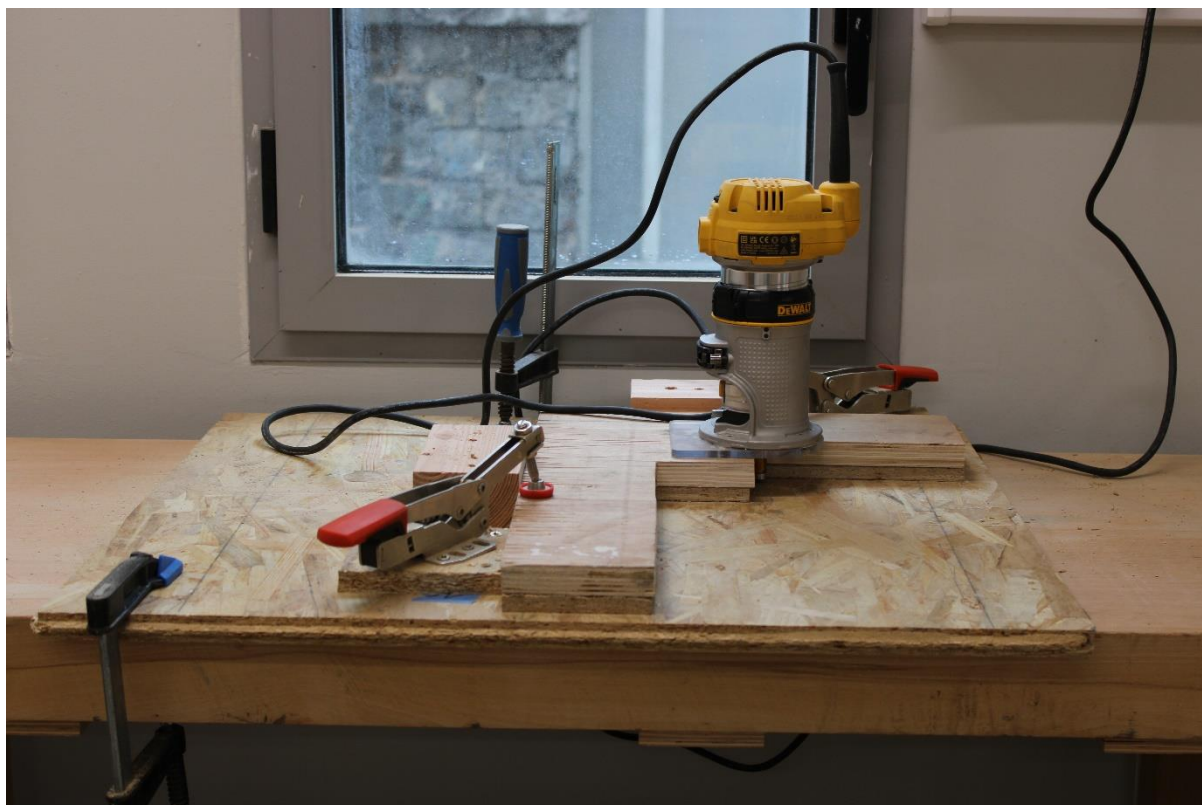


Figure 57 : Photo : Poste de découpe final équipé d'une affleureuse et d'une installation en bois permettant de maintenir le patron et les pièces à usiner grâce aux sauterelles mécaniques. Source : photo de l'autrice.

33. Petite défonceuse destinée à affleurer ou suivre précisément le chant d'une pièce. (Dicobat, Menuiserie).

34. Serre-joints à levier permettant de maintenir fortement une pièce lors de l'usinage. (Dicobat).

Une fois les formes terminées, je dois les visser entre elles pour obtenir mon moule final d'une **hauteur de 31 cm**. J'y fixe également deux morceaux de bois sur les côtés pour faciliter son emboîtement et ajouter de la précision.



Figures 58 et 59 : Photos : Ensemble des formes en bois découpées puis assemblées par vissage pour constituer le moule final de 31 cm de hauteur. Deux tasseaux latéraux y sont ajoutés pour faciliter l'emboîtement et garantir la précision du montage. Source : photos de l'autrice.

Pour reproduire le grand moule, nous allons utiliser deux morceaux de bois vissés sur le moule et des serre-joints.



Figure 60 : Photo : Mise en place du moule final sur palette, maintenu par deux tasseaux latéraux et des serre-joints afin de reproduire le grand moule à partir du prototype. À droite, la terre prête à être mise en œuvre. Source : photo de l'autrice.

3.2.2 La confection des modules de pisé (du nouveau pisé)

Une fois le moule fini nous passons à la préparation de la terre. J'ai procuré de la terre de pisé chez la Briqueterie DeWulf ce qui devais me permettre de l'utiliser directement et être sure de sa qualité.



Figure 61 : Photo : Terre de pisé achetée à la Briqueterie DeWulf, avant tout tamisage. Source : photo de l'autrice.

Cependant **la terre contient trop de graviers** donc je dois la **tamiser** pour la rendre plus adaptée aux éléments en pisé que je veux construire. La terre que j'exploite est composée de **50% de terre tamisée, sans graviers, et de 50% de terre qui m'a été initialement fournie.**



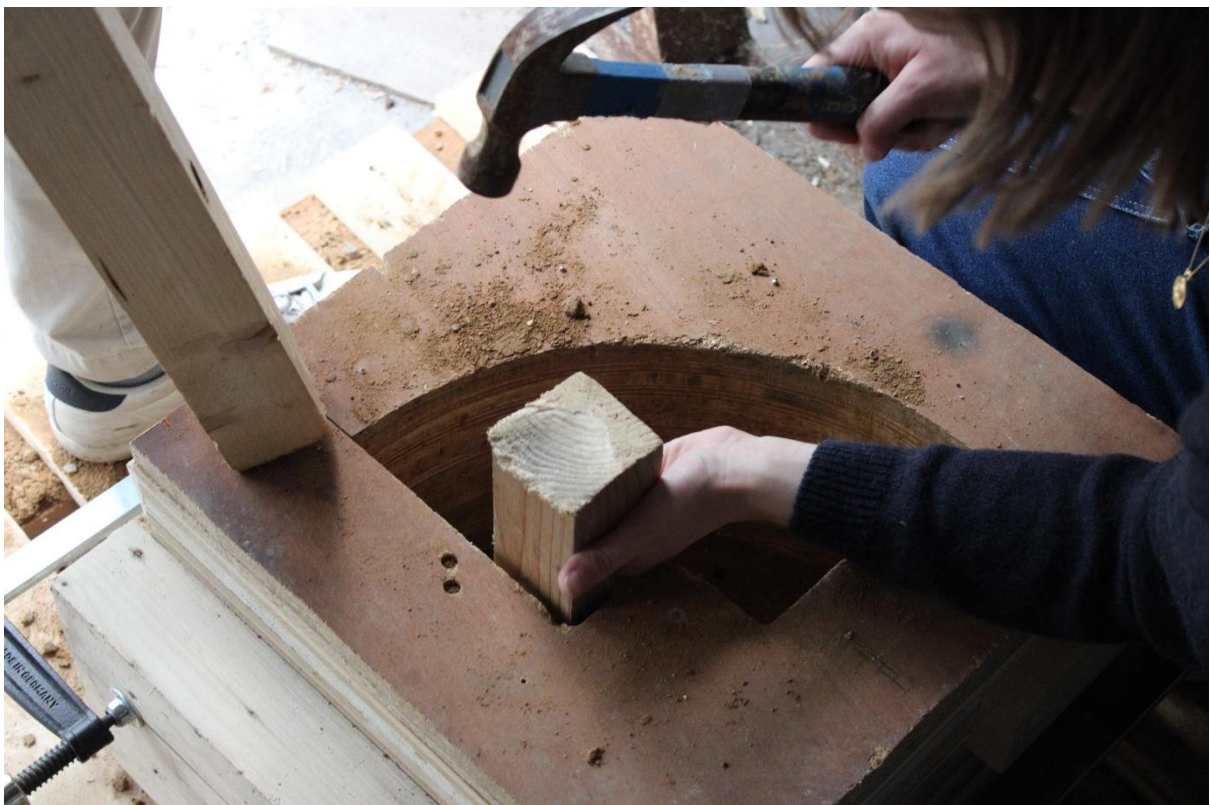
Figure 62 : Photo : Terre de pisé prête à l'emploi, composée d'un mélange de 50 % de terre tamisée et 50 % de terre brute. Source : photo de l'autrice.

