

Construire en terre crue : influence des propriétés de la terre à disposition sur le choix des techniques constructives

Loris Verron-Guillemot

▶ **To cite this version:**

Loris Verron-Guillemot. Construire en terre crue : influence des propriétés de la terre à disposition sur le choix des techniques constructives. Génie civil. Nantes Université, 2023. Français. ⟨NNT : 2023NANU4089⟩. ⟨tel-05039264v3⟩

HAL Id: tel-05039264

https://theses.hal.science/tel-05039264v3

Submitted on 8 Apr 2026

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

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



HAL Authorization

COLLEGE DOCTORAL PAYS DE LA LOIRE
SCIENCES DE L'INGENIERIE ET DES SYSTEMES

Nantes Université

THESE DE DOCTORAT

NANTES UNIVERSITE

Ecole doctorale N° 602
Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes
Spécialité : Génie Civil

Par
Loris VERRON-GUILLEMOT

Construire en terre crue : influence des propriétés de la terre à disposition sur le choix des techniques constructives

De la facilité de mise en œuvre à la pertinence sociétale

Thèse préparée et soutenue à Bouguenais, le 03/07/2024
Unité de recherche : Université Gustave Eiffel, Matériaux et Structures (MAST), laboratoire Granulats et Procédés d'Élaboration des Matériaux (GPEM)

Rapporteurs avant soutenance :

Jean-Claude MOREL	ENTPE Lyon – LTDS
Gilles FRONTEAU	Université de Reims – URCA – GEGENAA 3795

Composition du Jury :

Président :	Jean-Claude MOREL	
Examinateurs :	Myriam DUC	Université Gustave Eiffel – CFR / GERS
	Stéphanie BONNET	Nantes Université – GeM UMR CNRS 6183
	RAZAKAMANANTSOA Andry	Université Gustave Eiffel – CFR / GERS
Dir. De thèse :	Erwan HAMARD	Université Gustave Eiffel – MAST / GPEM

Invité :

	Samuel Dugelay	Artisan – Makjo / De la Matière à l'Ouvrage

Titre : Construire en terre crue : influence des propriétés de la terre à disposition sur le choix des techniques constructives

Mots clés : terre crue, sol, ressource, SIG, procédés, techniques

Résumé : Les techniques de construction en terre crue sont au centre de l'attention dans un contexte valorisant l'emploi de matériaux « naturels » dans la construction. Mais son (re)déploiement équilibré nécessite un questionnement des objectifs du secteur du BTP (Contexte). Les usages conventionnels sont peu adaptés à la terre : notamment, la composition de la terre à disposition est souvent comparée à des standards pour évaluer sa possibilité d'emploi pour certaines technique de construction en terre crue, alors que ces standards sont en contradiction avec les propriétés des terres réellement employées dans le bâti ancien (Chapitre 1). Afin d'éclairer cette contradiction, plusieurs approches sont mobilisées pour qualifier ce qui gouverne les choix de techniques de construction en terre crue :
Chapitre 2 : La diversité des propriétés intrinsèques de la « ressource terre », leurs interactions et leur impact sur les procédés de mise en œuvre sont explorés dans une approche bibliographique pluridisciplinaire.
Chapitre 3A et 3B : Par la collecte et le croisement de données spatialisées décrivant le patrimoine bâti en terre crue avec des données pédologiques, l'impact des propriétés de la terre sur les choix techniques pré-industriels est évalué. Diverses bases de données et méthodes de croisement sont testées sur le territoire français hexagonal afin d'améliorer et évaluer les méthodes. Les résultats montrent des choix préférentiels de techniques selon la terre à disposition, avec de forts aléas probablement générés par les autres paramètres du contexte constructif.
Chapitre 4 : Les acquis des analyses précédentes permettent l'expérimentation d'une méthode de cartographie des potentiels des terres locales pour construire en terre allégée en Bretagne.
Chapitre 5 : L'influence de la terre à disposition s'opère aujourd'hui au sein d'un marché mondialisé aux chaînes de productions ramifiées, qui complexifie les enjeux des chantiers. Une discussion autour de l'influence de l'ancrage des constructeur.ices dans le savoir-faire et leur engagement politique sur le choix de techniques sociétalement pertinentes est proposée, avec comme fil conducteur les essais « de terrain » ou « sensibles » qui font l'interface entre elleux et la matière terre.

Title : Building with raw earth : impact of available earth properties on the choice of the building techniques

Keywords : raw earth building, soil, resource, GIS, processes, techniques

Abstract : Raw earth construction techniques are at the center of attention in a context that promotes the use of "natural" materials in construction. But their balanced (re)deployment requires us to question the objectives of the construction industry (Context). Conventional uses are poorly adapted to raw earth: in particular, the composition of available earth is often compared to standards to assess its suitability for certain raw earth construction techniques, whereas these standards are inconsistent with the properties of the earth actually used in old buildings (Chapter 1).
In order to understand this contradiction, several approaches are mobilized to qualify what governs the choice of raw earth construction techniques:
Chapter 2: The diversity of intrinsic properties of the "earth resource", their interactions and their impact on implementation processes are explored in a multi-disciplinary bibliographical approach.
Chapters 3A and 3B: By collecting and cross-referencing spatialized data describing the raw earth building heritage with soil databases, the impact of earth properties on pre-industrial technical choices is assessed. Various databases and cross-referencing methods are tested across France, in order to improve and evaluate the methods. The results show preferential choices of techniques depending on the available soil properties, with strong variations probably generated by other parameters of the construction context.
Chapter 4: The results of the previous analyses are used to test a method for mapping the potential of local soils for light earth building in Brittany.
Chapter 5: The influence of available soil on the choice of the building technique operates today within a globalized market with ramified production chains, which complicates the stakes of building projects. A discussion about the influence of builders' anchorage in know-how and political commitment on the choice of societally relevant techniques is proposed, with a focus on "field" or "sensitive" tests that represent the interface between them and the earth material.

Table des matières

Merci....16

Avant-propos : situation particulière et objectifs de travail....17

1 Un récit autour de ce projet de thèse....18
2 Engagement de recherche, dépendance choisie à la société....19
3 Savoirs situés....22
3.1 Objectivité....22
3.2 Visibilisation....23
3.3 Impartialité....23
3.4 Génie civil ?....24
3.5 Positionnements....24
4 Notes de formes sur le corps de texte....25
4.1 Langage à visée inclusive....25
4.2 Citations indirectes....25
4.3 Formes de savoirs : littérature blanche, grise et entretiens-discussions....26

Contexte : éco-construire ? Encore construire ?....28

1 Construire : constats et perspectives pour le secteur de la construction....29
1.1 Quels besoins de construction ?....29
1.2 Construire en terre crue....34
1.3 Terres d'excavation....35
1.4 Adjuvantation....38
1.4.1 Les liants hydrauliques....38
1.4.2 Les granulats....39
1.4.3 Les liants « biosourcés industriels »....39
2 La terre crue en France hexagonale : état des lieux....40
2.1 Intensité du bâti existant et dynamique de la filière actuelle....40
2.2 Un patrimoine invisible, ou « invu »....41
2.3 Techniques de construction en terre crue et emplois associés....42
2.3.1 Techniques-type....42
2.3.2 Techniques-type traditionnelles....42
2.3.3 Techniques-type modernes....46
2.3.4 Classer les techniques....48
2.3.5 Cartographies des techniques....50
3 Conclusion : parfois construire, mais avec soin....54
3.1 Approvisionnement....55
3.2 Préparation et façonnage....56
3.3 Habitation et entretien....57
3.4 Fin de vie : décomposition....57
3.5 Massifier la construction en terre crue ?....57
4 Problématique : la variabilité des sols comme frein au déploiement de la terre crue ?....58

Chapitre 1 : La « convenance des terres » dans la littérature académique. .59

1 L'inadaptation des références communément employées....60
1.1 Comparaison des propriétés de matériaux vernaculaires aux recommandations....60
1.2 Un début de consensus sur l'inadéquation des références courantes....65
1.3 Une problématique qui dépasse le champ académique....66

2 Voies de réponses existantes....69
2.1 Modifier les seuils....69
2.2 Apporter de nouvelles variables compositionnelles....71
2.3 Proposer des modèles complexes basées sur les propriétés compositionnelles*....72
2.4 L'approche performancielle....73
2.5 Solliciter l'expertise artisanale dès la phase conception....74
3 Questionner les *propriétés cibles* et le *déterminisme environnemental*....74
3.1 Redéfinir les *propriétés cibles* dans le lien terre-technique?....75
3.2 Questionner le déterminisme de la « convenance des terres » sur le choix technique....77
4 Hypothèses de travail....77
5 Conclusion du Chapitre 1....80

Chapitre 2 : de la matière à l'ouvrage....82

1 Introduction....83
2 Le sol, un objet de recherche interdisciplinaire....83
2.1 Définir la terre....83
2.2 Terminologie....86
2.2.1 Sol....86
2.2.2 Granulométrie : proposition de codification....86
3 La variabilité des sols hexagonaux est gouvernée par le matériau parental, le relief et l'action anthropique....88
4 Représenter les matrices de terre en phases volumiques....89
4.1 De la teneur en eau à la fraction saturée....90
4.2 De la densité à la compacité....92
5 Propriétés gouvernant la mécanique des matrices à l'état frais....92
5.1 Angles de contraintes, ruptures et comportements-types....92
5.1.1 Force et énergie....93
5.1.2 Angles de contraintes et plans de rupture....94
5.1.3 Composition et homogénéité....96
5.1.4 Exemples de réponses aux contraintes....97
5.2 Friction, cohésion et impact sur la résistance mécanique aux contraintes....98
5.2.1 Cohésion et friction....98
5.2.2 Saturation en eau et compacité. États saturés, foisonnés, compactés....100
5.2.3 Les états hydriques....103
5.2.4 Résistance mécanique finale : la recherche de compacité....105
5.2.5 Composition des solides....112
5.2.6 Homogénéité des matrices de terre crue : un angle mort préjudiciable pour l'étude des choix techniques ?....113
5.3 Exemple pour la bauge : contraintes et variation des propriétés d'un mélange de terre crue....115
5.3.1 Extraction (A)....116
5.3.2 Formulation et homogénéisation : ajout d'eau (B)....116
5.3.3 Formulation et homogénéisation : ajout de fibres (C)....117
5.3.4 Façonnage (D)....117
5.3.5 Séchage (E)....118
5.3.6 Analyse : quelles variables suivre pour l'analyse des procédés de terre crue ?....118
6 Ouvrabilité : intégrer les propriétés des mélanges au sein des gestes et des procédés....119
6.1 Plusieurs variables dans un geste, plusieurs gestes dans un procédé....120
6.2 Plusieurs procédés dans un ouvrage ?....122
7 Conclusion du Chapitre 2....124

Chapitre 3A : Bâti historique et facteurs environnementaux – méthode…..126
1 Introduction.....127
2 Historique académique de la méthode.....128
2.1 Royaume-Uni : Ford et al. (1999, 2002, 2005).....129
2.2 Péninsule Ibérique : Mileto, Hueto-Escobar et al. (2019, 2022).....132
2.3 France : Hamard et al. (2017, 2018).....139
2.4 Analyse : quelles précautions pour l'analyse de croisements spatiaux de données patrimoniales ?.....143
3 Théorie : choix technique et propriétés pédologiques en période pré-industrielle.....144
3.1 Objectifs.....144
3.2 Aléas, biais et propriétés du contexte constructif.....147
3.3 L'installation préférentielle.....147
3.3.1 Description.....147
3.3.2 Biais et aléas dans la relation sol-technique.....148
3.3.3 Variables permettant la réduction des aléas et biais.....148
3.4 L'écosystème matériel : impact du climat, de la géographie, des ressources en terre, pierre, bois, fibres, eau, et systèmes techniques pour le chantier.....149
3.4.1 Géographie et climat.....150
3.4.2 Terre.....151
3.4.3 Bois.....152
3.4.4 Fibres.....153
3.4.5 Eau libre.....154
3.4.6 Pierre.....154
3.4.7 Ressources énergétiques et systèmes de transports.....156
3.4.8 Analyse : matériaux et matériels.....159
3.5 Cultures constructives.....160
3.5.1 Diffusion.....161
3.5.2 Coutumes et rythmes saisonniers de subsistance.....162
3.5.3 Performances techniques d'usage.....163
3.5.4 Performances techniques de mise en œuvre.....164
3.5.5 Désirabilité, incitation symbolique.....167
3.5.6 Incitations légales et administratives.....169
3.5.7 Analyse : cultures constructives.....170
3.6 Conclusion : choix technique et contexte constructif.....172
3.6.1 L'influence du sol au sein d'un contexte socio-écosystémique complexe.....172
3.6.2 Quelles données pour évaluer le contexte environnemental ?.....173
4 Données pédologiques.....175
4.1 Données pédologiques ou données géologiques ?.....175
4.2 Description des données pédologiques.....176
4.2.1 DoneSol3 – raster-STU, vecteur-STU et vecteur-SMU.....176
4.2.2 GlobalSoilMaps.....180
4.2.3 SoilGrids.....180
4.2.4 Analyse : potentiels des sources de données pédologiques.....181
4.3 Préparation des données pédologiques.....181
4.3.1 DoneSol3.....182
4.3.2 SoilGrids.....186
4.3.3 GlobalSoilMaps.....187
5 Données patrimoniales géolocalisées.....187
5.1 Terre : liste des sources.....187
5.2 Tri et formatage des données terre au format de la base de données : type de sources et transformation associée.....189
5.3 Détail de la transformation des données terre et densité, par source.....190

5.3.1 Transects de collecte de données : bâtiments en terre crue....190
5.3.2 Service du patrimoine de Bretagne : bâtiments « Vernaculaires » et bâtiments « terre »....194
5.3.3 Données de densité : sources et transformations....200
5.4 BDD-terre-crue : une base de données destinée à la localisation du patrimoine bâti en terre crue....204
6 Croisement des données....205
6.1 Extraction des valeurs des BDD pédologiques....205
6.2 Post-traitement des données croisées : calcul de variables secondaires....206
6.2.1 Passant à 80µm....206
6.2.2 Distance à la courbe de Fuller....206
7 Incertitudes de la méthode de croisement de données pédologiques et patrimoniales....207
7.1 Incertitude 1 : distance au sol extrait. Le sol sous-jacent au bâtiment correspond-il au sol employé pour construire ?....207
7.2 Incertitude 2 : profondeur d'extraction. Quel horizon considérer dans l'extraction des données pédologiques ?....208