Pour passer à la réalisation des modules de pisé j'installe le moule sur une palette et sur une plaque de bois. Cela me permettra de déplacer les modules une fois réalisés.

La terre est **versée par couches d'environ 15 cm et tassée à l'aide d'un poteaux** d'une section carrée en guise de psoir, très adaptée à notre forme de moule qui contient des coins. Les marges sont travaillées à l'aide d'un morceaux de bois de section rectangulaire sur lequel je viens taper avec un marteau.



Figure 63 : Photo : Remplissage du moule en bois avec la terre préparée, disposée par couches avant tassage. L'installation, posée sur une palette et sur une planche en bois, permet de stabiliser le moule et de faciliter le déplacement des modules une fois compactés. Source : photo de l'autrice.



Figures 64 et 65 : Photos : Compactage de la terre dans le moule. La première image montre le tassement des couches à l'aide d'un montant en bois adapté à la forme du moule ; la seconde illustre le travail des angles, réalisé avec un bloc de bois frappé au marteau pour assurer la précision des bords. Source : photos de l'autrice.

Je continue la procédure jusqu'à arriver à atteindre une **hauteur de 30 cm** et je démoule le module de pisé fraîchement réalisé.



Figures 66 et 67 : Photos : Fin du compactage et démoulage du module de pisé du module de pisé. La première image montre moule maintenu par des serre-joints avant le démoulage. La seconde révèle le bloc de terre fraîchement extrait. La terre atteint ici la hauteur finale de 30 cm. Source : photo de l'autrice.

Durant la mise en œuvre par tassage **des accidents** sont survenus.

Le premier incident a été celui **du démoulage mal effectué**, plus précisément, le moule a été tiré et incliné en même temps ce qui a amené à l'effritement d'un coin de module en pisé. Le dégât n'étant pas très important le module a été gardé et réparé grâce au mortier qui servira de liant lors de l'assemblage des modules. Des petits incidents moins significatifs ont également eu lieu long du démoulage à cause de l'accrochage de la terre à la parois du moule qui n'est pas parfaitement lisse.



Figure 68 : Photo : Coin d'un module en pisé abîmé lors d'un démoulage mal exécuté, causant un léger éclatement de la matière. Source : photo de l'autrice.

Le deuxième incident a été celui du **décalage des deux éléments composant le moule**. Ce décalage a eu lieu à cause de la pression de la terre surtout pendant que la terre été tassé en partie haute du moule. Cela s'est très probablement produit à cause de l'emplacement des serre joints. Le décalage a eu lieu deux fois, la première fois très insignifiant, le module n'a pas été gardé, la deuxième fois plus important et le module a été décomposé.



*Figure 69 : Photo : Décalage des deux parties du moule sous la pression du compactage malgré le serrage.
Source : photo de l'autrice.*

Chaque module démoulé est immédiatement transporté dans la zone où il **sèchera durant 3-4 semaines**.

Pendant ce temps nous pouvons passer à la construction de la base en pierre.



Figure 70 : Photo : Modules de pisé fraîchement démoulés mis en place dans la zone de séchage, où ils resteront trois à quatre semaines avant leur assemblage. Source : photo de l'autrice.

3.2.3 La base de pierre

Pour créer cette base, nous avons besoin de découper **trois blocs de pierre** : le **bloc central de 62 cm × 31 cm × 15 cm**, et deux autres blocs placés **aux extrémités de 62 cm × 15,5 cm × 15 cm**. Le bloc central est celui sur lequel sera fixé le poteau en bois.

Pour créer mes blocs, je dispose d'un morceau de pierre calcaire de 140 cm × 31 cm × 15 cm. Elle est très tendre, donc je réalise les découpes à l'aide d'une scie à bois.



*Figure 71 : Photo : Découpe du bloc de pierre calcaire destiné à former la base du prototype. Le grand bloc initial est tracé puis scié à la main pour obtenir les trois éléments nécessaires : un bloc central et deux blocs latéraux.
Source : photo de l'autrice.*

Pour préparer l'installation du poteau, je vais fixer au centre du bloc de 62 cm × 15,5 cm × 15 cm un goujon d'ancrage en inox M12 × 180 mm. Pour cela, je perce le bloc de pierre à l'aide d'une **perceuse à percussion**³⁵, puis j'insère le **goujon** dans le trou et je le serre.



Figure 72 : Photo : Perçage, à l'aide d'une perceuse à percussion, du bloc de pierre destiné à accueillir le goujon d'ancrage inox M12 × 180 mm du poteau en bois. Source : photo de l'autrice.

35. Perceuse équipée d'un mécanisme produisant des impacts rapides permettant de percer les matériaux durs comme la brique ou le béton. (Dicobat, Outillage).

J'assemble les blocs sur une palette afin de permettre le déplacement de la colonne. Je ne collerai pas les blocs de pierre entre eux pour que la matière puisse être réutilisée une fois que la colonne aura servi.



Figure 73 : Photo : Assemblage des blocs de pierre sur une palette, avec le goujon d'ancrage déjà implanté dans le bloc central. Source : photo de l'autrice.

3.2.4 Le poteau en bois

Une fois la base en pierre installée et le goujon fixé, nous devons choisir un poteau en bois. Il est découpé à l'aide d'une scie circulaire pour obtenir **une hauteur de 90 cm**. Il est raboté avec une raboteuse³⁶ électrique afin de faire correspondre **sa section à 14 cm × 14 cm**.

Un trou de 12 mm est réalisé **à la base** du poteau, ce qui correspond au diamètre du goujon.



Figure 74 : Photo : Poteau en bois mis à dimension (14 × 14 cm) et découpé à 90 cm de hauteur, prêt à être fixé sur le goujon d'ancrage auparavant installé dans la base en pierre. Un trou de 12 mm est percé à sa base pour permettre l'emboîtement. Source : photo de l'autrice.

36. Machine permettant d'enlever une fine couche de bois pour aplanir ou calibrer une pièce. (Dicobat, Menuiserie).

3.2.5 L'articulation du poteau en bois et de la base en pierre

L'articulation de la base en pierre et du poteau en bois est réalisée grâce au **goujon d'ancrage en inox M12 × 180 mm**, qui a été fixé dans la pierre. Avant de glisser le poteau sur le goujon, nous devons poser une couche de **mortier de chaux** pour deux raisons.

Premièrement, elle agit comme une barrière contre les remontées capillaires et empêche l'eau de s'infiltrer entre le bois et la pierre, en cas d'inondation, après que la terre aurait pu être emportée.

Deuxièmement, elle permet de **noyer l'écrou** et d'offrir au poteau un appui sur toute sa base.

Une fois le mortier posé, il faut le **laisser sécher légèrement** sans qu'il durcisse. Je pose ensuite le poteau sur le goujon et sur la couche de mortier, puis j'appuie jusqu'au bout pour que le poteau s'assoie de manière uniforme sur le mortier, tant que ce dernier reste encore plastique.

Notre structure est maintenant prête à recevoir les modules de pisé.



Figure 75 : Photo : Pose du poteau en bois sur la base en pierre, après application d'une couche de mortier de chaux et insertion sur le goujon d'ancrage inox M12 × 180 mm. Source : photo de l'autrice.

3.2.6 L'assemblage des modules

La dernière étape est l'assemblage des modules en pisé autour du poteau.

Les modules sont déplacés à l'aide des plaques en bois sur lesquelles ils ont séché et, une fois à côté de la base en pierre ou du niveau de pisé déjà monté, ils sont glissés sur la construction.

Pour lier les modules entre eux, je fabrique un **mortier de terre**.

J'applique **des couches** de mortier d'environ **2 mm** entre les modules de pisé, sur toutes les parois, horizontales et verticales. À chaque étage monté, je prends soin de lisser les joints pour les rendre les plus propres et invisibles possible.



Figure 76 : Photo : Mise en place des modules en pisé autour du poteau. Source : photo de l'autrice.



Figure 77 et 78 : Photos : Prototype final de la colonne en pisé. La première image montre la colonne entièrement montée autour du poteau en bois, tandis que la seconde illustre le sommet du prototype après lissage des joints et finition de la surface. Source : photos de l'auteur.

3.3 Retour sur expérience et évolutions contemporaines possibles du prototype

Cette partie présente un retour sur mon expérience autour du prototype de la colonne en pisé, accompagné d'une réflexion sur **les pistes d'évolution** possibles de cette technique dans un contexte contemporain, ainsi que sur le rôle qu'ont joué l'étude de la ville de Lyon et celle de l'architecte François Cointeraux.

Elle propose donc une **lecture critique** et expérimentale du pisé, **une recherche** sur les moyens d'en améliorer la mise en œuvre, ainsi qu'une ouverture sur les possibles applications futures, où la terre, intégrée à des systèmes mixtes, retrouve toute sa pertinence dans l'architecture contemporaine.

L'étude menée sur le pisé à Lyon a été un point de départ essentiel : cette ville, riche en constructions anciennes en terre, en pierre et en bois, m'a permis de comprendre les logiques d'assemblage et la complémentarité des matériaux propres aux structures mixtes.

3.3.1 Retour sur la colonne construite

La construction du prototype de colonne en pisé a constitué **un moment d'observation et de pratique**, permettant d'aller au-delà des écrits de François Cointeraux. Alors que ses textes insistent surtout sur l'économie, la simplicité d'exécution et la valeur esthétique du pisé, un matériau destiné à remplacer la pierre pour un coût moindre. L'expérimentation m'a permis de comprendre un ensemble de mécanismes structurels, hygrométriques et constructifs de la colonne composite qu'il n'explicite pas.

Fabrication accessible :

Dès le moulage, la matière impose sa logique. Le compactage transforme le matériaux, donne au pisé de la densité, la forme obtenue possède une présence matérielle forte. Le prototype a confirmé les qualités que j'avais déjà identifiées : une fabrication accessible, peu outillée, reproductible, fidèle à l'esprit de Cointeraux qui visait une architecture simple et diffusable. La dimension du module, sa forme, et la manière de l'assembler offrent une réelle facilité de montage mais il doit se faire à plusieurs personnes en raison du poids imposant des modules.

Déplacement délicat des modules :

Cependant, ces qualités s'accompagnent de contraintes. Le démoulage est relativement facile à réaliser mais le déplacement des modules est délicat, car la terre encore humide reste particulièrement fragile, les gaillés peuvent s'accumuler en bas des modules et provoquer l'effritement de certaines zones et les modules sont lourds . Lors de leur déplacement la plateforme doit rester stable du début à la fin.

Séchage long et variable :

Le temps de séchage du matériau varie fortement selon l'hygrométrie ambiante. Une fois la colonne assemblée les modules qui se trouvent en contact avec la base en pierre risquent d'être en contact avec l'humidité du à l'eau de pluie ou des remontées capillaires. Cette sensibilité pose la question d'une protection adaptée entre la base en pierre et le fut en terre, capable d'assurer la durabilité. Plusieurs pistes comme les enduits de chaux, les badigeons ou les plaques métalliques restent à être testés.

Le pisé comme stabilisateur structurel :

Un autre phénomène essentiel est apparu durant la construction : en enrobant le poteau en bois, la terre compacte agit comme un stabilisateur structurel, augmentant l'inertie³⁷ latérale de la colonne. Cette action limite le flambement du poteau, surtout sur de grandes hauteurs. Cointeraux ne formule pas ce rôle structurel de la terre, en construisant, j'ai compris qu'elle ne joue pas seulement un rôle esthétique. Le bois porte verticalement, mais la terre améliore la stabilité latérale, le système se comporte comme un dispositif composite implicite.

Calepinage et section du poteau :

Toutefois, les limites du prototype sont tout aussi instructives. Le choix d'un poteau carré, motivé uniquement par sa disponibilité, a généré un calepinage³⁸ instable et fragile : en n'utilisant qu'un seul moule, par manque de temps et de ressources, les blocs ont été empilés sans alternance, alignant les joints verticaux et fragilisant la colonne. Cette expérience a montré que pour qu'un système composite fonctionne durablement, il doit intégrer un calepinage alterné, ce qui implique soit deux moules différents, soit l'usage d'un poteau de section ronde permettant de faire pivoter les blocs. On remarque que les pièces graphiques de François Cointeraux représentant une colonne en pisé sans noyau central montrent un calepinage pensé de manière à éviter l'alignement des joints.

37. Propriété d'un matériau à stocker puis restituer lentement la chaleur ou la fraîcheur, stabilisant les variations thermiques intérieures. (ADEME + BRGM).

38. Disposition méthodique des éléments d'une construction (pierres, briques, panneaux...) afin d'optimiser leur découpe, leur alignement et leur mise en œuvre. (Dicobat, Eyrolles).

Humidité et hygroscopique :

La question de l'humidité et du risque de pourrissement du bois est également devenue centrale. Intuitivement, envelopper un poteau en bois dans de la terre peut inquiéter : on imagine un bois « enfermé », incapable de sécher. Mais la terre crue est hygroscopique et perspirante, elle absorbe, régule et restitue l'humidité. Contrairement à un matériau étanche, elle ne piège pas l'humidité ; elle respire. De nombreux exemples vernaculaires en France comme les pans de bois, les torchis, les murs terre-bois du Sud-Ouest ou le pisé du Dauphiné montrent que bois et terre peuvent cohabiter durablement dès lors que le pied est protégé et que l'eau liquide est maîtrisée.

Inaccessibilité du noyau :

Cependant, un problème réel demeure : une fois le poteau enveloppé dans la terre, il devient inaccessible. Toute inspection implique de détruire l'enveloppe. Ce constat impose une réflexion sur la maintenance. Lors d'une conférence à laquelle j'ai assisté, j'ai pu échanger avec Samuel Delmas au sujet de ses parois terre-chanvre-bois de son projet d'école primaire bio et géosourcée construite à Châtenay – Malabry. Il m'a confirmé que la durabilité d'un système composite dépend moins d'une séparation stricte entre matériaux que d'une maîtrise des points sensibles (pied, liaisons, interfaces) et de la capacité des matériaux à respirer ensemble.

Ainsi, le prototype révèle **un système cohérent mais incomplet**, nécessitant une adaptation précise pour devenir un dispositif constructif fiable.

Le prochain sous-chapitre proposera les réponses contemporaines à ces limites en termes de calepinage, de gestion de l'humidité, de reprise de charge, et de fabrication, il les prolongera vers des perspectives plus larges pour le pisé dans l'architecture d'aujourd'hui.

3.3.2 Pistes contemporaines et alternatives

Si le sous-chapitre précédent expose ce que le prototype révèle, qualités, limites, fragilités et inquiétudes, cette section propose les **réponses**, les **améliorations** et les **prolongements contemporains** possibles. Il s'agit désormais de transformer la colonne de Cointeraux, non comme un objet historique figé, mais comme un système évolutif capable de dialoguer avec les normes, les besoins et les ambitions de l'architecture actuelle.