Chapitre 3B : Bâti historique et facteurs environnementaux – résultats....210

1 Introduction....211
2 Comparaison de la composition de murs avec les propriétés pédologiques des sols sous-jacents....211
2.1 Incertitudes de modélisation....211
2.2 Résumé de la méthode et des données employées....211
2.3 Représentation des résultats....212
2.4 Résultats des comparaisons....212
2.5 Discussion....216
2.5.1 Qualité des corrélations....216
2.5.2 Provenance des biais....220
2.6 Variation et optimisation de la profondeur d'extraction....221
2.7 Analyse : comparer des granulométries mesurées et les sols des bases de données pédologiques....222
3 La densité relative pour représenter le choix préférentiel des techniques de construction....223
3.1 Rappels de la méthode....223
3.2 Rappel des données employées....224
3.3 Données et mise en forme des résultats....225
3.3.1 Graphiques d'occurrence et de densité relative : lecture et remarques générales....225
3.3.2 Diagrammes des textures....226
4 Relations entre sol et densité bâtie en bauge : données Vernaculaires en Bretagne....227
4.1 Résultats par variable : graphiques d'occurrence et de densité....227
4.1.1 Données de densité « idéales » : bâti Vernaculaire SPbretagne....227
4.1.2 Autres sources de données « de densité » : Vernaculaire, OSM, Aléatoire....234
4.2 Projections dans le diagrammes ternaires des textures....235
4.2.1 Données de densité « idéales » : bâti Vernaculaire SPbretagne....235
4.2.2 Variation des données pédologiques....236
4.2.3 OpenStreetMap comme donnée de densité....237
4.3 Discussion....239
4.3.1 Comparaison à la littérature existante : reproductibilité ?....239
4.3.2 Qualité des données pédologiques....239
4.3.3 Choix technique....241
4.3.4 Données « de densité » et installation préférentielle....242
4.4 Optimisation des paramètres de modélisation....243
4.4.1 Indicateur d'acuité....244

4.4.2 Base de données pédologiques pédologiques....244
4.4.3 Distance de connaissance....245
4.4.4 Analyse : optimisation du modèle spatial....247
5 Relation entre sol et densité bâtie pour la bauge, le pisé, l'adobe et le torchis : transects dans quatre régions....248
5.1 Données de densité OSM-visible : optimisation de la méthode d' « analyse de visibilité depuis le transect »....248
5.1.1 Rappel de la méthode....249
5.1.2 Paramètres optimisés....249
5.1.3 Variables d'acuité....250
5.1.4 Temps de calcul....251
5.1.5 Distance maximale....251
5.1.6 Résolution....253
5.1.7 Hauteur des bâtiments....253
5.1.8 Résultats finaux....254
5.2 Propriétés pédologiques et densités relatives....255
5.2.1 Densité relative par technique-type et par région....255
5.2.2 Densité relative entre techniques de terre crue....275
5.2.3 Diagramme ternaire par technique-type....287
6 Discussions....291
6.1 Quels impacts des sols sur les choix des techniques de construction en contextes pré-industriels ?....291
6.1.1 Choix préférentiel selon les propriétés de composition de la terre....291
6.1.2 Profondeur des sols, pierrosité et construction en pierre....297
6.1.3 Une terre, une technique ?....298
6.1.4 Une terre peut-elle être défavorable à la construction en terre crue ?....299
6.2 Différences entre recommandations et observations : quelles origines ?....300
6.2.1 Des propriétés cibles non représentatives ?....300
6.2.2 Des contextes constructifs particuliers, ou des techniques inconnues ?....301
6.3 Croiser des données pédologiques et patrimoniales : quelles données, quelle méthode ? 301
6.3.1 Estimer la composition de la terre des murs à partir de croisements bâti/bases de données pédologiques : incertitudes et potentiels....301
6.3.2 La densité bâtie comme marqueur de choix préférentiel....303
6.3.3 Données de densité : une information de qualité nécessaire mais peu disponible…304
6.3.4 Bâtiments composés de terre crue : maîtriser l'échantillonnage....305
6.3.5 Perspective méthode....305
7 Conclusion des chapitres 3A et 3B....310

Chapitre 4 : Cartographier les ressources : exemple pour la terre allégée. 313

1 Introduction : pourquoi cartographier les potentiels des sols pour la construction en terre crue ?....314
2 Méthode....315
2.1 Définir les potentiels techniques de la terre allégée pour un sol donné....315
2.1.1 Propriétés cibles....315
2.1.2 Propriétés de prédiction....315
2.1.3 Sources d'informations....317
2.2 Description des propriétés cibles et des propriétés de prédictions et seuils associés....317
2.2.1 Excavation....317
2.2.2 Facilité de tamisage....317
2.2.3 Enrobage des fibres....318
2.2.4 Comportement mécanique à l'état frais....319

2.2.5 Comportement mécanique à l'état sec....320
2.3 Calculs et projection cartographique....320
2.3.1 Calcul des volumes et pourcentages de terre convenable....320
2.3.2 Analyse de sensibilité sur les seuils des propriétés de prédiction....320
2.3.3 Cartographie de la convenance des sols en Bretagne....321
2.3.4 Outils de traitement des données....321
3 Résultats....322
3.1 Statistiques sur les données DoneSol3 Bretagne....322
3.2 Analyse de sensibilité....324
3.3 Volume et pourcentage de sol convenable....324
3.4 Cartographie de la convenance des sols....326
3.5 Distance aux sols convenables....326
4 Discussions....328
4.1 La terre allégée en Bretagne....328
4.1.1 Disponibilité de la ressource, en volume....328
4.1.2 Sensibilité des seuils....329
4.1.3 Comparaison avec d'autres techniques constructives....329
4.2 Limites de la méthode et précautions d'usage....332
4.2.1 Un outil non adapté à la prise de décision in situ....332
4.2.2 Pollution et propriété privée : les vraies limites de convenance des terres ?....332
4.2.3 Une évaluation limitée à la terre allégée....333
4.3 Risques et mésusages des outils proposés....334
4.3.1 Mésusages des outils et mesures de protection....334
4.3.2 La terre crue, « éco-brunissement » de la filière terrassement ?....336
5 Conclusion du Chapitre 4....337

Chapitre 5 : choix technique et enracinement....339

1 Introduction : du déterminisme dans les choix techniques....340
2 Le choix technique en pratique : recours au précédent et essais sensibles....340
2.1 Essais « de terrain » : un compromis entre précision et frugalité ?....341
2.2 Essais « sensoriels » : le corps comme appareil de mesure, l'expérience comme calibration....341
2.3 Un dispositif sensoriel et un apprentissage plus ou moins explicite....342
2.4 Essais « sensibles » : « évaluations holistiques spontanées »....343
3 Propositions : l'économie doit-elle guider les choix techniques ?....344
3.1 L'économie mondialisée....344
3.2 L'économie du marché du bourg....346
3.3 Le déracinement des sociétés industrialisées....347
4 Au-delà du chantier : l'approche holistique du choix technique malgré le déracinement....348
4.1 Des convictions qui portent les chantiers au-delà de l'économie financière....348
4.2 Un choix facilité par l'enracinement local....349
4.3 Un capital culturel indispensable ?....350
5 Le rôle d'une approche scientifique dans les choix techniques....350
6 Conclusion du Chapitre 5....351

Conclusion générale....353

1 L'échec des approches « de caractérisation »....353
2 La résistance mécanique, facteur anecdotique du choix technique ?....353
3 Des choix techniques holistiques....354
4 Questionner l'approche académique des procédés techniques....355
5 Quels choix techniques pour une « filière terre » équilibrée ?....357

5.1 Techniques réparatrices ou greenwashing ?.....357
5.2 Ancrage et adaptation locale.....357

Lexique.....360

Liste des abréviations.....369

Bibliographie.....371

Liste des annexes.....393

Index des figures

*Figure 1: Evolution du taux de vacance des logements en France (% du nombre de logements) (Fondation Abb*é Pierre 2022:161).....33
Figure 2: Proportion relative des catégories d'occupation des logements en France (données INSEE 2021).....34
*Figure 3: Expulsions locatives avec concours de la force publique (Fondation Abb*é Pierre 2022:222).....35
Figure 4 : représentation du volume de terres d'excavation généré par les travaux du Grand Paris d'ici 2030 (Loiret 2021)......38
Figure 5 : localisation des formations intégrant la construction en terre crue en France (CCTC 2023:12)......43
Figure 6 : Compaction manuelle du pisé dans un coffrage. ©Association Georges Antonin.....45
Figure 7 : Ajout des fibres au cours du piétinement d'un mélange plastique dans un procédé type bauge.....46
Figure 8 : Moulage d'adobes. ©Briquetterie T.E.R.R.E.....47
Figure 9 : Tressage du torchis sur éclisses.....48
Figure 10 : Terre-chanvre coffré dans une ossature bois.....49
Figure 11: Classification des techniques de construction en terre crue selon la consistance de la terre employée dans le mélange et de la typologie de mise en œuvre (Fabbri et al. 2022:6).....50
*Figure 12 : Classification des techniques de construction en terre crue basée sur la saturation en eau de la terre des mélanges de terre crue à l'étape de façonnage des éléments (abscisse), et la fonction et le type de mise en œuvre de la terre (ordonnée) (Pel*é-Peltier 2023).....51
Figure 13 : Relations de continuité entre les techniques-type de terre crue (Hamard 2017)......52
Figure 14 : Occurrence de quatre techniques-types de construction en terre crue en France hexagonale (Dipasquale et al. 2011)......54
Figure 15: Occurrence des quatre techniques-types de construction en terre crue en France hexagonale. (d'après Guillaud 2006).....55
Figure 16 : Localisation des bâtiments en terre repérés au cours de cette étude et identifiés dans des bases de données patrimoniales existantes (points). Comparaison avec la carte de distribution du patrimoine bâti en quatre techniques-type de terre, selon Dipasquale et al. (2011)......56
Figure 17 : Techniques de construction en terre crue repérées dans le village de Haget (Gers).....57
Figure 18 : Cycle de vie d'un mur en bauge, et conditions de pertinence sociétale* pour chacune des étapes.....58
Figure 19 : Lancer de motte de terre sur deux chantiers type bauge.....60
Figure 20 : Distribution granulométrique de 6 échantillons d'adobes comparés au fuseau granulométrique suggéré par Houben et Guillaud (2006) (Pagliolico et al. 2010)......64
Figure 21 : Distribution granulométrique de 6 échantillons de pisé comparés à différents fuseaux granulométriques (Gomes et al. 2014)......65
Figure 22 : Distribution granulométrique de 23 échantillons de pisé comparés au fuseau granulométrique de Houben et Guillaud (2006) (Rojat et al. 2020)......66
Figure 23 : Texture de 23 échantillons de pisé comparées à différentes recommandations sur la répartition des classes granulométriques, par Rojat et al. (2020)......67
Figure 24 : Texture des sols employés pour la construction en bauge dans des bâtiments vernaculaires en Bretagne (dégradé vert par densité bâtie), Allemagne (bleu continu) et Royaume-Uni (points rouges, correspondant à des bâtiments présentant des pathologies) comparée à 4 seuils de référence (tirets discontinus) (Hamard et al. 2018). Dans cette représentation, la somme des classes granulométriques Argile/Limon/sable est égale à 100 %......68
Figure 25: Fractions granulométriques 0-2µm, 2-50µm, 50-2000µm et >2000µm des sols employés pour la construction en bauge dans des bâtiments vernaculaires en Bretagne, comparées à 4 références issues de la littérature académique (Hamard et al. 2018)......69

Figure 26 : Distribution granulométrique du sol non amendé (Earth mix 1) et du sol amendé de 68 % de sable (Earth mix 2), comparés aux deux fuseaux granulométriques les plus restrictifs référencés par Gomes et al. (2014) (voir Figure 21) (Cuccurullo et al. 2021)......74
Figure 27 : Positionnement des 23 échantillons de pisé vernaculaire Rhone-Alpins et de 33 échantillons de bauge Bretonne selon leur passant granulométrique à 80µm et leur réactivité au Bleu de méthylène (Rojat et al. 2020)......76
Figure 28: Définition du sol selon les disciplines d'étude. Adapté de (Hamard et al. 2018)......89
Figure 29 : classification des éléments du sol selon leur taille (Baize 2024)......92
Figure 30 : néoformation des minéraux dans les sols selon le climat de la pédogenèse (Allen 1997, référence initiale introuvable).....93
Figure 31 : représentation des teneurs volumiques des solides, de l'eau et de l'air d'une terre selon leurs proportions relatives dans le diagramme ternaire volumique.....95
Figure 32 : évolution de la saturation sur le diagramme volumique.....96
Figure 33: Courbes de réponse contrainte/déformation d'une argile soumise à l'appareil de Barnes en fonction de la teneur en eau (Barnes 2013b:195).....99
Figure 34 : Courbe type contrainte-déformation d'un échantillon de bauge sèche soumis à une contrainte compressive non confinée (Miccoli et al. 2014)......100
Figure 35 : direction des contraintes appliquées à une matrice composée de terre crue.....101
Figure 36 : Courbes types de contrainte-déformation pour des éléments de maçonnerie testés à l'échelle en compression non confinée : maçonnerie d'adobes, pisé et bauge (Miccoli et al. 2014). 102
Figure 37: Courbe type contrainte/déformation d'un essai au rhéomètre. Vinceslas (2019), d'après Mahaut et al. (2008)......103
Figure 38 : Evolution des résistances mécaniques en compression et cisaillement d'échantillons de sols naturels selon leur teneur en eau massique. Les données sont issues de Vinceslas 2019 (a.), Ji et al. 2023 (b.), Ekwue 1990 (c.), Fabbri et al. 2022 (d.).....106
Figure 39 : A saturation, toute augmentation de la teneur en eau équivaut à une réduction de compacité (teneur en solides).....107
Figure 40: Impact du type de contrainte sur la composition volumique.....112
Figure 41: Optimum de compacité type Proctor en fonction de l'énergie appliquée au mélange (Bui et al. 2009)......113
Figure 42 : courbes d'optimums de compaction obtenues pour un essai proctor et des essais de compaction statique à 25, 50 et 100 MPa (Bruno et al. 2016)......114
Figure 43 : densité et teneur en eau fraîche et sèche d'échantillons de terre crue compactés à différentes forces en variant les teneurs en eau de modelage. Adapté de (Bruno et al. 2016)......117
Figure 44 : Représentation théorique de la variation de composition volumique d'un mélange de terre crue au cours d'un procédé type bauge. A : extraction, B : ajout d'eau et homogénéisation, C : ajout de fibres et homogénéisation, D : façonnage, E ; séchage.....122
Figure 45 : impacts de la teneur en eau, en fibres et de la teneur en argiles de la terre à disposition sur l'ouvrabilité des étapes des procédés-types de bauge (CCTC 2018:14)......128
Figure 46 : Position géographique de bâtiments en bauge superposée aux cartes géologiques pour une commune du Royaume-Uni (localisation exacte non précisée) (Ford et al. 1999:10)......135
Figure 47 : Distribution de patrimoine bâti en pisé (rammed earth), adobe, et pan de bois garni de torchis ou d'adobe (half timber) inventorié sur la péninsule Ibérique et superposés à une carte topographique (Mileto et al. 2019)......137
Figure 48 : Distribution du patrimoine bâti en pisé (rammed earth), adobe, et pan de bois garni de torchis ou d'adobe (half timber) inventorié sur la péninsule Ibérique et superposés à une carte du couvert forestier contemporain et du réseau hydrographique principal (Mileto et al. 2019)......139
Figure 49 : Distribution du patrimoine bâti en pisé (rammed earth), adobe, et pan de bois garni de torchis ou d'adobe (half timber) inventorié sur la péninsule Ibérique et superposés à une carte représentant la pluviométrie annuelle contemporaine (Mileto et al. 2019)......140