Reprise de charge :

L'une des premières pistes concerne la reprise de charge. La colonne pourrait intégrer aujourd'hui des **dispositifs mécaniques** qui sécurisent les connexions : platines réglables en tête, ferrures absorbant les mouvements du bois, amortisseurs limitant les transmissions directes, ou encore des pièces métalliques facilitant le transfert du poids du balcon vers le poteau. Ces éléments, discrets mais efficaces, modernisent l'intuition de Cointeraux tout en garantissant la stabilité et la sécurité du système.

Le bois et l'humidité :

La question de l'humidité, identifiée comme critique lors de la construction du prototype, appelle également **plusieurs solutions**. Une couche de chaux entre le poteau et la terre, un pare-vapeur perspirant³⁹, ou même une lame d'air ventilée peuvent protéger le bois sans nuire à la respiration du matériau. Ces solutions **respectent l'hygroscopicité du pisé tout en sécurisant le noyau en bois**. Elles permettraient également d'intégrer des **zones d'inspection ponctuelle**, rendant la maintenance possible sans détruire la colonne.

39. Membrane d'étanchéité qui limite le passage de la vapeur d'eau sans l'empêcher totalement, permettant une migration contrôlée de l'humidité au sein de la paroi tout en restant étanche à l'air. (Dicobat, Eyrolles + BRGM).

Le calepinage :

L'amélioration du calepinage constitue une autre piste importante. La stabilité de la colonne dépend en grande partie de l'alternance des joints. Deux stratégies sont alors envisageables :

- créer **deux moules** pour fabriquer des blocs alternés ;
- ou choisir un **poteau rond**, permettant de faire pivoter les blocs afin de décaler naturellement les joints.

Préfabrication et atelier :

Ces ajustements ouvrent la voie à une véritable préfabrication. On peut imaginer **des modules de pisé compactés en atelier, standardisés, séchés naturellement, puis assemblés sur chantier**. Une telle approche permettrait de **maîtriser** la densité, la composition, les conditions de séchage et l'humidité et la finition des blocs, tout en accélérant le montage. Cela permettrait également de concevoir des espaces, des stratégies, des procédures et des outils capables d'éviter les phases qui fragilisent le plus les modules, notamment le démoulage et leur déplacement manuel. L'aménagement d'ateliers spécifiquement adaptés à la fabrication des modules de pisé contribuerait aussi à **éliminer les incidents** rencontrés durant la compression, comme le décalage des deux parties du moule, à l'origine d'erreurs dans le dimensionnement final. La préfabrication offrirait ainsi une forme d'**industrialisation douce**, respectueuse de la matière, mais adaptée aux exigences contemporaines de qualité, de rapidité et de précision.

Matérialité du noyau :

Le système peut aussi évoluer vers **d'autres matériaux pour le noyau**. Un poteau en bois lamellé-collé offrirait une meilleure stabilité dimensionnelle, un noyau en acier réduirait la section et permettrait d'augmenter la finesse de la colonne, un assemblage bois-métal combinerait ductilité et résistance. Dans ces scénarios, la terre jouerait un rôle comparable à celui du béton dans les poteaux acier-béton : enveloppe protectrice, masse inertielle, amélioration de la tenue au feu, régulation hygrométrique⁴⁰.

40. Capacité d'un matériau ou d'un ensemble constructif à absorber, restituer ou transférer l'humidité de l'air, assurant un équilibre hygrométrique intérieur. (CNRTL : hygrométrie + BRGM).

Inertie thermique et confort :

Cette réflexion fonctionne aussi à plus grande échelle. **La terre crue**, par son inertie thermique⁴¹ et sa capacité de régulation hygrométrique, pourrait devenir un **élément technique et climatique** intégré : colonne d'inertie dans un logement collectif, cloison épaisse pour réguler le taux d'humidité, enveloppe ou élément stabilisateur intégrée aux structures porteuses, murs hybrides terre, bois, béton, métal, chanvre, etc. L'enveloppe en terre participe alors à la performance énergétique du bâtiment, réduisant les besoins en climatisation et en chauffage, tout en offrant une atmosphère intérieure stable et confortable.

Solution écologique :

Ces pistes contemporaines montrent que **le système terre-bois peut être réinventé** pour s'inscrire dans une architecture durable et réversible. La terre crue, matériau recyclable et réparable, offre une alternative écologique au béton. Sa combinaison avec le bois, le métal ou d'autres matériaux, permet d'envisager une architecture capable de répondre aux enjeux environnementaux, mais aussi aux exigences structurelles actuelles.

On comprend que le pisé est un matériau que l'on peut **dimensionner et modeler en fonction des besoins et du rôle que l'on souhaite lui attribuer**. Sa capacité à porter, à stabiliser, à isoler, à réguler la température et l'humidité, ou encore à protéger des chocs et du feu, dépend directement de son épaisseur et de la manière dont il est mis en œuvre. Le pisé peut également assumer une fonction esthétique : il se moule, se module et s'assemble de façons très variées, et peut même être industrialisé. Cette malléabilité lui permet non seulement d'adopter un rôle décoratif, mais aussi de s'adapter à des besoins de construction et d'assemblage divers, en répondant à des exigences structurelles, techniques ou spatiales spécifiques.

Ainsi, les limites identifiées dans la colonne expérimentale comme le calepinage, la maintenance et l'humidité deviennent des **opportunités de conception**. Elles permettent de construire une vision renouvelée des constructions contenant du pisé, non comme une reproduction historique, mais comme un **dispositif contemporain**, adaptable, performant, évolutif, et profondément cohérent avec les enjeux actuels de sobriété et de matérialité.

41. Capacité d'un matériau ou d'une paroi à absorber et stocker de la chaleur, puis à la restituer progressivement, contribuant à stabiliser la température intérieure. (ADEME + BRGM).

3.3.3 Lyon, un terrain d'étude et d'ouverture sur la structure mixte

Lyon a été **un terrain de recherche idéal pour comprendre** le pisé et ses différentes applications. L'étude du patrimoine lyonnais m'a permis de redécouvrir une grande diversité de techniques anciennes, souvent hybrides, où la terre, la pierre et le bois s'associent dans des structures mixtes adaptées au climat et au relief. Cette recherche m'a également menée à la découverte de la colonne en pisé de François Cointeraux, intégrée elle aussi dans un système mixte combinant la terre et le bois.

Cette ville, riche en savoirs et en traces de constructions en terre, a donc offert **un point de départ essentiel** pour réfléchir à la manière de **réintroduire le pisé dans la construction contemporaine**. En Europe, où les conditions climatiques sont plus humides, la solution la plus cohérente pour construire avec la terre reste de l'associer à d'autres matériaux : pierre, bois ou métal. Cette complémentarité permet de protéger la terre, d'en améliorer les performances et d'envisager des éléments plus complexes qu'un simple mur.

La colonne en pisé expérimentée dans ce travail ouvre ainsi de **nouvelles perspectives**. Elle montre qu'en modernisant les techniques anciennes et en travaillant dans une logique de structure mixte, il devient possible d'imaginer d'autres typologies, poteaux, planchers, voire structures entières, utilisant la terre comme composant actif. Cette recherche, amorcée à Lyon, peut se poursuivre ailleurs, dans toutes les régions où la terre est disponible, pour développer une architecture plus durable, locale et inventive.