Figure 50: Distribution du patrimoine bâti en pisé (rammed earth), adobe, et pan de bois garni de torchis ou d'adobe (half timber) inventorié sur la péninsule Ibérique et superposés à une carte représentant la lithologie du sol (Mileto et al. 2019)......141
Figure 51 : CEC des sols selon la densité bâtie en bauge (a) et relation entre le passant à 2µm et l'indicateur d'« activité » des argiles (CEC/P2µm, voir Annexe I, 2.2.4.3) (b) (Hamard et al. 2018). 144
Figure 52 : Texture des sols employés pour la construction en bauge dans des bâtiments Vernaculaires* en Bretagne (dégradé vert par densité bâtie en bauge relativement à la densité de bâtiments Vernaculaires) (Hamard 2017).....145
Figure 53 : (également représentée en Figure 52). Texture des sols employés pour la construction en bauge dans des bâtiments vernaculaires en Bretagne (dégradé vert par densité bâtie en bauge relativement à la densité de bâtiments vernaculaires) (Hamard et al. 2018). A gauche, comparée à 4 seuils de référence (tirets discontinus). A droite, comparée à celle de bâtiments observés en Allemagne (bleu continu) et à des bâtiments endommagés au Royaume-Uni (points rouges)......146
Figure 54 : densité relative bâtie en bauge pour chacune des unités pédologiques étudiées, selon leur texture moyenne. D'après Hamard (2017)......148
Figure 55: Facteurs de corrélation entre propriétés du sol et occurrence de techniques de construction en terre crue, et facteurs externes d'influence sur le choix technique.....151
Figure 56: Illustration de la délimitation d'UCS dans un paysage. © E. Rabot, CNRS, laboratoire Écologie Fonctionnelle et Environnement, photographie V. Hurtes, CAUE de l'Aveyron.....182
Figure 57 : Les Unité Cartographiques de Sol (UCS, ou SMU en anglais) sont des descriptions de pédopaysages spatialisées à l'échelle 1:125000. Elles sont composées d'Unité Typologiques de Sol (UTS, ou STU en anglais), « profils-types » de sols. Les STU sont composées de strates (strata), représentant des horizons-types (Hamard, 2017, p. 49).....183
Figure 58 : Schéma récapitulatif de la transformation des données raster-STU.....189
Figure 59 : Schéma récapitulatif des méthodes de transformation des données vecteur-SMU et vecteur-STU.....190
Figure 60 : Schéma récapitulatif des méthodes de transformation des données SoilGrids et GlobalSoilMaps.....191
Figure 61: Fenêtre de visualisation des propriétés d'un élément de la base de données de bâti vernaculaire.....201
Figure 62: Entrée dans le programme : a. technique = caillebotis-certain, hauteur = 1 ; b. technique = caillebotis-certain, hauteur = 1.5 ; c. technique = bauge, hauteur = 0 ; d. technique = bauge, hauteur = 0.....202
Figure 63 : résultats de l'analyse de visibilité des polygones OSM dans l'interface QGIS.....208
Figure 64 : Comparaison des propriétés de granulométrie de la fraction fine (F2µm, F50µm, F2000µm) mesurées sur des éléments de pisé à leur équivalent extrait des bases de données pédologiques.....219
Figure 65 : Comparaison de la teneur en éléments grossiers (F2000µm_D) et de la VBS mesurées sur des éléments de pisé à leur équivalent extrait des bases de données pédologiques (F2000_D et CEC). 220
Figure 66 : Comparaison des propriétés de granulométrie de la fraction fine (F2µm, F50µm, F2000µm) mesurées sur des éléments de pisé à leur équivalent extrait des bases de données pédologiques.....223
Figure 67 : Comparaison de la teneur en éléments grossiers (F2000µm_D) et de la VBS mesurées sur des éléments de pisé à leur équivalent extrait des bases de données pédologiques (F2000_D et CEC).....224
Figure 68: Variation du coefficient de corrélation entre les variables mesurées et extraites des 22 bâtiments de pisé, selon la profondeur d'extraction des données pédologiques.....226
Figure 69 : Occurrence de bâtiments en terre, vernaculaires, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en terre relativement aux bâtiments vernaculaires, OSM et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques F2µm (« argiles », colonne de

gauche) et F50µm (« limons », colonne de droite) pour les sources de données pédologiques vecteur-SMU, vecteur-STU et raster-STU.....233
Figure 70 : Occurrence de bâtiments en terre, vernaculaires, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en terre relativement aux bâtiments vernaculaires, OSM et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques F2µm (« argiles », colonne de gauche) et F50µm (« limons », colonne de droite) pour les sources de données pédologiques GlobalSoilMaps (GSM) et SoilGrids (SG).....234
Figure 71 : Occurrence de bâtiments en terre, vernaculaires, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en terre relativement aux bâtiments vernaculaires, OSM et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques F2000µm (« sable », colonne de gauche) et F2000µm_D (« graviers », colonne de droite) pour les sources de données pédologiques vecteur-SMU, vecteur-STU et raster-STU.....235
Figure 72 : Occurrence de bâtiments en terre, vernaculaires, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en terre relativement aux bâtiments vernaculaires, OSM et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques F2000µm (« sables », colonne de gauche) et F2000µm_D (« graviers », colonne de droite) pour les sources de données pédologiques GlobalSoilMaps (GSM) et SoilGrids (SG).....237
Figure 73 : Occurrence de bâtiments en terre, vernaculaires, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en terre relativement aux bâtiments vernaculaires, OSM et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques CEC (colonne de gauche) et Activité (CEC/F2µm, colonne de droite) pour les sources de données pédologiques vecteur-SMU, vecteur-STU, raster-STU et SG.....238
Figure 74 : Occurrence de bâtiments en terre, vernaculaires, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en terre relativement aux bâtiments vernaculaires, OSM et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon la profondeur du sol pour les sources de données pédologiques vecteur-SMU et vecteur-STU.....239
Figure 75 : Densité bâtie en bauge relativement au bâti Vernaculaire en Bretagne, par classe de texture du sol. Données pédologiques raster-STU.....240
Figure 76 : Densité bâtie en bauge relativement au bâti Vernaculaire en Bretagne, par classe de texture du sol. Données pédologiques : a. vecteur-STU, b. vecteur-SMU, c. GSM, d. SG.....241
Figure 77 : Densité bâtie en bauge relativement au bâti OpenStreetMap en Bretagne, par classe de texture du sol. Données pédologiques : a. raster-STU, b. vecteur-STU, c. GSM.....243
Figure 78 : Densité bâtie en bauge relativement au bâti OpenStreetMap en Bretagne, par classe de texture du sol. Données pédologiques issues de DoneSol3 : raster-STU, vecteur-STU.....244
Figure 79: Représentation de la différence entre les médianes d'occurrence des données de bauge et vernaculaires (a.) et de l'intervalle entre les quantiles à 5 et 95% des données bauge (b.) pour les résultats d'analyse de GlobalSoilMaps - F50µm.....249
Figure 80 : Acuité de discernement de la corrélation « propriété pédologique-densité relative de bâtiments en bauge » (Median displacement = déplacement relatif de la médiane) selon la base de données pédologiques et pour plusieurs propriétés pédologiques.....250
Figure 81 : Variation de l’acuité du discernement entre l’occurrence de la bauge et l’occurrence de bâtiments vernaculaires selon la distance maximale au bâtiments en bauge d’inclusion des données de densité vernaculaire.....251
Figure 82: Sensibilité du temps de calcul aux paramètres de l'analyse de visibilité. (en rouge le paramétrage de base).....256
Figure 83: Sensibilité de l'analyse de visibilité aux paramètres "distance maximale", "résolution" et "hauteur bâti".....257
Figure 84: Sensibilité du temps de calcul aux paramètres de l'analyse de visibilité.....259
Figure 85: Sensibilité de l'analyse de visibilité aux paramètres "distance maximale", "résolution" et "hauteur bâti".....259
Figure 86 : Transect Ouest: occurrence de bâtiments en bauge, OSM-visible et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en bauge relativement aux bâtiments OSM-visible

et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques présentes dans la base de données vecteur-STU.....262
Figure 87 : Transect Ouest: occurrence de bâtiments en bauge, OSM-visible et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en bauge relativement aux bâtiments OSM-visible et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques présentes dans la base de données GlobalSoilMaps.....263
Figure 88 : transect Occitanie : occurrence de bâtiments en bauge, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en bauge relativement aux bâtiments OSM et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques présentes dans la base de données vecteur-STU.....264
Figure 89 : transect Occitanie : occurrence de bâtiments en bauge, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en bauge relativement aux bâtiments OSM et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques présentes dans la base de données GlobalSoilMaps.....265
Figure 90 : transect Champagne-Ardenne: occurrence de bâtiments en bauge, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en bauge relativement aux bâtiments OSM et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon la variable F50µm de la base de données vecteur-STU...266
Figure 91 : transect Limagne: occurrence de bâtiments en pisé, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en pisé relativement aux bâtiments OSM et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques présentes dans la base de données vecteur-STU.....268
Figure 92 : transect Limagne: occurrence de bâtiments en pisé, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en pisé relativement aux bâtiments OSM et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques présentes dans la base de données GlobalSoilMaps.....269
Figure 93 : transect Occitanie: occurrence de bâtiments en pisé, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en pisé relativement aux bâtiments OSM et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques présentes dans la base de données vecteur-STU.....270
Figure 94 : transect Occitanie: occurrence de bâtiments en pisé, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en pisé relativement aux bâtiments OSM et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques présentes dans la base de données GlobalSoilMaps.....271
Figure 95 : transect Champagne-Ardenne: occurrence de bâtiments en adobes, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en adobes relativement aux bâtiments OSM et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques présentes dans la base de données vecteur-STU.....273
Figure 96 : transect Occitanie: occurrence de bâtiments en adobes, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en adobes relativement aux bâtiments OSM et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques présentes dans la base de données vecteur-STU.....274
Figure 97 : transect Occitanie: occurrence de bâtiments en adobes, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en adobes relativement aux bâtiments OSM et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques présentes dans la base de données GlobalSoilMaps.....275
Figure 98 : transect Limagne: occurrence de bâtiments en adobes, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en adobes relativement aux bâtiments OSM et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques présentes dans la base de données vecteur-STU.....276
Figure 99 : transect Limagne: occurrence de bâtiments en adobes, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en adobes relativement aux bâtiments OSM et Aléatoires

(graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques présentes dans la base de données GlobalSoilMaps.....277
Figure 100 : Occurrence des bâtiments en chacune des techniques-types et de l'ensemble des bâtiments en terre repérés dans les transects (allEarth) (graphiques supérieurs) ; et densités de bâtiments en chacune des techniques-types relativement à l'ensemble des bâtiments en terre (graphiques inférieurs); selon la distribution des variables pédologiques des sols sous-jacents de la base de données GlobalSoilMaps.....281
Figure 101 : Occurrence des bâtiments en chacune des techniques-types et de l'ensemble des bâtiments en terre repérés dans les transects (allEarth) (graphiques supérieurs) ; et densités de bâtiments en chacune des techniques-types relativement à l'ensemble des bâtiments en terre (graphiques inférieurs); selon la distribution des variables pédologiques des sols sous-jacents de la base de données vecteur-STU.....283
Figure 102: Localisation des bâtiments en pisé à CEC >400mmol+.kg^{-1} et F2µm > 400g.kg^{-1}. (encadré orange).....284
Figure 103 : Localisation des bâtiments en bauge à F50µm <200 mmol+.kg^{-1} (deux encadrés orange).....286
Figure 104 : Densité relative des techniques-types de construction en terre crue pour le passant à 80µm.....289
Figure 105 : Densité relative des techniques-types de construction en terre crue relativement au coefficient de proximité à la courbe de Fuller.....289
Figure 106 : Densité bâtie en bauge relativement au bâti OSM en France hexagonale, par classe de texture du sol. Bâti bauge issu de transects. Données pédologiques : a. vecteur-STU, b. GSM. Les résultats obtenus par Hamard et al. (2018) sont reproduits (voir Figure 24).....292
Figure 107 : Densité bâtie en bauge relativement au bâti OSM en Bretagne (a.) et hors Bretagne (b.), par classe de texture du sol. Bâti bauge issu de transects. Données pédologiques : vecteur-STU. 293
Figure 108 : Densité bâtie en pisé relativement au bâti OSM en France hexagonale, par classe de texture du sol. Bâti pisé issu de transects. Données pédologiques : a. vecteur-STU, b. GSM.....294
Figure 109 : Densité bâtie en adobes relativement au bâti OSM en France hexagonale, par classe de texture du sol. Bâti adobes issu de transects. Données pédologiques : a. vecteur-STU, b. GSM.…294
Figure 110 : Densité bâtie en torchis relativement au bâti OSM en France hexagonale, par classe de texture du sol. Bâti torchis issu de transects. Données pédologiques : a. vecteur-STU, b. GSM.…295
Figure 111: Recommandations de granulométries pour la construction en pisé.....297
Figure 112 : Densité bâtie en pisé relativement au bâti OSM en France hexagonale, par classe de texture du sol. Comparaison avec les recommandations sur la granulométrie du sol pour bâtir en pisé relevées par Gomes et al. (2014): Walker et al. (2005) (bleu foncé), Houben & Guillaud (2006) (vert clair), Houben & Guillaud (1994) (bleu clair). Bâti pisé issu de transects. Données pédologiques : a. vecteur-STU, b. GSM......298
Figure 113: Composition pédologique des sols alentours du village de Haget, en limite du Gers avec les Hautes-Pyrennées.....304
Figure 114 : Distribution des propriétés cibles identifiées le long du cycle de vie de la terre dans la construction en terre-chanvre, et propriétés de prédiction correspondantes.....323
Figure 115: Comparaison de la distribution cumulée des volumes des horizons de DoneSol3 Bretagne et de sa dérivée (répartition des volumes) avec les plages de variations des seuils des proxies.....329
Figure 116 : Résultats de l'analyse de sensibilité de Monte Carlo. Les résultats des 10 000 exécutions du modèle ont été représentés sous forme de points colorés transparents en arrière-plan. 331
Figure 117 : Projection cartographique du potentiel de convenance des sols de Bretagne : a. épaisseur convenable ; b. ressource en sol convenable pour la construction en terre allégée, relativement aux besoins estimés des communes.....333

Figure 118 : Evolution des volumes extraits (tirets noirs), réemployés pour l'isolation de l'existant (tirets gris), réemployés pour la construction neuve (pointillé gris) dans un scénario maximisant le réemploi de la terre excavée considérée convenable pour la construction en terre allégée sur une période de 10 ans.....334
Figure 119 : Carte représentant la surface de sols supposés convenables pour la bauge en Bretagne. Réalisée à partir de statistiques sur les sols employés dans le patrimoine bâti, la convenance est projetée sur les SMU DoneSol3. La zone de distribution du patrimoine vernaculaire bâti en bauge est également représentée (Hamard et al. 2018)......337
Figure 120 : Résumé graphique de la méthode d'évaluation de la ressource convenable pour construire en terre allégée (Verron-Guillemot et al. 2022)......343
Figure 121: Représentation des catégories de production de travail. Le travail financièrement rémunéré est la seule « économie visible » mais ne représente qu'une fraction du travail global. Le reste des catégories appartient à l'économie « invisible ». [CC BY 4.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=116956924].....351

Index des tableaux

Tableau 1 : Limites dimensionnelles des classes granulométriques en fonction des classifications (Vinceslas 2019, issu de Briaud 2013 et Lark & Budiman 2009).....90
Tableau 2 : Consistance des mélanges de terre crue: caractérisation des états hydriques, et propriétés associées..... 108
Tableau 3 : Résultat du croisement spatial entre la localisation des bâtiments en terre crue et la lithologie sous-jacente aux bâtiments. Adapté de (Mileto et al. 2019).....140
Tableau 4 : Résultat du croisement spatial entre la technique de remplissage des pans de bois et la lithologie sous-jacente. Adapté de (Hueto-Escobar et al. 2022)......142
Tableau 5 : facteurs d'influence « environnementaux » théoriques sur le choix des techniques de construction vernaculaire. +/-: le facteur est favorable/défavorable à la technique. 164
Tableau 6 : Facteurs d'influence sur les choix techniques liés au contexte urbain. 175
Tableau 7: Référentiels Régionaux Pédologiques au format DoneSol3 obtenus pour cette étude...183
Tableau 8: Sources de données décrivant le bâti terre géolocalisé agrégées pour cette étude.....192
Tableau 9 : Propriétés cibles et critères associés, propriétés de prédictions et seuils associés, plages de variation des seuils.....324
Tableau 10: Coefficients de corrélation de Pearson des proxies issus de la base de données DoneSol3..... 326

Merci

A celleux qui m’ont soutenu dans ce temps de recherche. Ce travail est aussi le vôtre…

Les terreux.ses, de près où de loin, qui m’ont accueilli dans leurs mondes. Grâce à vous, une curiosité s’est changée en combat passionné.

Les chercheur.euses, de métier ou non, qui m’ont guidé et encouragé lorsque je n’avais plus confiance en moi ou en nos recherches. Heureusement, j’ai toujours eu confiance en vous.

Les doctorant.es, avec qui j’ai pu partager les joies et les peines de ce micro-statut social très particulier, étudiant-travailleur, cadre-précaire, employé-indépendant… Aux lecteur.ices qui s’identifient doctorant.es, bon courage !

Au petit groupe de copaines qui croisent ces trois catégories, merci. J’espère continuer d’explorer ce monde à vos côtés.

Merci aux ami.es et voisin.es qui donnent des couleurs aux plus anodins des moments quotidiens. Une source permanente et généreuse d’inspiration, d’énergie, de sens.

Merci à ma famille, qui fait le socle de tous mes projets de vie. Je suis fier de vous et de vos engagements.

Merci à celle qui m’a donné la main pour passer les plus gros obstacles. J’admire ta force et ta résilience. Je serai aussi là pour toi, quand tu le souhaiteras, toujours.

Avant-propos : situation particulière et objectifs de travail



1 Un récit autour de ce projet de thèse

C'est à l'été 2017 que je me suis éveillé, sorti assez brutalement du sommeil de mon adolescence insouciante par un premier souci significatif à mes yeux. J'étais jusqu'alors porté par une trajectoire scolaire passive, visant à m' « ouvrir des portes ». En plein milieu d'un stage en start-up-greenwashing sur le thème de la végétalisation des bâtiments dans les bureaux de Vinci Construction, l'éveil fut sonné par les mots « effondrement », « écosystèmes », « climat », prononcés par les réveilleurs à la mode sur le média en ligne Thinkerview : Pablo Servigne, Jean-Marc Jancovicci. L'année sabbatique qui suivit fut teintée par ces nouvelles préoccupations, et, le billet d'avion déjà acheté (que je commençais alors à regretter), j'eus tout juste le temps de participer à un chantier participatif paillourte en Loire-Atlantique[1], où je manipulais la terre pour la première fois. Puis, je m'élançais de l'autre côté de l'Atlantique dans un voyage qui m'introduis à la lutte communautaire et aux désastres de la « transition écologique » à l'occidentale dans un village Équatorien en proie au *méga-extractivisme** minier en participant à un programme de surveillance de la qualité de l'eau encadré par William Sacher[2]. A distance, j'observais de loin le soulèvement des Gilet Jaunes de l'autre côté de l'océan en tissant des liens entre justice sociale et environnementale. Après quelques mois en Colombie sur des chantiers participatifs à manipuler des techniques diverses et variées (bambou, bois, terre, fibres, feuilles de palmier, pierres, pneus, bouteilles et autres récup'), je m'envolais de nouveau en imaginant comment « bifurquer »[3] de ma formation agronome pour aller vers le monde de la *construction biosourcée**, que je préfère aujourd'hui nommer *construction paysanne**. Je m'engageais alors dans un master spécialisée en pédologie (sciences du sol) et rencontrais dans le même élan Erwan Hamard qui me soutint dans cette voie en me proposant un stage sur le sujet de la « convenance des terres pour la terre allégée », avec la perspective de poursuivre dans une éventuelle thèse sur ce même sujet, cette fois appliqué aux autres techniques de construction en terre crue.

Ce projet de recherche avait pour premier énoncé « Détermination de critères de convenance pour le réemploi de terres de déblais dans la construction en terre crue ». Orienté science des matériaux, ce sujet devait m'amener à définir des critères de convenance, par exemple sous forme de valeurs seuils sur des propriétés de composition ou de comportement de la terre. Me nourrissant de la réflexion de mon encadrement et des artisan.es* que j'ai pu rencontrer, j'ai rapidement compris que contrairement à ce qui était suggéré par l'état de l'art académique*, la convenance des terres dépassait la simple résistance mécanique de l'ouvrage. Dans l'article publié à l'issue du stage (Verron-Guillemot et al. 2022), c'est ce premier constat qui ressort : l'impact du matériau sur le choix technique* est impacté par toutes les étapes de mise en œuvre de la matière. Dans cet article, j'ai laissé la parole aux artisans de mon encadrement de stage dans la sélection de « seuils de convenance ». Mais progressivement, des questions récurrentes ont commencé à apparaître dans mes réflexions : au-delà de l'idée qu'une terre serait convenable ou non par nature, quels sont les paramètres qui font varier cette « convenance » ? Qu'est-ce qui explique la convenance d'une terre pour une technique ? Ou plutôt, retournant la question initiale qu'est-ce qu'une technique convenable du point de vue des constructeur.ices en constatant les propriétés de la matière à disposition ? Est-ce la pénibilité, le temps de travail, induit par celles-ci ? Y a-t-il des interactions entre les choix liés à la pénibilité, les choix liés à l'éthique de travail, les matériaux et outils à disposition, le contexte général du chantier ? Est-il réellement possible de séparer l'impact du matériau sur le choix technique du reste du contexte constructif ?

1 https://david.mercereau.info/paillourte/
2 voir notamment
3 https://www.lemonde.fr/campus/article/2023/04/25/face-a-l-urgence-ecologique-comment-les-etudiants-bifurqueurs-d-agroparistech-ont-rendu-credible-une-voie-alternative_6170880_4401467.html

Ces questionnements m'ont amené sur les chemins philosophiques et politiques de l'interaction entre techniques et société. On trouve en effet dans la littérature académique et non académique traitant de la construction en terre crue des questionnements récurrents sur les choix des techniques, qui mobilisent des notions d'éthique sociale et environnementale, d'économie et de comptabilité. J'ai suivi ces chemins dans l'espoir, forcément partiellement vain, de pouvoir définir mes critères de convenance sur une évaluation holistique des de critères de qualité des choix techniques de terre crue, tout en prenant en compte l'impact de la terre à disposition. Se tisse alors, autour d'un fil rouge de la « convenance des terres », un questionnement autour des choix techniques collectifs et individuels dans l'acte de bâtir.

2 Engagement de recherche, dépendance choisie à la société

Un projet de recherche questionnant la valeur et l'éthique des travaux d'un corps de métier dont on se détache, au moins partiellement, pour l'analyse, amène également des questions sur la pratique de la recherche elle-même.

En effet, avoir du temps pour produire de la connaissance, par exemple en étant rémunéré pour cela – en d'autres termes, être déchargé de tout ou partie de ses propres tâches de subsistance pour produire de la connaissance – peut être considéré comme un privilège (Piketty 2013:18). Ce privilège est inégalement réparti dans la société. Sortir de la recherche à temps plein pour répartir le travail* sur une partie plus représentative de la société, mieux considérer les savoirs empiriques* et vernaculaires*, sont des pistes de réappropriation des savoirs[4]. La rencontre avec des artisan.es qui participent à la production, synthèse et/ou diffusion de savoirs tout en pratiquant des travaux manuels comme activité plus ou moins principale m'a permis de percevoir des formes de recherche très démocratiques et proches des besoins du « terrain », dont l'ancrage dans les rythmes du travail participe à la maîtrise des enjeux engagés dans les connaissances produites. Bâtir l'été, écrire l'hiver : comme pour la construction en terre et la subsistance en général, irons-nous vers une saisonnalité de la recherche ?

En attendant une meilleure répartition des productions de savoirs, cette situation impose aux chercheur.euses un devoir moral de pertinence sociétale* dans leurs recherches. Sur l'exemple des sciences économiques, soit « l'analyse de la répartition des richesses », Thomas Piketty espère ne jamais voir « la démocratie [...] remplacée par la république des experts ». En effet, il souligne « l'imperfection » des connaissances produites, qui « aura toujours cette dimension éminemment subjective et psychologique, irréductiblement politique et conflictuelle, qu'aucune analyse prétendument scientifique ne saurait apaiser » (Piketty 2013:17). C'est également l'avis de philosophes des techniques comme Ivan Illich ou de l'écoféministe Geneviève Pruvost, qui mettent plus généralement en garde contre le déploiement rampant de la « république des experts » (Illich 1973) qui sous couvert de puissance et d'efficacité dans l'action, dépossèdent finalement les individus de leurs propres pouvoir d'agir (Pruvost 2021b). Tout porte à croire que la recherche n'échappe pas à cette catégorie : l'éloignement académique peut entraîner une déconnexion des enjeux de la société au profit d'enjeux de classe et délégitimise chacun.e de produire la connaissance nécessaire à sa propre quotidienneté.

L'orientation des politiques de recherche par la société elle-même est souhaitable afin de répondre aux problématiques qui lui apparaissent prioritaires. Ce, d'autant plus en contexte d'urgence écologique où il ne s'agit plus seulement de produire de la connaissance pour le « Progrès » en tant qu'objectif

4 Voir l'appel de Reprises de Savoirs à l'adresse https://www.reprisesdesavoirs.org/lappel/

transcendantal (Berlan 2021), mais des savoirs pertinents permettant aux sociétés de vivre ces changements le plus sereinement possible. L'association Sciences Citoyennes a notamment développé le concept de Conventions Citoyennes[5]. Ce sont des assemblées de citoyen.nes tiré.es au sort parmi un lot de volontaires qui pourront débattre afin de répondre collectivement à une ou des questions de société. Afin de permettre l'élaboration de décisions libres et éclairées, iels bénéficieront d'un cadre d'accueil (ex : espaces-temps de réflexion défrayés), d'accompagnement à la prise de décision (ex : animateur.ices de temps forts), et notamment de l'accompagnement de chercheur.euses spécialisées sur les sujets concernés. Un exemple célèbre est celui de la Convention Citoyenne pour le Climat[6] (CCC). Cette expérience politique a montré, d'une part, la capacité de personnes initialement peu « sachant.es » sur des sujets politiques à s'en emparer et décider collectivement de solutions radicales (au regard du paysage politique actuel) et adaptées à la situation. D'autre part, elle a montré l'incapacité du gouvernement alors en place à respecter ses promesses et adopter les mesures préconisées[7]. Les habitant.es non expertes sont compétent.es pour prendre des décisions sur les orientations de société et de recherche ; mais le système gouvernemental français actuel n'est pas adapté à ce type d'outils de démocratie directe.

C'est dans le cadre d'assemblées citoyennes que l'association Sciences Citoyennes a proposé le rapport Horizon Terre (Horizon TERRE 2021), répondant par une proposition alternative au plan de recherche européen 2021-2027, intitulé « Horizon Europe », qui « continue de mettre la recherche scientifique au service de la croissance économique ».

On peut faire le parallèle avec la CCC par la pertinence des propositions de recherche de ce rapport, et le constat de l'incapacité des organismes de décision des politiques de recherche à bifurquer vers une production de connaissances répondant aux urgences sociétales.

Voici une liste extraite des propositions issues du rapport à laquelle ce travail de thèse pourra peut-être apporter des éléments de réponse/de débat.

> « **Propositions de recherche - Bloc 7 : Reterritorialiser les moyens de production pour des territoires autonomes**
>
> […]
>
> - Quelles sont les échelles de relocalisation de production appropriées ? Entre l'artisanat et l'industrie massive par exemple, y a-t-il des voies à explorer dans les modes et les organisations de production ?
>
> - Quelle place donner aux innovations dites « low-tech », c'est-à-dire réalisables à partir de matériaux et outils relativement simples et accessibles, et en favorisant le développement d'un savoir-faire accessible au plus grand nombre ? Quel est leur potentiel pour réduire les flux de matériaux et d'énergie entre territoires en permettant une relocalisation de la production ?
>
> **Propositions de recherches - Bloc 8 : Territoires durables et préservation des milieux**

5 https://sciencescitoyennes.org/conventions-citoyennes/
6 https://www.conventioncitoyennepourleclimat.fr/
7 https://reporterre.net/Convention-pour-le-climat-seules-10-des-propositions-ont-ete-reprises-par-le-gouvernement

- Évaluer les pistes techniques et sociales pour rendre les métropoles plus soutenables et autonomes d'un point de vue environnemental et humain.

[…]

c. Créer de l'emploi de qualité en promouvant l'habitat écologique

Aujourd'hui certains États membres comme la France manquent d'artisans, tout particulièrement pour l'émergence de filières utilisant des matériaux sains et « naturels », souhaités par les consommateurs. Ainsi, des techniques historiques très répandues ne comptent aujourd'hui qu'un nombre réduit d'actifs : le couverture en chaume était majoritaire en France au milieu du 19e siècle. Il ne reste aujourd'hui qu'une centaine de chaumiers sur le territoire national. Les poêles de masse sont particulièrement efficaces énergétiquement mais ne comptent que quelques dizaines de professionnels. La construction en terre a été un temps très répandue et de nombreux bâtiments sont appréciés et encore en usage, sans qu'il y ait aujourd'hui un nombre de professionnels suffisant pour entretenir et développer ce mode constructif. Le faible nombre d'artisans induit que leur niveau individuel de savoir-faire décline (par manque d'échanges, d'innovation et d'émulation) et qu'une partie des savoirs est perdue à chaque (non-)renouvellement générationnel. Les savoir-faire sont un patrimoine vivant à sauvegarder.