Conclusion

Réintégrer le pisé dans la construction d'aujourd'hui, **c'est redonner vie à des techniques anciennes oubliées et repenser notre manière de bâtir** selon des principes plus durables, plus sobres et plus liés au territoire. Le travail autour du pisé à Lyon a permis de redécouvrir un matériau qui porte à la fois une histoire, une culture constructive et une logique de bon sens, simple et juste, ancrée dans le sol même de la région. Lyon représente un terrain d'étude riche et documenté qui permet de comprendre comment la terre, et plus particulièrement le pisé, a pu structurer un paysage architectural entier. Cette ville devient un point de départ, un cadre d'observation qui montre comment un matériau local peut transformer un territoire et servir de base pour formuler des principes applicables plus largement, là où la terre est présente et disponible.

L'objectif de ce mémoire a été d'explorer comment les logiques constructives observées dans l'histoire lyonnaise et dans les écrits de François Cointeraux peuvent inspirer une réintroduction contemporaine du pisé, à travers des structures mixtes et des modes de production adaptés à notre époque. Cette démarche se construit progressivement, à travers l'étude du matériau, de son histoire, de ses caractéristiques, de ses usages passés et de ses potentialités actuelles.

La première partie a permis de comprendre la terre crue dans sa globalité : sa composition, ses qualités physiques, sa capacité de régulation, sa résistance et ses limites. L'étude historique du pisé à Lyon a montré comment il a façonné les quartiers, comment il s'est adapté aux besoins d'une ville en pleine transformation, et comment il a disparu à la suite des inondations du XIX^e siècle et de l'évolution des réglementations. Le pisé est né de la nécessité et du bon sens : il utilise la terre du lieu, il s'associe naturellement à la pierre et au bois, il s'adapte à son environnement climatique. Les travaux d'Emmanuel Mille, de Dorothée Alex et les écrits de François Cointeraux ont permis de replacer la terre au centre d'une culture constructive lyonnaise longtemps oubliée et d'en comprendre les mécanismes.

Cette disparition locale témoigne également d'un phénomène plus large : l'effacement progressif des savoir-faire liés à la terre crue au profit de matériaux industrialisés perçus comme plus fiables, plus rapides et plus modernes. Replacer le pisé dans une perspective globale a montré que sa pertinence dépend du contexte autant que de la compréhension de ses qualités constructives, et que son abandon ne relève pas d'un défaut du matériau mais d'un changement de paradigme technique et culturel.

La deuxième partie du mémoire, à travers l'analyse de cinq bâtiments existants et d'une maison réalisée par Cointeraux, **a confirmé que le pisé n'a jamais été utilisé comme un matériau autonome. Il fonctionne dans un système d'équilibre et de complémentarité** : la pierre prend en charge la base et les zones exposées à l'humidité, le bois structure les planchers et les charpentes, tandis que le pisé remplit, régule et porte. Chaque bâtiment observé révèle un assemblage particulier, pensé selon le budget, la topographie, les risques d'inondation et les usages. Ces exemples mettent en évidence une logique constructive fondée sur la combinaison et la hiérarchie des matériaux. Comprendre cette cohérence permet d'envisager de nouvelles formes de construction associant le pisé à des techniques contemporaines, dans une continuité assumée entre passé et futur.

La troisième partie, consacrée au prototype de colonne, a prolongé cette réflexion à travers une approche expérimentale. Inspirée des principes constructifs de François Cointeraux, cette expérimentation a permis d'explorer à petite échelle la logique du pisé moulé et assemblé. Le travail manuel, la fabrication du moule en bois, la mise en œuvre de la terre, puis l'association avec des éléments en pierre et en bois, ont permis d'observer de manière concrète les comportements et les ajustements entre les matériaux. Elle a également permis de mettre en pratique les éléments dégagés dans l'analyse des colonnes de Bresse – notamment la compréhension du rôle de la base en pierre, du poteau en bois et de la terre moulée – et d'évaluer comment ces principes pouvaient être transposés dans une construction réelle. Cette expérience n'avait pas pour but de promouvoir un retour à une construction artisanale, mais de comprendre les principes techniques de Cointeraux pour les actualiser dans un contexte contemporain. Le suivi de chantier a ainsi mis en évidence les étapes essentielles de la mise en œuvre (moulage, démoulage, séchage, assemblage), les limites rencontrées et les ajustements nécessaires pour stabiliser l'ensemble, confirmant que la terre seule ne suffit pas et que c'est bien la combinaison terre–pierre–bois qui produit la cohérence du système. Le retour sur le prototype a révélé des fragilités précises, décalage du moule sous la pression du compactage, alignement défavorable des joints dû à l'usage d'un seul moule, sensibilité du poteau en bois à l'humidité une fois enveloppé, et difficulté à garantir une géométrie régulière lors du démoulage auxquelles l'étude propose des réponses directes. Les pistes contemporaines envisagent en effet l'ajout de dispositifs mécaniques pour sécuriser la reprise de charge, la mise en place d'interfaces respirantes pour protéger le bois, l'amélioration du calepinage par l'utilisation de deux moules ou d'un poteau rond permettant l'alternance des joints, ainsi que le recours à une préfabrication contrôlée pour stabiliser la densité, la forme et le séchage des modules. Ces solutions permettent de corriger point par point les limites

observées dans le prototype, et d'esquisser une version plus fiable, reproductible et durable du système imaginé par Cointeraux. Elle constitue un point de départ pour penser l'évolution du pisé vers des formes de préfabrication adaptées à la production architecturale actuelle et à l'élargissement des limites de l'utilisation de ce matériau. En synthèse, cette expérimentation permet de relier l'étude historique, les observations des bâtiments existants et l'application pratique, en montrant concrètement comment les principes du pisé lyonnais et ceux formulés par Cointeraux peuvent être réinterprétés pour des usages contemporains.

Ce principe de construction modulaire ouvre des possibilités nouvelles : il permet d'imaginer des systèmes où la terre est moulée, séchée puis assemblée de manière rationnelle, selon des procédés reproductibles, tout en conservant son lien avec la matière locale. Ces évolutions rejoignent des recherches contemporaines autour des blocs de terre, des éléments préfabriqués ou des structures hybrides, qui montrent que le pisé peut entrer dans un mode constructif plus maîtrisé sans perdre ses qualités écologiques ni sa dimension sensible.

L'ensemble de cette démarche met en évidence une idée centrale : **la réintroduction du pisé dans la construction contemporaine passe par la compréhension fine des relations entre matériaux, par la mise en œuvre de structures mixtes et par une actualisation des procédés**. Le pisé, lorsqu'il est associé à des matériaux complémentaires comme la pierre, le bois, le métal ou le béton, peut devenir un élément porteur, protecteur et régulateur performant. Cette logique d'association n'est pas qu'une question technique : elle est culturelle, économique et écologique. Elle répond à la nécessité de construire avec les ressources disponibles, de limiter l'impact environnemental, et de renouer avec des matières qui appartiennent au lieu.

Ce travail met aussi en lumière **l'importance du pisé dans la réflexion sur la durabilité**. C'est un matériau à faible énergie grise, recyclable, capable de réguler naturellement le climat intérieur, et qui favorise une relation plus directe entre le concepteur, le constructeur et la matière. Réintroduire le pisé, c'est repenser la construction comme un processus qui engage le territoire, le temps, et des savoir-faire adaptés plutôt qu'un simple assemblage d'éléments industrialisés.

Au-delà des aspects techniques, **le pisé porte une valeur symbolique et culturelle pour des territoires comme Lyon**. Il relie la construction à la mémoire des lieux, aux sols, à une manière d'habiter et à un ensemble de pratiques qui ont façonné la ville pendant des siècles. Il montre que la terre est présente partout et qu'elle peut être mise en œuvre dans des contextes variés, à condition de comprendre ses qualités et de la combiner avec justesse.

Ce mémoire cherche ainsi à démontrer que **le pisé, loin d'être un matériau du passé, peut devenir un acteur de la construction de demain**. Son avenir réside dans notre capacité à l'adapter, à l'associer, à le transformer à travers des structures mixtes, une préfabrication raisonnée et une approche constructive ouverte. Le prototype de colonne devient un outil d'étude, un fragment de recherche qui ouvre des perspectives et invite à poursuivre les essais, à croiser les disciplines entre architectes, ingénieurs et artisans pour imaginer des architectures durables, sensibles et ancrées dans leurs territoires.