[…]

Propositions de recherches - Bloc 11 :

- Un axe de recherche pourrait porter sur rechercher et lister les actions pour favoriser l'« intensité sociale » du secteur du bâtiment, c'est-à-dire le nombre d'heures de travail par euro investi. Cela permettrait des réalisations plus proches des besoins des habitants, plus esthétiques et plus saines. [...]

- Comment réduire les consommations énergétiques (dont l'énergie grise) en matière d'habitat ? (L'Allemagne a opté il y a plusieurs années pour une stratégie de réduction de 80% des besoins en chaleur de l'habitat).

- Comment favoriser la déconstruction, le tri, la réutilisation et le recyclage des matériaux du bâtiment ? Comment promouvoir les matériaux qui permettent un retour à la terre sans déchets ? Ce point est à prioriser car le secteur de la construction (BTP) génère 80% des tonnages des déchets en France.

Bloc 39 – [implications de l'usage de matériaux biosourcés]

- Qualité ? Quels matériaux biosourcés pourraient remplacer des matériaux chimiques/minéraux ? Les matériaux biosourcés sont souvent appréciés par les usagers au niveau de la régulation hydrique, thermique, ou encore esthétique. Quels gains de qualité grâce à l'emploi de ces matériaux ? Ils demandent souvent en revanche un temps

> de travail et un niveau de savoir-faire plus élevé de la part des praticiens. Quelle augmentation de la quantité de travail humain (agricole et artisanal), de la qualité des emplois, et de création d'emploi impliquent-ils ?
>
> - Jusqu'en 1950 le bâti a fait appel pour une large part à la mise en œuvre de matériaux relativement bruts et disponibles localement (terre, pierre, bois, fibres...). Cela permet dans toutes les régions du monde l'élaboration de bâtiments de grandes hauteurs (même dans le cas de la terre crue). C'est ce qui a permis l'émergence d'un patrimoine bâti diversifié. Au 21e siècle, quelles filières de matériaux biosourcés pourraient être déployées sur chaque territoire ? Quelles incitations économiques ou administratives et actions de formation et de communication pour redémarrer les filières ? Quels domaines de pertinence pour chaque matériau ? Quels types d'habitat adapté selon les matériaux locaux et leurs propriétés ? Quels besoins de constructions neuves ou de rénovations en cas d'exode urbain et d'accueil des migrations climatiques ? »

Les matériaux naturels, dont la terre crue, occupent une place centrale dans les questionnements de ces propositions de recherches. Il ne fait aucun doute que les travaux de recherche sur le sujet de la terre crue participent à répondre à ces problématiques. On soulignera cependant quelques nuances qui nous ont orienté dans ce travail vers certaines approches plutôt que d'autres :

- l'adaptation des techniques au contexte local, notamment, aux ressources* disponibles ;

- la diversification des critères de performance des matériaux ;

- l'exploration des potentiels des techniques « low-tech »*, au moins aussi importante que celles de techniques industrielles* ;

- l'évaluation des besoins à venir ;

- des considérations économiques, en terme de rendements de production pour faire face aux besoins à venir.

3 Savoirs situés

3.1 Objectivité

Face à l'intensification des inégalités sociétales et des destructions environnementales, et dans un contexte global de prise de conscience sociétale, un nombre croissant de personnes, issus du milieu académique ou non, questionnent la capacité du système global de recherche académique à y répondre **de manière adéquate** et **dans les temps impartis**. Un mouvement de « (re)questionnement de la place de la recherche et des chercheur.euses dans la société » (Pelé-Peltier 2023:7) est en cours.

En effet, la production de connaissance scientifique n'est jamais purement objective, car tout acteur.ice de la recherche observe le monde avec sa propre construction sociale et ses valeurs, par exemple, sa propre perspective des directions que devrait ou non prendre son champ disciplinaire, la recherche académique en général, ou la société. De plus, la vision universaliste des sciences modernes amène à standardiser les manières de voir le monde, standards basés sur le point de vue dominant du moment. Ainsi, les connaissances produites participent à perpétuer les dominations en instaurant une « réalité » qui ne représente que celle des positions dominantes (Haraway 1988). Le concept de « savoirs situés » est introduit par des chercheuses féministes de la fin du 20^{e} siècle comme Donna

Haraway en 1988. Haraway nomme « perspectives partielles » les visions de chacun.e de la situation, car aucune production de savoir n'est exempte de perspectives « en dehors de la réalité ». Situer une production de connaissance consiste en la conscientisation et la déclaration de ces « perspectives partielles », des producteur.ices de savoirs et de l'impact potentiel sur les connaissances produites.

3.2 Visibilisation

Le concept de *savoirs situés* peut alors être mobilisé pour visibiliser une partie des influences significatives qui orientent les travaux de recherche de chacun.e.

Éventuellement, cette visibilisation permet aux individus de réduire ces influences, ou aux personnes utilisant les connaissances produites d'en avoir connaissance pour les prendre en compte. Situer sa production de connaissance est alors un gage de rigueur et de qualité scientifique (Haraway 1988).

Ainsi, les chercheur.euses se définissant comme « engagé.es » ne sont pas nécessairement plus « biaisés » que celleux qui se disent « apolitiques » ou « objectifs », car au final ce qui les distingue n'est pas l'intensité de l'impact de leurs valeurs sur leurs travaux mais seulement l'explicitation de ces valeurs (Fragnière, 2022, p. 25, dans (Pelé-Peltier 2023)). Être conscient de son absence de neutralité permet au contraire d'améliorer son objectivité : on voit désormais la différence entre ces deux notions :

> « Plus un scientifique se pense neutre […], plus il risque au contraire d'être inconscient de son manque de neutralité. Plus, au contraire, on est conscient de son absence de neutralité, plus il devient possible d'être vigilant aux biais sociaux et cognitifs qui peuvent orienter le jugement. » (Pereira 2021)

3.3 Impartialité

L'absence de neutralité n'est pas incompatible avec l'impartialité scientifique. On distingue trois définitions de l'impartialité :

> « 1. Impartialité comme **absence de contenu normatif**. Une discussion est impartiale si et seulement si les délibérants **ne font intervenir aucune conception** du bien ou de la justice lors de leurs échanges.
>
> 2. Impartialité comme **absence de parti pris**. Une discussion est impartiale si et seulement si les délibérants **ne sont pas biaisés en faveur d'une conception** du bien ou de la justice.
>
> 3. Impartialité comme **absence d'exclusion**. Une discussion est impartiale si et seulement si **le cadre délibératif n'exclut d'emblée aucune conception** du bien ou de la justice. » (Daoust 2018:17)

La première définition est celle employée par les positivistes, qui défendent la possibilité d'une production scientifique sans influence des producteur.ices. Cette définition n'est pas compatible avec la conception d'une production de savoirs « situés » qui justement, indiquent le caractère systématiquement normé des productions scientifiques. Cependant, situer les savoirs permet de réduire la prise de parti en prenant conscience de ses propres conceptions du bien et de la justice, ou au moins de les visibiliser pour que les utilisateur.ices de ces connaissances puissent s'extraire de cette prise de parti. Ce qui est compatible avec la seconde proposition, l'impartialité comme absence de

parti pris, ou avec la troisième, car si le parti pris est un parti pris minoritaire, il apporte de la diversité qui permet justement de réduire la partialité du débat.

Il convient alors à chacun.e de « reconnaître, examiner et comprendre l'influence de ses propres origines sociales, localisation, et supposition pouvant affecter ses pratiques de recherche.

3.4 Génie civil ?

Si le concept de savoirs situés est couramment employé dans les disciplines dites des « sciences humaines et sociales »* (SHS), l'influence de la situation sur la production de connaissances concerne également les sciences dites « naturelles »* et a été employé dans divers champs disciplinaires (NagyHesse-Biber, 2012, p. 47, dans (Pelé-Peltier 2023)), et notamment en Génie Civil (Pelé-Peltier 2023).

Dans le cadre de ce travail de thèse, nous avons cherché à visibiliser des points de vue qui nous semblaient minoritaires dans le champ académique de la construction en terre crue. Notamment, il nous est apparu que les informations disponibles dans la recherche académique relative à la construction en terre sont souvent orientées par des positions très enthousiastes à l'idée de la technologisation et de l'industrialisation de la filière terre crue (Pelé-Peltier 2023). Les points de vues valorisant la réappropriation de l'acte de bâtir par le déploiement de modes constructif autonomisants* et frugaux sont bien moins visibles.

De ce fait, nous avons choisi de mobiliser des formes de savoirs non issus de la production académique : témoignages de constructeur.ices, documents techniques ou travaux journalistiques. Les constructeur.ices terre crue, souvent très engagé.es dans la réappropriation des savoirs vernaculaires*, ont par ces biais apporté cette position qui a pu renforcer ou remplacer les informations académiques insuffisantes sur certains sujets. C'est le cas de la description des interactions entre procédés de mise en œuvre et propriétés de la terre, insuffisamment documentées au-delà des procédés sollicitant des machines : machines relativement simples comme les presses à briques de terre comprimées, jusqu'aux procédés high-tech comme l'impression 3D ou la terre coulée (Chapitre 2, 6).

Réaliser des recherches dans une discipline scientifique en étant initialement situé « en dehors » de la discipline permet de visibiliser les valeurs, intérêts, et considérations existantes dans un domaine, notamment lorsqu'elles sont partagées par la majorité des personnes de ce domaine (NagyHesse-Biber 2012, dans (Pelé-Peltier 2023)). C'est pourquoi l'exploration de travaux relevant de la sociologie et de l'histoire des techniques a permis de prendre du recul relativement aux positions situées fréquemment rencontrées dans le champ du Génie Civil.

3.5 Positionnements

Un des objectifs de ce travail est d'aller plus loin que la « déclaration de valeurs » proposée dans le cadre de la recherche située, non seulement en explicitant ces valeurs mais également en les justifiant lorsque possible par de la littérature scientifique interdisciplinaire. C'est à cette fin que la première partie de contextualisation introduit des concepts permettant de comprendre le cadre du travail qui suit. En intégrant notre point de vue situé dans la contextualisation des problématiques sociétales, nous chercherons à montrer la situation telle que nous la voyons et de justifier les solutions que nous envisageons. Nous espérons ainsi situer ce travail dans un contexte suffisamment complet, pour (1) nous permettre de conscientiser une partie des constructions sociales personnelles ayant pu orienter nos travaux; (2) permettre à toutes et tous de considérer nos conclusions dans la situation de leur

production et (3) convaincre de la pertinence des orientations que nous suggérons pour la (re)mise en place de manières d'habiter justes, solidaires, durables et diversifiées.

Cependant, précisons dès à présent notre positionnement au sein de la « filière terre crue ». L'analyse de la composition sociale du champ de la construction en terre par Villain (2020), reprise dans l'analyse de l'état de l'offre de formation la construction en terre crue commandée par la Confédération de la Construction en Terre Crue (CCTC 2023) nous aide dans cette approche pour identifier notre propre situation. Dans une position de chercheur.eues académiques, nous considérons notre approche comme à visée « holistique », c'est à dire visant « à diminuer l'impact écologique de la construction pour répondre à une urgence écologique » tout en refusant « de privilégier un objectif ou un critère de performance environnementale » (CCTC 2023). Ainsi, nous traversons une phase de remise en question d'« une vision de l'homme comme maître et possesseur de la nature » et nous cherchons à « développer une nouvelle éthique » (CCTC 2023) en rapport avec ces valeurs.

Nous nous opposons à une vision « réductionniste » qui « réduit les enjeux environnementaux à celui de l'énergie et se focalise sur la consommation énergétique lors de l'exploitation des bâtiments, en comptant sur la science et la technique pour résoudre les situations de pénurie énergétique et de dégradation du climat » (CCTC 2023).

Par ailleurs, notre questionnement sur l'impact écologique de la construction nous a amené à considérer comme aussi importante si ce n'est plus la question des dominations économiques, patriarcales et ethniques dans le refus de la prolongation d'un néo-colonialisme global. Nous affirmons que ces considérations sont liées, car comme le suggère le groupe Marcuse :

> « **Si nous avons besoin de cinq planètes pour maintenir notre niveau de vie, c'est en fait parce que nous avons des dizaines voire des centaines de personnes à notre service**. Notre mode de vie n'est libre que si l'on considère, à la manière du régime politique imaginé par Georges Orwell, dans son roman d'anticipation 1984, que « la liberté, c'est l'esclavage ». » (Groupe Marcuse 2010, dans (Berlan 2021:12))

Ce qui relie ces problématiques, c'est « une relation de dépendance basée sur la violence, la production de marchandises et la circulation de l'argent » (Maria Mies 2022). Finalement, notre positionnement se rapproche probablement de celui des écoféministes de subsistance (Mies 2005; Pruvost 2021b).

4 Notes de formes sur le corps de texte

4.1 Langage à visée inclusive

Dans l'écriture de ce manuscrit nous avons cherché à employer autant que possible l'écriture inclusive. Celle-ci permet en effet de ne pas invisibiliser la présence d'actrices dans le champ académique et artisanal de la construction en terre crue. Nous pensons qu'il serait dommage d'invisibiliser les quasi-parité des femmes dans les métiers de la construction en terre crue (CCTC 2023), qui fait figure d'exception dans le secteur du BTP (Jounin 2008). Nous avons choisi une forme d'écriture qui nous semblait favoriser la clarté de lecture, quitte à féminiser les pluriels dans la plupart des cas. Un compromis approximatif, donc bien évidemment sans prétention d'exemplarité.

4.2 Citations indirectes

Dans la recherche de la source de l'information originale citée dans certains travaux de recherche, nous avons constaté que de nombreuses informations sont reprises « en chaîne » (citations de

citations). Par exemple, Rojat et al. (2020) indiquent que la moitié des déchets de l'Union Européenne provient du secteur de la construction. Retrouver cette information a nécessité d'arpenter 3 autres articles pour obtenir la référence initiale: le site d'une association d'entreprises de recyclage du BTP[8]. L'information est désormais introuvable sur le site, et on peut douter de la fiabilité d'une information provenant de ce type de source.

Remonter cette chaîne est parfois très chronophage et ne permet pas toujours de retrouver la source initiale. On peut comprendre que chacun.e ne le fasse pas pour l'intégralité des informations citées, ce qui prendrait un temps considérable. Comme beaucoup, nous nous reposons également sur la confiance dans le travail d'investigation des autres chercheur.euses. Cependant, nous pensons que lorsque nous ne vérifions pas l'information, cela doit être visibilisé afin d'éviter d'accumuler les réinterprétations successives des idées initiales qui pourraient les déformer. Pour participer à cet effort à notre échelle, lorsque la source initiale n'a pas été investiguée faute de temps ou d'accès au document, nous préciserons la référence depuis la quelle nous reprenons directement l'information, au format : (*référence initiale*, dans *référence reprise*).