Ainsi, penser le pisé aujourd'hui, c'est penser une construction qui relie le geste au lieu, la matière au climat, et le passé à l'avenir. C'est envisager la terre non pas comme un souvenir, mais comme une **ressource vivante, capable d'évoluer, de s'associer et d'alimenter une architecture plus consciente, plus locale et plus cohérente**.

Bibliographie

Livres et publications

ALEX, Dorothée.

Petit guide des architectures en pisé à Lyon. Mémoire de fin d'études, ENSA Lyon, 2011.

BARIDON, Laurent ; GARRIC, Jean-Philippe ; RICHAUD, Gilbert (dir.).

Les leçons de la terre : François Cointeraux (1740-1830). Paris : Éditions du Patrimoine, 2008.

CLÉMENÇON, Anne-Sophie ; BERTIN, Dominique.

Relevés et inventaire des constructions en pisé à Lyon. Lyon : s.é., 1980.

COINTERAUX, François.

Aux maçons et charpentiers des villes et des villages. Paris, s.é., 1790.

COINTERAUX, François.

De la distribution des bâtiments de pisé : Pour pouvoir les rendre à la fois solides et économiques. Paris, 1793.

COINTERAUX, François.

Dessin d'une machine propre à solidifier la terre, de l'invention de M. Cointeraux. Paris, s.é., 1807.

COINTERAUX, François.

Du nouveau pisé, ou l'art de faire le pisé par appareil. Paris : Imprimerie de Chanson, 1806.

COINTERAUX, François.

École d'architecture rurale. 2^e cahier. Paris, s.é., 1790.

COINTERAUX, François.

Instruction sur l'art de bâtir dans toutes les campagnes... Paris, s.é., 1790.

COINTERAUX, François.

La bonne et unique méthode de faire les toits des bâtiments. Paris, s.é., 1807.

COINTERAUX, François.

Livres et modèles de Cointeraux sur les constructions et cultures. Paris, s.é., s.d.

COINTERAUX, François.

Seconde conférence du dimanche 12 juillet 1807. Paris : Imprimerie de Chanson, 1807.

DEMEULENAERE-DOUYÈRE, Christiane.

« Le pisé : Ô ma divine maîtresse !... ». Revue d'histoire, 2010.

DESBAT, Armand.

L'industrie de la brique crue dans la Colonia Lugdunum : typologie, approvisionnement et organisation de la production. Montpellier : Université Paul-Valéry, Actes du 2^e Congrès archéologique de Gaule méridionale, 1984.

DETHIER, Jean.

L'art de bâtir en terre : du grain de terre à l'architecture. Paris : Le Moniteur, 2020.

MÉTROPOLE DE LYON (dir.).

AVAP – Pentes de la Croix-Rousse : diagnostic. Lyon : Métropole de Lyon, 2020

GUILLAUD, Hubert.

Architecture de terre : histoire, culture et société. Grenoble : CRATerre, 2005.

LASFARGUES, Jean (dir.).

L'industrie de la brique crue dans la Colonia Lugdunum : typologie, architectures de terre et de bois. Montpellier : Université Paul-Valéry, 1984.

LEMOINE, Bertrand.

Planchers et parquets : du XVI^e au XIX^e siècle. Paris : Éditions du Patrimoine / Centre des Monuments Nationaux, 1990.

MILLE, Emmanuel.

Construire la ville en terre : Le pisé, matériau essentiel de l'extension urbaine de Lyon (XV^e–XIX^e siècles). Thèse de doctorat, Université Lumière Lyon 2, 2023.

PAULIN, Pauline ; JEAN-BAPTISTE.

La construction en pisé. s.l. : s.é., 2016.

PÉROUSE DE MONTCLOS, Jean-Marie.

Architecture. Méthode et vocabulaire. Paris : Éditions du Patrimoine, 2000.

VIOLLET-LE-DUC, Eugène.

Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI^e au XVI^e siècle. Paris : B. Bance, 1868.

WALKER, Stephen (dir.).

Récentes recherches en archéologie gallo-romaine et paléochrétienne sur Lyon et sa région. Lyon : Université Lyon 2, 1995.

Ressources en ligne

ARCHIVES MUNICIPALES DE LYON.

Base numérique – fonds photographiques et documents historiques.

Disponible en ligne : <https://www.archives-lyon.fr/>

Consulté le 27 mars 2025.

CNAM – CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS.

Planches et documents iconographiques de l'École d'architecture rurale de Cointeraux.

Disponible en ligne : <https://www.cnam.fr/>

Consulté le 20 mars 2025.

GÉOPORTAIL.

Cartographies et fonds géographiques historiques.

Disponible en ligne : <https://www.geoportail.gouv.fr/>

Consulté le 27 mars 2025.

PHIACC – Patrimoine et Histoire Industrielle, Agricole et Architecturale de Chazelles-sur-Lyon.

Base documentaire sur le bâti rural.

Disponible en ligne : <https://www.phiacc.fr/>

Consulté le 18 mars 2025.

Inventaire iconographique

Figure 1 Couverture :

Photo : Processus de construction de la colonne en pisé, on voit le socle en pierre, 4 modules de pisé assemblés, l'enduit appliqué et le poteau en bois au centre. Source : photo de l'autrice.

Figure 2 p.16 :

Dessin : Couches de sol. Horizons et substrat rocheux. Terre crue comme matériaux de construction.

Source : Duchaufour.

Figure 3 p.17 :

Schéma : La roue des techniques. In. ANGER, Romain ; FONTAINE, Laetitia, 2009. *Bâtir en terre : du grain de sable à l'architecture*. Paris : Belin, Cité des sciences et de l'industrie. p. 26. ISBN 978-2-7011-5204-2. D'après HOUBEN, Hugo, GUILLAU.

Source : CRAterre, 2009.

Figure 4 p.19 :

Carte : Répartition du patrimoine architectural en terre crue. En orange, les régions de répartition des constructions en terre crue. Les points indiquent les principaux sites architecturaux inscrits au patrimoine mondial de l'Unesco.

Source : CRAterre, 2009.

Figure 5 p.19 :

Carte : Répartition du patrimoine architectural en terre crue. En orange : torchis, en marron : pisé, en jaune : bauge et en rouge : adobe.

Source : CRAterre, 2009.

Figure 6 p.20 :

Dessin : Pisé : la terre peu humide est compactée à l'aide d'une dame (pisoir) dans des coffrages en bois (banches). Arnaud Misse.

Source : CRAterre 2009.

Figure 7 p.22 :

Dessin : Restitution d'une maçonnerie porteuse en adobes sur solin⁸ de galets à Lyon, époque gallo-romaine.

Source : Clément B. 2016 p. 359, d'ap. Desbat 1984, p. 40. (E. Mille)

Figure 8 p.23 :

Photo : Détail d'une cloison en terre couvert d'enduits décorés, Lyon, Clos de la Solitude.

Source : Clément B. 2016, p. 41 (E. Mille)

Figure 9 p.23 :

Dessin : Cloison en structure bois et remplissage d'adobes couvert d'enduits décorés.

Source : Clément B. 2016, p. 399, d'ap. Desbat A. 1984, p. 41. (E. Mille)

Figure 10 p.27 :

Photographie : Claude Essertel / fonds Lyon Figaro, Bibliothèque municipale de Lyon, coll. « Photographes en Rhône-Alpes », Numelyo.

Source : Archives de Lyon.

Figure 11 p.29 :

Photo : Mur pignon d'un immeuble construit en pisé de terre, vers 1870, 43 rue Coste à Caluire-et-Cuire, Plateau de la Croix-Rousse.

Source : E. Mille, CRAterre-ENSAG, *Le pisé en milieu urbain : l'exemple lyonnais*, plateforme Satché.

Figure 12 p.32 :

Dessin : Planche du "nouveau pisé" montrant les dispositifs de coffrage (fig. 1–2), modules moulés (fig. 3–5) et principe d'élévation en terre appareillée (fig. 6).

Source : François Cointeraux, *École d'architecture rurale*, 4^e cahier, Tab. I, 179.

Figure 13 p.32 :

Dessin : moule à compartiments pour les "pierres moulées" du nouveau pisé (fig. 1–3), et à droite, la mise en œuvre (fig. 4–5).

Source : Cointeraux, *École d'architecture rurale*, Quatrième cahier, Pl. II, 1791.

Figure 14 p.33 :

Dessin : Bâtiment rural incombustible en pisé avec élévations, voûtes et cadres de coffrage (Tab. III).

Source : Cointeraux, *École d'architecture rurale*, 1^{er} cahier, 2^e éd., Pl. III, 1793, CNAM.

Figure 15 p.33 :

Dessin : Schémas du "nouveau toit" incombustible, montrant la charpente triangulaire (fig. 1), la structure porteuse en bois (fig. 2) et la voûte de couverture en terre (fig. 3–4).

Source : Cointeraux, *Aux maçons et charpentiers des villes et des villages*, Paris, 1790, scan de l'auteur.

Figure 16 p.37 :

Photo : Inondation du Rhône, à Lyon : avenue de Saxe ; l'église Saint-Pothin en arrière-plan, vers juin 1856 : contretypage d'une épreuve / d'après un cliché Louis Froissart.

Source : Archives municipales de Lyon, cote 3PH/597.

Figure 17 p.37 :

Photo : Inondation du Rhône, à Lyon : dégâts : rue Madame (actuellement rue P. Corneille), 9 juin 1856 / cliché Louis Froissart. Source : Archives municipales de Lyon, cote 3PH/598.

Figure 18 p.39 :

Illustrations 276, 277 et 278 : Évolution de la cité Philippe de la Salle au XXe siècle. Source : E. Mille.

Figure 19 p.39:

Photos 279 et 280 : vue des pavillons de la cité Ph. De la Salle vers 1970, avant leur démolition, photo : P. Clavel. Sources : fonds en ligne de la Bibliothèque Municipale de Lyon.

Figure 20 p.40 :

Carte : Localisation et catégories du corpus bâti sur le territoire de la commune de Lyon. Sources : Carte : E. Mille, CRATERRE-ENSAG. Fond de carte : Métropole de Lyon, Agence d'urbanisme.

Figure 21 p.44 :

Photo : Immeubles situés aux 23, 25 et 27, rue du Mail (CL-178, 179 et 180). Etat des murs mitoyens après démolition des bâtiments des n°25, n°23 et 27 (photo : A-S. Cléménçon). Source : E. Mille

Figure 22 p.45 :

Photo : Façade de l'immeuble-atelier du 27 impasse Gigodot (Lyon 4e, Croix-Rousse), bâtiment en pisé enduit et remanié. Source : Inventaire général du patrimoine culturel, Région Auvergne-Rhône-Alpes, IVR82_20136901338NUCAQ.

Figure 23 p.46 :

Photo : Immeuble de cinq niveaux situé au 1, place des Tapis (Lyon 4e, CL-143). Source : vue Google.

Figure 24 p.46 :

Photo: Immeuble situé au 1, rue Pailleron (Lyon 4e, CL-201). Détail du pisé visible en pignon est. Source : Service des Balmes de la Ville de Lyon.

Figure 25 p.47 :

Photo : L'intérieur de l'immeuble de trois étages situé au 12, rue Jacquard (Lyon 4e) lors des travaux menés en 2015 qui ont relevé la présence de pisé de terre dans les murs mitoyens perpendiculaires à la rue. Source : E. Mille

Figure 26 p.53 :

Dessin : Planches I présentant les principaux outils du pisé : banches et éléments de coffrage (fig. 1 à 6). Source : François Cointeraux, École d'architecture rurale, planches techniques.

Figure 27 p.54 :

Dessin : Planches II présentant les principaux outils du pisé : montants, écarteurs, clés et coins du système d'assemblage (fig. 7 à 13). Source : François Cointeraux, École d'architecture rurale, planches techniques.

Figure 28 p.55 :

Dessin : III présentant les principaux outils du pisé : différents modèles de pisoirs utilisés pour le tassage de la terre (fig. 14 à 16). Source : François Cointeraux, École d'architecture rurale, planches techniques.

Figure 29 p.57 :

Photo : Ouvriers en cours de montage d'un coffrage-banche pour pisé. Source : fonds « CRATerre/1261 »

Figure 30 p.59 :

Dessin : Planche IV présentant les éléments moulés du "nouveau pisé" : modules cylindriques et polygonaux (fig. 6 à 9), blocs hexagonaux (fig. 3), ainsi que les pièces décoratives de couronnement et d'aboutement — proches de chapiteaux, corniches et modénatures²¹ — destinées à orner colonnes, piles et extrémités d'assemblages (fig. 10 à 14). Les figures 2 à 5 montrent les possibilités de combinaisons pour former colonnes, anneaux ou structures composées. Source : Livres et Modèles de Cointeraux sur les constructions et cultures, Pl. IV.

Figure 31 p.61 :

Dessin : Schémas du "nouveau toit" (charpente triangulaire, structure bois, voûte en terre).

Source : Cointeraux, 1790.

Figure 32 p.63 :

Dessin : Façade d'une « Maison de terre ou de pisé décorée » présentant des enduits moulés imitant la pierre, chaînages d'angle, bandeaux horizontaux, encadrements et fronton oculus, destinés à ennoblir l'architecture en terre crue. Source : François Cointeraux, École d'architecture rurale, ca. 1790–1793.

Figures 33, 34, 35 et 36 p.67 :

Dessins : Plans du rez-de-chaussée, de l'entresol, du 1^{er} étage et du 2^e étage de la Maison de Bresse en pisé (Pl. I à Pl. IV), montrant la distribution intérieure et l'organisation fonctionnelle du bâtiment. Source : François Cointeraux, École d'architecture rurale, ca. 1790–1793.

Figure 37 et 38 p.68 :

Dessins : Façade (Pl. V) et coupe (Pl. VI) de la Maison de Bresse en pisé, montrant l'usage d'enduits imitant la pierre ainsi que les planchers en bois et murs porteurs en béton de terre. Source : François Cointeraux, École d'architecture rurale, ca. 1790–1793.

Figure 39 p.74 :

Dessin : Exploration des différentes configurations d'association entre le pisé (en brun) et la pierre (en gris) observées dans les bâtiments lyonnais. Ce travail graphique illustre plusieurs manières d'articuler les deux matériaux. Source : dessin de l'autrice.

Figure 40 p.75 :

Photo : Façades d'immeubles du XIX^e siècle bordant la place de la Croix-Rousse (Lyon 4^e), dont l'immeuble de six niveaux situé au n° 1. Ces bâtiments, aujourd'hui enduits et uniformisés, masquent souvent des structures anciennes en pisé caractéristiques du plateau comme les murs mitoyens, les pignons et certains refends intérieurs en pisé. Source : E. Mille.

Figure 41 p.79 :

Dessin : Extrait de l'élévation de la Maison de Bresse, montrant les colonnes en pisé conçu par François Cointeraux et son travail d'expérimentation sur la modernisation des éléments architecturaux en terre crue.

Figure 42 p.84 :

Dessin : Colonnes de pisé soutenant une voûte (Pl. 6), montrant les colonnes et les assemblages de blocs de terre comprimée expérimentés par Cointeraux. Cette planche témoigne de sa volonté de moderniser le pisé en l'adaptant aux formes architecturales classiques. Source : François Cointeraux, École d'architecture rurale, Deuxième Cahier (N°1), ca. 1790–1793, BNF (scanné par l'auteur).