4.3 Formes de savoirs : littérature blanche, grise et entretiens-discussions

Même si elle se déploie désormais à un rythme soutenu (Pelé-Peltier 2023:84), la littérature académique relative à la construction en terre crue n'est pas abondante. Dans la diversité des techniques et usages autour du travail de ce matériau, les sources écrites de savoirs sont dispersées et de formats divers (Rattier 2024), et notamment de nombreuses connaissances empiriques n'ont pas été traduites sous forme de documents académiques. Dans la présente recherche, de nombreuses informations n'ont pas pu être obtenues via des publications dans des revues à comité de lecture. Ainsi, des documents correspondant à ce qu'on appelle généralement de la « littérature grise » ont été arpentés: thèses, rapports d'institutions, enquêtes journalistiques, *etc*.. D'autre part, des entretiens-discussions avec des expert.es de la construction en terre crue ont été mobilisés pour référencer certaines idées. Certains sont des entretiens longs réalisés au cours du travail de thèse («Bosi» 2022; «Dugelay» 2022a, 2022b), mais nous mobilisons parfois également les notes issues de discussions plus informelles avec d'autres expert.es. Enfin, plusieurs entretiens issus de retranscriptions publiquement disponibles sont également mobilisés (Dycha 2021; Marcom & Pruvost 2021; Rinino 2021b).

Les deux entretiens long format (2-3h) («Bosi» 2022; «Dugelay» 2022b, 2022a) peuvent être considérés semi directifs, car certaines questions préparées visaient à obtenir des informations précises sur les gestes et usages dans la mise en œuvre de la terre crue et le rapport avec les propriétés de la terre, mais laissaient un champ libre à des digressions sur le sujet du choix des techniques de construction. Les deux personnes choisies pour ces entretiens sont des experts de la construction en terre crue ayant pratiqué l'ensemble des techniques-types* étudiées dans ce travail (pisé, bauge, adobes, torchis) (Contexte, 2.3). Ils ont par ailleurs exercé dans différents contextes pédogénétiques, se confrontant à des qualités de terre variées. Nous mobilisons parfois également les notes issu d'échanges plus informels («Cornu» & «Dugelay» 2022; «Marcom» 2022). Les informations issues des entretiens-discussion sont essentiellement des description techniques des gestes et usages. Elles relèvent donc d'un savoir-faire acquis par l'expérience donc situé. D'autre part, les personnes rencontrées s'inscrivent toutes deux publiquement dans des dynamiques de partage de savoir-faire et de compétences. Pour ces raisons, nous avons choisi de divulguer les noms des personnes après s'être assurés de leur consentement éclairé.

8 https://www.cdrecycling.org/

L'usage de cette diversité de sources d'informations non conventionnelles dans une thèse de génie civil soulève quelques questions. La distinction entre littérature « blanche » et « grise » suppose que les informations provenant d'articles publiés dans des revues à comité de lecture sont plus fiables que celles des autres sources d'informations. Or, nous avons constaté que de nombreux documents de la littérature grise reposaient sur une rigueur de réflexion convenable, tandis qu'à l'inverse, il est courant de rencontrer des articles de revues à comité de lecture dont la qualité est douteuse. Cela peut s'expliquer par un contexte de publication scientifique peu favorable à la qualité : course à la publication, multiplication des revues à but lucratif, ou encore présence de biais situés pouvant être partagés dans l'ensemble d'un champ disciplinaire (3). Ainsi comme le suggère Schöpfel (2015), nous pensons que « la collecte, exploitation et diffusion des sources et ressources de la documentation grise doivent faire l'objet de la même évaluation critique que n'importe quelle autre catégorie d'information ni plus, ni moins ». Supposant alors que la qualité de l'information ne peut être définie seulement par sa catégorie, nous laissons aux lecteur.ices le soin d'en vérifier l'origine si nécessaire dans la bibliographie de cet ouvrage (Bibliographie) et nous ne différencierons pas les littératures blanches et grises dans le format des références citées au cœur du texte.

En revanche, nous distinguerons dans le texte les informations issues de retranscriptions d'entretiens oraux. Le nom des interviewées sera indiqué entre guillemets, et la source de la publication sera précisée ensuite lorsqu'il ne s'agit pas d'un entretien produit spécifiquement pour cette thèse (p. ex. ("Dugelay" 2022), ("Lara Davis" 2020, dans Dycha 2021)).

Contexte : éco-construire ? Encore construire ?



Vue aérienne de Saint-Sébastien-sur-Loire, commune limitrophe de Nantes. ©Géoportail

Résumé :

La science est l'un des piliers du développement techno-capitaliste. Dans la remise en question de ce modèle sociétal, il nous est apparu indispensable de contextualiser ce travail de recherche. Nous espérons ainsi éviter qu'il alimente des dynamiques sociétales* néfastes.

La première question est celle des besoins. Pourquoi construisons-nous, et quels sont les besoins de construction ? Le partage de l'existant et l'importance de la réhabilitation sont explorés. La seconde est la place de la construction en terre crue au cœur des besoins actuels et futurs. Ce matériau est souvent supposé devoir concurrencer les matériaux conventionnels* comme le béton de ciment. Cette perspective engendre un objectif de rationalisation* voir d'industrialisation qui pourrait faire perdre tout ou partie des bénéfices sociétaux des procédés artisanaux*. Il est nécessaire de considérer des facteurs plus holistiques que les calculs financiers et d'émissions de GES, et intégrer des variables sociales et environnementales. Notamment, la récupération marketing de l'emploi de la terre crue (« écobrunissement ») engendre des effets rebonds* souvent incalculables mais non négligeables.

Les procédés artisanaux de petite échelle font cependant face à des blocages systémiques. La variabilité du matériau terre le rend incompatible avec les fonctionnements du BTP conventionnel* contemporain, dimensionnés pour l'emploi de matériaux fabriqués en série. Comment garantir les propriétés de résistance d'éléments de terre crue de composition variable ? Les propriétés de composition de la terre (granulométrie, minéralogie) sont elles adéquates, et quels modèles employer ? Dans les régions où le patrimoine historique est abondant, il est aisé de savoir quelles techniques sont possibles. En revanche, hors de ces territoires, comment savoir si les sols sont adaptés aux différentes techniques de construction en terre crue ?

1 Construire : constats et perspectives pour le secteur de la construction

Après un demi-siècle d'absence des pratiques constructives, la construction en terre crue se redéploie aujourd'hui au sein d'un système industrialisé de production de bâtiments. Ce regain d'intérêt est en grande partie lié au fait que les techniques de terre crue représentent une alternative potentielle aux mises en œuvre de matériaux industriels* et à leurs impacts sociaux et environnementaux dévastateurs pour le vivant (Pelé-Peltier 2023).

Le système industriel de production de logements est en effet intimement lié aux matériaux qu'il mobilise. Cadence, puissance, homogénéité et production en série caractérisent les procédés de fabrication et de mise en œuvre des éléments. Les intrants de travail, d'énergie externe* et de matière demandés dans ces procédés participent à l'exploitation d'individus par les autres, et de l'humanité sur les écosystèmes non humains (Mies 2005).

Pendant des millénaires, la majorité des peuples ont façonné de leur propres mains leurs habitats. Désormais, les habitant.es du Nord Global* délèguent pour la plupart d'entre elleux le bâtir à d'autres, comme par ailleurs l'essentiel de leur subsistance (alimentation, soin, production et transmission des savoirs, etc.) (Illich 1973; Berlan 2021; Pruvost 2021b). Ce *faire faire* (Berlan 2021) se déploie plus intensément que jamais dans un marché du travail mondialisé, où le bout des chaînes de production est invisibilisé par l'éloignement géographique ou de classe sociale, quand il n'est pas masqué volontairement. C'est ce que Crawford (2022, dans (Sabbah et al. 2024)) appelle l'« amnésie » dans le développement technique : l'éloignement spatio-temporel des coûts du Progrès empêche de considérer l'ensemble des enjeux des choix techniques* collectifs.

L'état des lieux des problématiques environnementales globales et plus précisément du secteur de la construction est déjà bien documenté[9]. Quelques points spécifiques doivent cependant être développés en introduction de ce travail de thèse pour en comprendre les orientations.

1.1 Quels besoins de construction ?

Les « crises du logement » sont des symptômes du dysfonctionnement du système économique global. Comment se fait-il qu'alors que l'humanité n'a jamais mobilisé autant d'énergie externe* par personne, les besoins de subsistance de toutes et tous ne soient pas satisfaits ? Pourquoi les travailleur.euses du secteur du BTP conventionnel* travaillent toute leur vie à bâtir pour d'autres, sans jamais obtenir la possibilité de construire leur propre habitat ?

La population mondiale est croissante. Mais cette croissance n'est pas équitablement répartie. Dans les pays à forte croissance démographique et où l'exode rural est intense, le nombre de logements est quantitativement insuffisant en périphérie des métropoles et mégalopoles. Tant que l'exode rural ne sera pas freiné par un ralentissement des activités néocolonialistes qui détruisent les communautés paysannes, il y aura en effet un besoin considérable de nouveaux logements chaque année pour maintenir un cadre de vie décent aux exilés. Les pays du Nord Global, en revanche, ont achevé la phase de transition démographique et la population est presque stationnaire, comme l'exode rural. Le besoin quantitatif annuel de nouveaux logements devrait être faible. Pourtant, on constate un accroissement de l'intensité du mal-logement.

La Fondation Abbé Pierre présente une estimation du nombre de personnes mal logées en France. 4,1 millions de personnes souffrent de mal-logement ou d'absence de logement personnel. Outre ces

9 Voir par exemple (Vinceslas 2019; Pelé-Peltier 2023).

situations les plus graves, 12,1 millions de personnes sont touchées à des degrés divers par la crise du logement (Fondation Abbé Pierre 2022:250).

En France métropolitaine, le nombre de personnes considérées comme « sans domicile » est estimé à 300 000 (Fondation Abbé Pierre 2022). Parmi les sans domiciles, l'INSEE et la Fondation Abbé Pierre distinguent la catégorie des « sans abri », qui concerne les personnes qui ne « disposent d'aucun lieu couvert pour se protéger des intempéries et dorment à l'extérieur (dans la rue, un jardin public…) ou dans un lieu non prévu pour l'habitation (cave, cage d'escalier, chantier, parking, centre commercial, tente, métro, gare…). » (Fondation Abbé Pierre 2022). En 2019 en France métropolitaine, le nombre de personnes sans abri était estimé à 40 000.

Les conditions de vie des sans abri sont extrêmement précaires et nombre d'entre elleux décèdent de leurs mal logement : plus de 3000 décès par an estimés entre 2012 et 2016.

La plupart des personnes sans domicile sont recensé.es dans les agglomérations de plus de 20 000 habitants. A noter que le recensement de l'INSEE ne prend pas en compte les « personnes sans domicile n'ayant pas recours aux dispositifs d'hébergement ou de restauration », ce qui invisibilise une partie d'entre elleux. D'autre part, les statistiques concernant les personnes sans abri et sans domicile sont difficiles à réaliser, et cette difficulté s'accentue du fait des « expulsions systématiques des campements [qui] repoussent les personnes toujours plus en périphérie » (Fondation Abbé Pierre 2022:114).

Le nombre de personnes sans domicile est en croissance : +58 % en moyenne entre 2001 et 2012 dans les agglomérations de plus de 20 000 habitants, avec une progression beaucoup plus importante concernant les enfants (+85 %). Au total en 2021, la population sans domicile avait probablement doublé depuis 2012, et triplé depuis 2001.

Face à une telle pression sociale, il est souvent admis que le rythme de construction de logements doit continuer à s'accélérer pour faire face à la « demande » (UNEP & YCEA 2023). Pourtant, l'INSEE recense 36,2 millions de logements en France métropolitaine, dont (3,6) millions (10 %) sont des logements secondaires ou occasionnels et 3 millions (8 %) sont considérés comme « vacants », c'est à dire qu'ils ne sont pas habités régulièrement comme les logements secondaires (INSEE 2021). Si l'on somme l'ensemble des logements vacants et secondaires, on dénombre 6,5 millions de logements non habités au moins une partie de l'année. Un gisement qui pourrait probablement participer à répondre aux besoins des non-logé.es et mal logées.

Par ailleurs, la vacance des logements progresse : de 6,7 % en 2008 à 8,2 % en 2021 dans l'hexagone (stable depuis cinq ans) (Fondation Abbé Pierre 2022:161). Soit l'équivalent de 42 000 logements supplémentaires chaque année, pour une production de 324 000 logements annuels, ce qui représente environ 13 % des logements construits chaque année (INSEE 2021) (Figure 1).

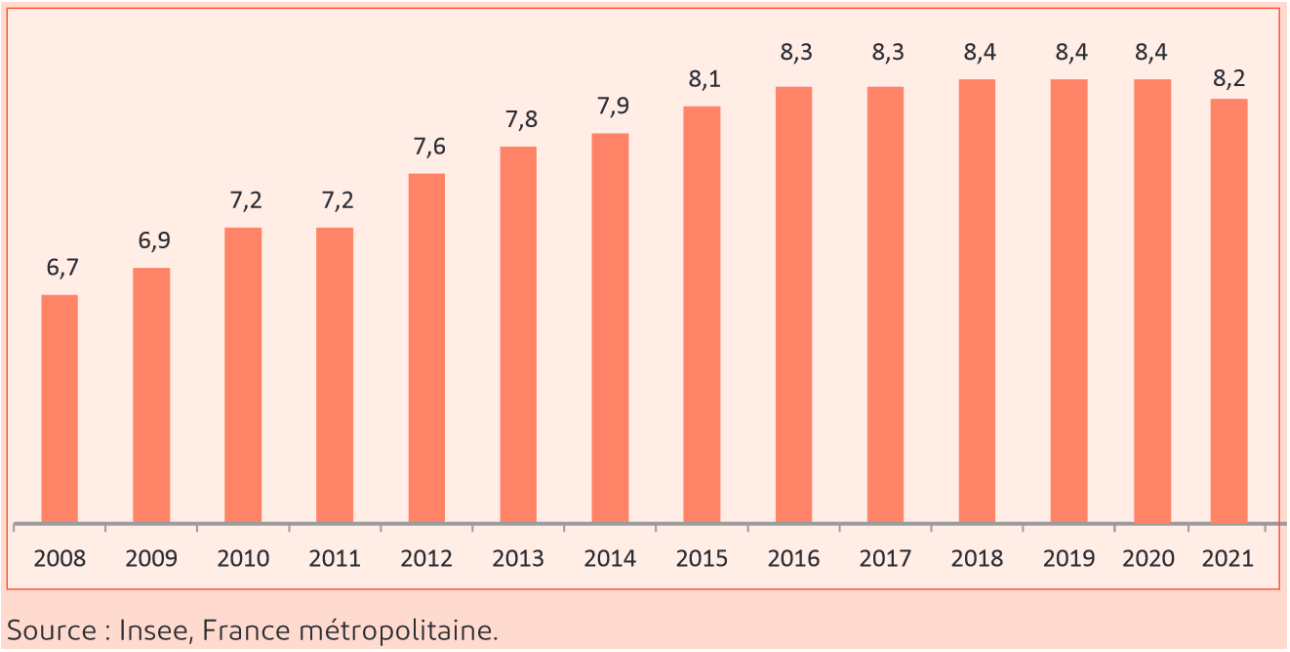


Figure 1: Evolution du taux de vacance des logements en France (% du nombre de logements) (Fondation Abbé Pierre 2022:161).

On pourrait imaginer que ce sont dans les communes rurales peu attractives que l'on trouve une plus grande proportion de logements vacants. On observe en effet que la proportion est légèrement plus faible dans les communes urbaines denses que dans les communes urbaines moyennes et les zones rurales, où l'on observe respectivement 7.6 contre 8.8 et 9.0 % de logements vacants ; mais la différence n'est pas conséquente et ne peut être expliquée que par l'adéquation entre offre et demande (Figure 2). Les logements vacants sont donc distribués sur le territoire français, quasi-proportionnellement à la densité bâtie, avec 1,2 millions d'entre eux situés dans les communes de plus de 100 000 habitants. Certains quartiers de métropoles comme Paris, Marseille ou Lille afficheraient des taux de vacance longue durée supérieurs à 10% (Leussier 2022).

En revanche, et sans surprise, les logements secondaires sont plus nombreux hors des centres urbains denses. Mais ils n'en sont pas absents non plus : 838 000 logements secondaires sont situés dans des communes urbaines denses, représentant plus de 5 % des logements dans ces zones.

Une certaine fraction de ces logements vides est considéré comme « frictionnel » : par exemple, délais de déménagement ou d'amélioration des bâtiments. Cette friction est probablement plus significative en zone tendue car les déménagements sont plus réguliers, ce qui peut nuancer le constat précédent de distribution assez homogène de logements vides entre centres urbains denses et zones rurales. Aussi, certains logements vacants sont dégradés. Malgré cela, on estime à 103 000 le nombre de logements « durablement vides et directement habitables en zone tendue » (Fondation Abbé Pierre 2022:162). Ce chiffre représente donc l'estimation basse du nombre de logements donc l'accès n'est pas lié à des contraintes techniques mais uniquement juridiques : la supériorité du droit de propriété privée par rapport aux droits au logement et à la dignité.

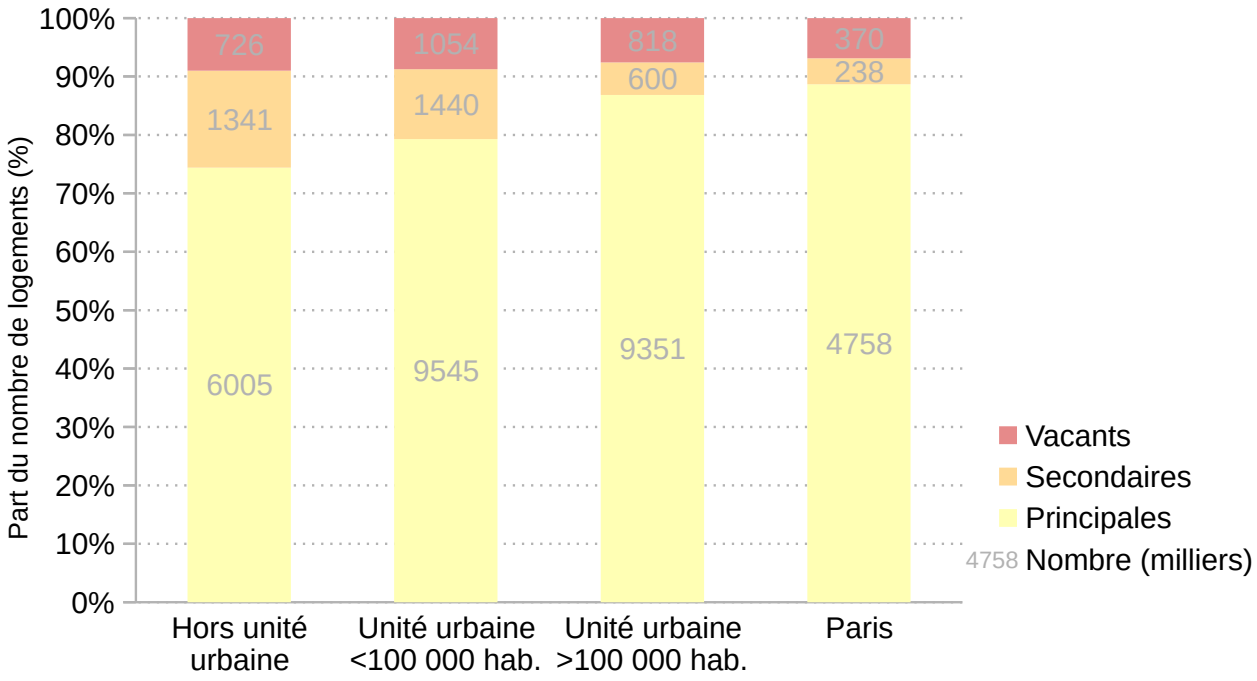


Figure 2: Proportion relative des catégories d'occupation des logements en France (données INSEE 2021).

La réponse apportée par les pouvoirs publics va dans le sens de la défense de la propriété privée. La loi DALO de 2007, en cas de squat d'une résidence principale, permet l'expulsion en quelques jours seulement et sans jugement. La loi ASAP (accélération et simplification de l'action publique) votée en 2020 étend cette procédure aux cas de squats de résidences secondaires (Fondation Abbé Pierre 2022:128). En 2024, les lois Kasbarian ont encore précarisé la situation des occupant.es illégal.es en facilitant les expulsions par la force et sans procès[10].

Ainsi, plus de 472 personnes étaient expulsées par jour en France en 2022 (certaines personnes sont expulsées plusieurs fois dans l'année) : « 64 % de ces expulsions ont eu lieu pendant la trêve hivernale [...]. Dans 91 % des cas, aucune solution n'a été proposée pour au moins une partie des personnes expulsées. » (Fondation Abbé Pierre 2022:130).

L'augmentation des prix de l'immobilier est principalement due à la spéculation mondiale sur l'immobilier, qui constitue aujourd'hui 60 % de tous les investissements en capital financier (McElroy 2019). Une situation où les propriétaires de logements vides ne sont pas incité.es à les mettre à disposition : la spéculation immobilière suffit souvent à rentabiliser la privatisation de logements, car les logements prennent spontanément et rapidement de la valeur avec le temps.

Alors, la « pénurie de logements » semble donc en grande partie fabriquée. Son origine n'est pas une défaillance dans la production mais dans la répartition du bâti. Au lieu de réguler la spéculation immobilière ou la prolifération des logements vide, les pouvoirs publiques choisissent de rassurer les multipropriétaires dans leur « crainte » de l'occupation spontanée par des personnes sans domicile.

10 https://www.ouest-france.fr/societe/logement/logement-le-nombre-dexpulsions-explose-depuis-linstauration-de-la-loi-anti-squat-652e68ba-676e-11ef-9827-8f066c8ca511

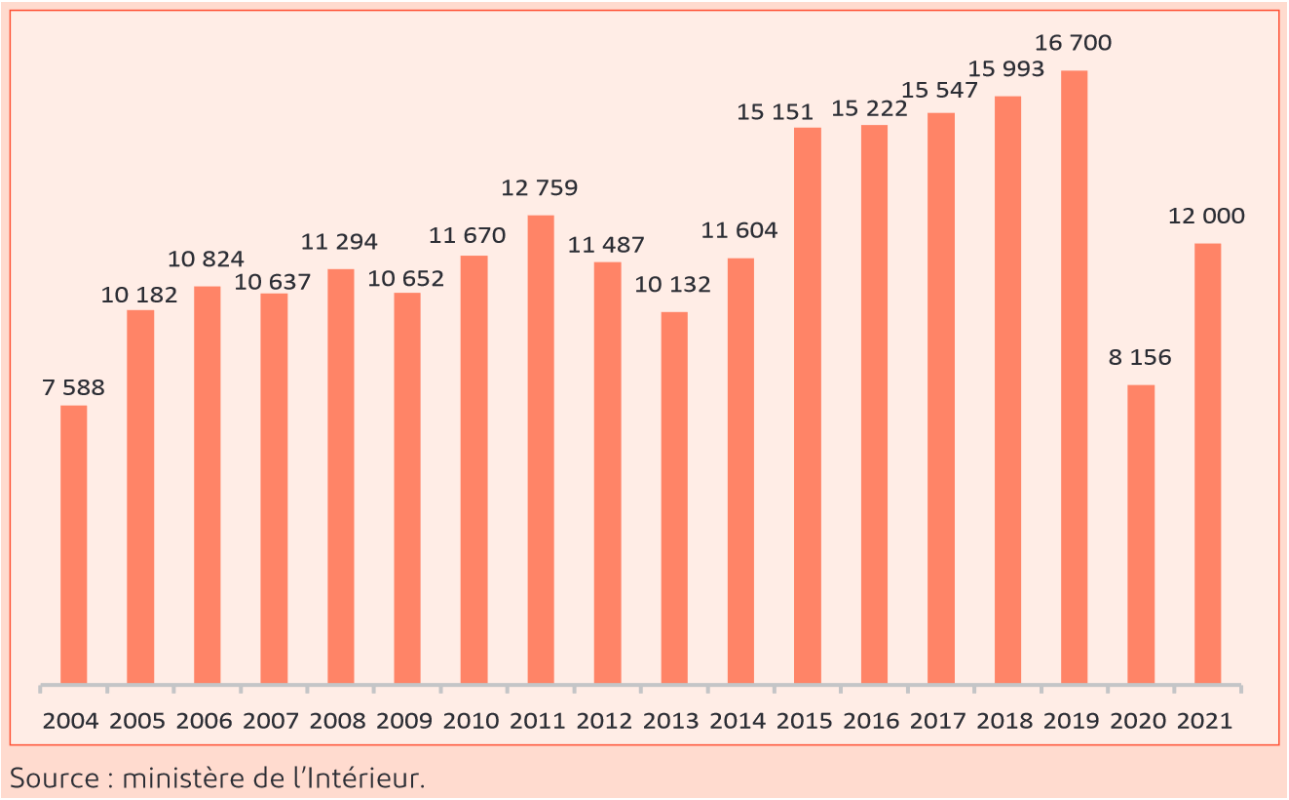


Figure 3: Expulsions locatives avec concours de la force publique. La baisse des expulsions de 2020 et 2021 est liée à la prolongation de la trêve hivernale en cours de crise sanitaire (Fondation Abbé Pierre 2022:222).

Pourtant, le gisement de logements vides représente une opportunité considérable pour les personnes les plus précaires relativement au logement. 3 millions de logements vides, dont au moins 103 000 sont immédiatement disponibles et habitables au cœur des zones tendues, pourrait suffire à réduire significativement la souffrance des 300 000 personnes sans abri.

Au delà des logements immédiatement habitables, l'ensemble des 6 millions de logements vacants et occasionnels/secondaires pourrait être mobilisé pour répondre au fond de la « crise du logement ». La vacance considérable est une première approche des alternatives à l'intensité de construction de bâtiments en France, et plus généralement dans le monde, à l'image de Dubaï, où a été construit le bâtiment le plus haut du monde (828 m) alors que 31 % du parc de bureaux est vide dans le centre ville (Peduzzi 2014). S'ajoutent aux logements vides les surfaces professionnelles inutilisées (Consortium des Bureaux de France 2024, dans (Cazi 2024)).

Le constat du potentiel d'amélioration sociale que représentent l'occupation des logements vides est partagé par l'ADEME, qui dans un scénario prospectif de réduction radicale des émissions de CO2 propose les objectifs suivants :

> « Limitation de la construction, rénovation rapide et modification d'ampleur des modes de vie :
> • Transformation de logements vacants et résidences secondaires en résidences principales
> • Réduction drastique du nombre de constructions neuves
> • Rénovation énergétique d'une ampleur inégalée
> • Mutualisation des équipements à l'échelle des lieux d'habitation » (ADEME 2021)

En pratique, ce gisement ne semble pas être considéré dans les politiques publiques liées au logement.

En revanche, s'il n'y a pas de besoin conséquent de production de logements neufs, la rénovation de l'existant représente un objectif central dans la réduction des consommations énergétiques liées au logement. La Fédération Française du Bâtiment (FFB) annonce 20 millions de logements à rénover d'ici à 2050 (Vinceslas 2019:23). À l'échelle Européenne, ce sont près de 80% des bâtiments résidentiels qui datent d'avant 1990 et consomment 90% de l'énergie consommée par l'ensemble des bâtiments résidentiels (Vinceslas 2019:22). Mais ici également, les politiques publiques sont insuffisantes, à l'image des financements de l'ANRU pour le logement social qui sont principalement adressés à de la démolition et reconstruction partielle plutôt que la rénovation. Pourtant, la rénovation est 3 à 4 fois moins chère (Linemann 2011) et consomme 40 fois moins de matériaux que la construction neuve, voir 80 fois pour le logement collectif (ADEME 2019).

Par ailleurs, la dynamique du secteur de la rénovation thermique est principalement assurée par l'emploi de matériaux industriels. L'utilisation de matériaux naturels ou recyclés pour l'isolation est peu répandue : en 2011 les laines minérales et les plastiques représentaient 93% de la part de marché mondiale de matériaux isolants (Asdrubali et al. 2015). Cependant la tendance actuelle est à la hausse : sur la période 2015-2050, la consommation totale de produits isolants biosourcés* varierait de 2,4 à 7 millions de tonnes (Mt) et celle du bois de 1,5 à 3,5 Mt, selon les scénarios (Centre d'études et de prospective du ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation 2020). Cette hausse ne garantit pas cependant que la consommation de matériaux conventionnels baisse dans le même temps car l'intensité de l'effort d'isolation doit augmenter dans les prochaines années. Les impacts socio-environnementaux au sein du cycle de vie des isolants industriels sont conséquent et peuvent rendre néfaste les opérations de réhabilitation thermique. Le lobbying des entreprises productrices de ces matériaux assure que ces impacts soient rarement considérés dans les opérations de labellisation des projets (Mootz 2023), qui paraissent alors vertueux par la faible consommation énergétique d'usage alors que c'est dans le reste du cycle de vie que les impacts sont considérables.