Figure 43 p.85 :

Dessin : Pilastres de pisé soutenant un plancher (Pl. 5, N°1), présentant différents assemblages de blocs de terre comprimée et les solutions proposées par Cointeraux pour stabiliser les structures verticales en pisé. Cette planche illustre ses recherches sur la capacité portante du matériau et sur l'adaptation des formes classiques aux techniques de terre crue. Source : François Cointeraux, École d'architecture rurale, Deuxième Cahier (N°1), ca. 1790–179, BNF (scanné par l'auteur).

Figure 44 p.87 :

Dessin : Schéma du prototype montrant la base en pierre obtenue par l'assemblage de quatre blocs de 15 × 31 × 62 cm et le fût en pisé de 50 cm de diamètre, conformément aux dimensions définies par l'architecte. Source : dessin de l'autrice.

Figure 45 p.94 :

Dessin : Schéma du prototype montrant la base en pierre et le fût en pisé de 50 cm de diamètre, ici représenté en transparence pour révéler le poteau en bois intérieur de section 14 × 14 cm. Source : dessin de l'autrice.

Figure 46 p.95 :

Dessin : Schéma illustrant l'articulation entre le poteau en bois et la base en pierre, réalisée grâce à un goujon d'ancrage en inox et à une couche de mortier de chaux assurant stabilité et protection contre les remontées d'humidité. Source : dessin de l'autrice.

Figure 47 et 48 p.96 :

Dessins : Le premier schéma montre la division de la section de la colonne (50 cm de diamètre) en quatre parties autour d'un noyau en bois de 14 cm × 14 cm, permettant de définir précisément la géométrie des moules de 30 cm de hauteur. Le second schéma illustre la forme d'un module en pisé obtenu à partir du moule en bois. Source : dessins de l'autrice.

Figure 49 p.97 :

Dessin : À gauche, schéma du moule inspiré du système de Cointeraux. À droite, décomposition des éléments : grand moule, petit moule et formes qui les composent. Source : dessin de l'autrice.

Figure 50 p.99 :

Dessin : Schéma illustrant le processus d'assemblage des modules en pisé autour du poteau en bois, chaque module venant s'emboîter successivement pour former le fût de la colonne. Source : dessin de l'autrice.

Figure 51 p.100 :

Dessin : Schéma d'un poteau en bois encastré dans une poutre en pierre, selon les pratiques constructives lyonnaises du début du XIX^e siècle. Le bois est logé dans une réservation taillée dans la pierre, puis calé et bloqué à la chaux. Source : dessin de l'autrice.

Figure 52 p.101:

Dessin : Schéma représentant une interprétation des dessins de François Cointeraux, adaptée à la fabrication de modules en pisé pour la colonne étudiée. Source : dessin de l'autrice.

Figure 53 p.104 :

Dessin : Axonométrie du moule en bois composé de plaques récupérées et superposées. Source : dessin de l'autrice.

Figure 54 p.105 :

Photo : Traçage des contours du moule sur une plaque de bois. Source : photo de l'auteur.

Figure 55 p.106 : Photo : Découpe du patron dans la plaque de bois à l'aide d'une perceuse et d'une scie sauteuse, la pièce étant maintenue par des serre-joints. Source : photo de l'auteure.

Figure 56 p.107 :

Photo : Reproduction des formes et découpe des différentes plaques composant le futur moule, à partir des gabarits préalablement réalisés. Source : photo de l'auteure.

Figure 57 p.108 :

Photo : Poste de découpe final équipé d'une affleureuse et d'une installation en bois permettant de maintenir le patron et les pièces à usiner grâce aux sauterelles mécaniques. Source : photo de l'autrice.

Figure 58 et 59 p.109:

Photos : Ensemble des formes en bois découpées puis assemblées par vissage pour constituer le moule final de 31 cm de hauteur. Deux tasseaux latéraux y sont ajoutés pour faciliter l'emboîtement et garantir la précision du montage. Source : photos de l'autrice.

Figure 60 p.110 :

Photo : Mise en place du moule final sur palette, maintenu par deux tasseaux latéraux et des serre-joints afin de reproduire le grand moule à partir du prototype. À droite, la terre prête à être mise en œuvre. Source : photo de l'autrice.

Figure 61 p.111 :

Photo : Terre de pisé achetée à la Briqueterie DeWulf, avant tout tamisage. Source : photo de l'autrice.

Figure 62 p.112 :

Photo : Terre de pisé prête à l'emploi, composée d'un mélange de 50 % de terre tamisée et 50 % de terre brute. Source : photo de l'autrice.

Figure 63 p.113 :

Photo : Remplissage du moule en bois avec la terre préparée, disposée par couches avant tassage. L'installation, posée sur une palette et sur une planche en bois, permet de stabiliser le moule et de faciliter le déplacement des modules une fois compactés. Source : photo de l'autrice.

Figure 64 et 65 p.114 :

Photos : Compactage de la terre dans le moule. La première image montre le tassement des couches à l'aide d'un montant en bois adapté à la forme du moule ; la seconde illustre le travail des angles, réalisé avec un bloc de bois frappé au marteau pour assurer la précision des bords. Source : photos de l'autrice.

Figure 66 et 67 p.115 :

Photos : Fin du compactage et démoulage du module de pisé. La première image montre le moule maintenu par des serre-joints avant le démoulage. La seconde révèle le bloc de terre fraîchement extrait. La terre atteint ici la hauteur finale de 30 cm. Source : photo de l'autrice.

Figure 68 p.116 :

Photo : Coin d'un module en pisé abîmé lors d'un démoulage mal exécuté, causant un léger éclatement de la matière. Source : photo de l'autrice.

Figure 69 p.117 :

Photo : Décalage des deux parties du moule sous la pression du compactage malgré le serrage. Source : photo de l'autrice.

Figure 70 p.118 :

Photo : Modules de pisé fraîchement démoulés mis en place dans la zone de séchage, où ils resteront trois à quatre semaines avant leur assemblage. Source : photo de l'autrice.

Figure 71 p.119 :

Photo : Découpe du bloc de pierre calcaire destiné à former la base du prototype. Le grand bloc initial est tracé puis scié à la main pour obtenir les trois éléments nécessaires : un bloc central et deux blocs latéraux. Source : photo de l'autrice.

Figure 72 p.120 :

Photo : Perçage, à l'aide d'une perceuse à percussion, du bloc de pierre destiné à accueillir le goujon d'ancrage inox M12 × 180 mm du poteau en bois. Source : photo de l'autrice.

Figure 73 p.121 :

Photo : Assemblage des blocs de pierre sur une palette, avec le goujon d'ancrage déjà implanté dans le bloc central. Source : photo de l'autrice.

Figure 74 p.122 :

Photo : Poteau en bois mis à dimension (14 × 14 cm) et découpé à 90 cm de hauteur, prêt à être fixé sur le goujon d'ancrage auparavant installé dans la base en pierre. Un trou de 12 mm est percé à sa base pour permettre l'emboîtement. Source : photo de l'autrice.

Figure 75 p.123 :

Photo : Pose du poteau en bois sur la base en pierre, après application d'une couche de mortier de chaux et insertion sur le goujon d'ancrage inox M12 × 180 mm. Source : photo de l'autrice.

Figure 76 p.124 :

Photo : Mise en place des modules en pisé autour du poteau. Source : photo de l'autrice.

Figure 77 et 78 p.125 :

Photos : Prototype final de la colonne en pisé. La première image montre la colonne entièrement montée autour du poteau en bois, tandis que la seconde illustre le sommet du prototype après lissage des joints et finition de la surface. Source : photos de l'autrice.