Il existe pourtant une grande diversité de matériaux « de cueillette* », peu transformés et locaux pouvant répondre aux besoins de rénovation hygrothermique. Par exemple, les fibres végétales (paille de céréales, foin, roseau…) sont utilisées avec succès dans la réhabilitation. Leur caractère non industriel implique un travail* sur chantier non délocalisable et peu mécanisable, donc une main d'œuvre sur site plus conséquente. Ces techniques « paysannes* » sont donc défavorisée financièrement relativement aux matériaux industriels. Afin de ne pas perdre les caractères bénéfiques de l'emploi de ces matériaux, la main d'œuvre sur site doit être assumée plutôt que reportée à l'étranger ou dans une consommation d'énergie externe*. Pour cela, les dynamiques d'Auto-Rénovation Accompagnée (ARA) sont prometteuse : des professionnels « embauchent » les auto-constructeur.ices sur le chantier, leurs transmettent les savoir-faire et participent à leur autonomisation* sur toutes les tâches ou au moins les plus « appropriables » (Pruvost 2016). Cela permet notamment de réduire les coûts pour les maisonnées les plus modestes et accélère les étapes du chantier les plus intenses en travail.

1.2 Construire en terre crue

Les murs composés de terre crue participent à l'établissement et au maintien d'un environnement sain et agréable. Les propriétés de rétention d'humidité de l'air de la terre crue en font un élément régulateur intéressant de l'humidité ambiante; cette rétention ainsi que sa densité apporte de l'inertie, facteur important de confort thermique estival (Cagnon et al. 2014; Soudani et al. 2016; Jiang et al. 2024). Par ailleurs, la perception du matériau est variable selon l'histoire personnelle et les

expériences de chacun.e mais semble être grandement favorisée par la participation des habitant.es à la fabrication des murs en terre (Miranda Santos et al. 2022).

Les chantiers de construction participative et même les chantiers professionnels de mise en œuvre de la terre crue sont des lieux où se déploient des dynamiques collectives positives de soin et de partage que l'on ne retrouve pas dans le secteur conventionnel (Pruvost 2016; d'Halluin 2021). Certaines techniques ne nécessitent pas ou peu d'outils, de gestes ou de produits dangereux, *a priori* moins que les techniques conventionnelles (La Facto 2023) et à ce titre peuvent être considérées *inclusives*. Réalisées en autoconstruction ou autorénovation accompagnée et partagée (ARAP), elles permettent une réappropriation de l'acte de bâtir relativement accessible aux néophytes, y compris aux enfants ("Flécheux" 2020 dans Dycha 2021; La Facto 2023:74; "Cornu" dans Goizauskas 2019, 63).

Aux côtés d'autres matériaux naturels faiblement transformés comme la paille porteuse ou le bois issu de filières artisanales*, la construction en terre crue a un vrai potentiel de réduction des « externalités négatives » associées à l'effort de construction et de rénovation conventionnellles. Elle peut se réaliser à l'aide d'outils simples et durables et reposer essentiellement sur le travail* humain directement sur le chantier et non sur du travail mécanique et énergivore, permettant une *intensité sociale* dans la production des bâtiments (Marcom 2011; Réseau écobâtir 2019; Marcom & Pruvost 2021). La majorité du travail de production pouvant être réalisée sur site, il est possible de s'extraire de circuits de production mondialisés favorisant les inégalités de conditions de travail et les transports.

La terre est un matériau *réversible* (Morel & Charef 2019; CCTC 2024). Elle durcit par l'évaporation de l'eau que contient le mélange mis en œuvre. Tant qu'elle n'est pas polluée ou durcie irréversiblement par des adjuvants hydrauliques comme la chaux ou le ciment, la terre peut être réemployée indéfiniment, par simple réhydratation. En cela, elle se distingue des matériaux *recyclables* qui nécessitent des étapes de transformation complexes et/ou énergivores (La Facto 2023).

Les intérêts des techniques mobilisant des matériaux naturels et peu transformés comme la terre crue sont multiples et certains peuvent être perçus dès les premiers contacts avec le matériau.

Construire en terre prend place au sein d'une grande diversité de techniques de construction paysannes* en matériaux biosourcés* : les techniques mettant en œuvre la paille en botte (porteuse* ou non) (ARPE Normandie 2019), la pierre (Cagin & Nicolas 2022), le bois (Brihiez 2021), etc. Ces matériaux côtoient voir s'hybrident avec la terre crue dans le patrimoine bâti historique ainsi que dans le renouveau contemporain de la construction paysanne.

1.3 Terres d'excavation

Sous la commande de maîtrises d'ouvrages insatiables, le secteur du terrassement produit des quantités considérables de terre excavées chaque années : entre 110 et 160 Mt/an ((Cerc 2018 dans (Denot & Eisenlohr 2021), (BRGM 2024)). Ces quantités sont approximatives car l'ensemble des terres mobilisées ne sont pas forcément soumises à déclaration (Fernandez 2018; Augiseau & Kim 2021).

C'est à proximité des métropoles que les flux sont les plus conséquents. Autour des plus grandes villes, les Installations de Stockage de Déchets Inertes (ISDI), déchetteries accueillant la majorité de la masse des gravats et terres d'excavation du secteur du BTP, sont souvent à saturation (Loiret 2021). Les communes périphériques commencent à refuser l'ouverture de nouveaux centres de stockage. Les terres doivent alors être transportées plus loin, ce qui augmente les coûts financiers* des entreprises de terrassement pour l'évacuation des déchets et des terres (Choi 2017 dans (Hussain et al. 2023)). Les impacts sociaux et environnementaux liés au transport augmentent proportionnellement.

La métropole parisienne est particulièrement concernée. Les projets d'aménagements du « Grand Paris » occasionnent des quantités de terres d'excavation sans précédent, et qui il est prévu qu'ils continuent d'accélérer. Ainsi, il est prévu que 400 à 500 millions de tonnes de terres d'excavation soient extraites des sols et sous-sols parisiens d'ici à 2030 (Loiret 2021) (Figure 4).

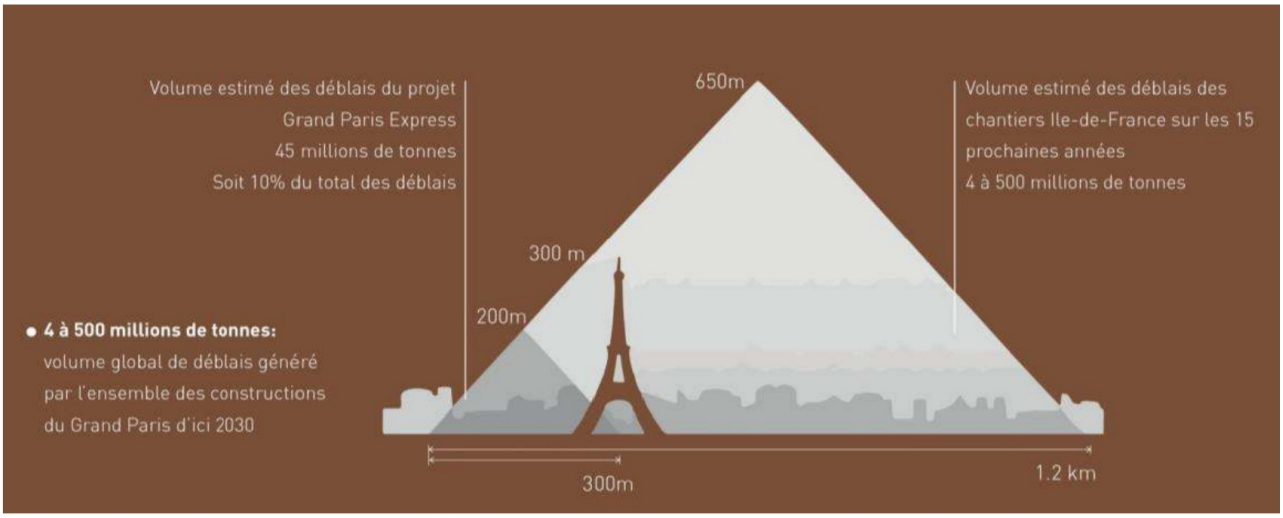


Figure 4 : représentation du volume de terres d'excavation généré par les travaux du Grand Paris d'ici 2030 (Loiret 2021).

La construction en terre crue est souvent considérée comme une manière de *valoriser* les terres d'excavations (Hussain et al. 2023). La terre est alors vue comme une « solution » à l'abondance de productions de déblais du terrassement. L'hypothèse sous-jacente est alors que « l'utilisation des terres de déblais et d'excavation sous forme de matériaux de construction contribue au développement écoresponsable des villes et des bâtiments. » (Gasnier 2019:25).

Le développement de l'usine de production d'éléments composés de terre crue Cycle Terre[11] était un exemple de cette dynamique: sa communication reposait essentiellement sur la valorisation des terres d'excavation[12]. Cette communication était fréquemment reprise dans la communication du Grand Paris Aménagement (GPA), le groupement d'aménageurs public qui gouverne l'organisation des chantiers d'ampleurs à l'origine de la grande majorité des terres d'excavations parisiennes en cours et prévues pour les prochaines années (Loiret 2021) :

> « Les terres excavées représentent certes un enjeu considérable posant des difficultés en termes de stockage et d'espace disponible mais génèrent également de nouvelles opportunités pour les territoires en transformant un déchet en une ressource précieuse pour engager un changement vertueux. » (Grand Paris Aménagement 2021)

Pourtant, le réemploi potentiel des terres de déblais dans la construction en terre crue est annoncé comme représentant seulement 0.1 Mt/an aux alentours de 2025 et 0.4 Mt/an d'ici 2031[13], soit 0.2 à

11 https://www.cycle-terre.eu/. L'usine a fermé au début de l'été 2024.

12 On peut lire dans la présentation du projet sur leur site internet : « *Les travaux de grande ampleur sont confrontés à la problématique des déblais : ils représentent environ 90% des déchets urbains. Cycle Terre se propose de réutiliser/valoriser les terres excavées non polluées pour la construction en terre crue de nouveaux quartiers du Grand Paris. Ce qui est aujourd'hui considéré comme un rebut inutilisable et encombrant peut en réalité devenir une ressource considérable. Dans les années à venir, il est envisageable de construire des millions de mètres carrés en réemployant ces terres de chantier plutôt que de les stocker.* » https://www.cycle-terre.eu/cycle-terre/le-projet/

13 Site promotionnel des actions à visée écologique du Grand Paris Aménagement https://www.grandpariscirculaire.org/articles/h/emergence-d-une-filiere-terre-crue-en-ile-de-france-retour-sur-la-

0.8 % du volume de terres excavées. Des chiffres que l'on peut par ailleurs considérer comme optimistes, du fait qu'ils provienne directement des services de communication de ces projets.

Ainsi, plus de 99 % des terres d'excavation prévues ne seraient pas concernées. Les autres alternatives à visée écologique (« valorisation » par épandage agricole) représentent des quantités similaires. Le reste suivra les circuits conventionnels : extraction-transport-ISDI. Les volumes considérés par la « valorisation » sont dérisoires. Mais l'intensité de la communication qui y est consacrée n'est pas du tout proportionnel aux enjeux : elle a fait écho dans la presse spécialisée du BTP[14], dans la presse grand public[15] et même sur des sites internet du gouvernement français[16]. On peut alors se demander si la communication autour de la valorisation des terres excavées dans ce type de projets ne participe pas à la légitimation des projets de terrassement. En effet, l'opinion publique commence à douter de la pertinence des grands projets d'aménagements étatiques (Sébastien 2018). Pour éviter l'opposition, il devient alors stratégique de masquer les impacts sociaux et/ou environnementaux qu'ils engendrent. Ces impacts ne sont pas seulement ceux des travaux de terrassement, mais de l'ensemble des cycles de vie des projets d'urbanisation dont les flux matériels majoritaires sont les terres d'excavation mais également le béton (Fernandez 2018). C'est aussi la destruction des sols en place et des écosystèmes associés, une consommation d'énergie externe considérable, une artificialisation irréversible des sols, des mécanismes de spéculation immobilière, etc. Qu'est-ce que 0.8 % de terres « valorisées » au regard des externalités négatives de ce type de projet ? La communication ne permet-elle pas, au final, de produire encore plus de déchets par la production d'un voile « vert clair » (Berlan et al. 2023)?

Le calcul est impossible à réaliser : difficile de quantifier le « bénéfice d'opinion publique » qui est en jeu. Mais nous ne pouvons négliger le potentiel greenwashing* (Berlan et al. 2023) que la récupération de ce type de projet peut engendrer.

Dans une analyse de l'emploi du sable comme matériau de construction industriel, Driffort montre que « l'absence de conscience du fait que le sable est un élément essentiel de l'écosystème contribue à son utilisation distanciée – une distance à la fois géographique et psychologique de l'utilisateur, face à l'impact de sa consommation. » (Driffort 2021). Le parallèle avec la construction en terre crue est tentant : dans la terminologie employée pour qualifier la terre d'excavation, la distanciation du milieu naturel qu'est le *sol* par l'emploi de termes relatifs aux déchets où aux ressources* minières n'est pas anodine, et contribue à une mise à distance qui le fait passer « de l'état de « sujet » à celui d'objet et de « support technique » » (Driffort 2021). Le langage de communication autour du réemploi des terres excavées n'est pas anodin et participe à l'invisibilité des enjeux. Au fond, n'oublions pas qu'avant de « valoriser » une partie de ses « déchets » en « ressource », c'est la filière terrassement qui transforme le sol, déjà une « ressource », en déchet. Il n'y a pas de production de valeur dans le *réemploi* ou le *recyclage*; au mieux, une réduction des pertes. La meilleure manière de ne pas engendrer d'impacts négatifs est donc de ne pas produire le déchet initial, c'est à dire de réduire l'intensité des travaux de terrassement.

La vision de la filière terre crue comme « exutoire » des déchets du BTP est d'autant plus marquante lorsque des organismes cherchent à y intégrer d'autres rebuts, par exemple des agrégats de démolition de béton de ciment (Arrigoni et al. 2018). Outre les questions techniques et sanitaires que ces inclusions représentent, il est certain que ce « potentiel » saura être exploité dans le communication des multinationales de la construction béton[17].

visite-de-la-fabrique-cycle-terre.html

14 https://www.lemoniteur.fr/article/terre-crue-et-batiment-cycle-terre-accelere.2323156

15 https://www.lesechos.fr/pme-regions/ile-de-france/sevran-la-fabrique-cycle-terre-recycle-les-terres-excavees-du-grand-paris-1376528

16 https://www.divd.logement.gouv.fr/le-projet-cycle-terre-a-sevran-93-a103.html

Au-delà des bénéfices potentiels permis par la communication, le réemploi des terres d'excavation peut représenter une aubaine économique pour les entreprises de terrassement qui trouvent des débouchés à la saturation des exutoires et aux coûts de transports supplémentaires engendrés. C'est également le cas des filières d'extraction de granulats, produisant des terres d'excavation décaissées pour accéder aux gisements sous-jacents, ou des boues de lavage des granulats extraits: ces entreprises trouveraient dans la vente de « terre en sac » ou de bétons de ciment incluant de la terre[18] un moyen d'arrondir leurs profits, en même temps que leur image, alors que le public commence à se méfier des dérives des pratiques extractivistes*.

Pourtant, il est souvent très intéressant pour les entreprises de construction en terre crue d'employer des terres de déblai sur les chantiers, car cela facilite l'étape d'approvisionnement et réduit les coûts économiques et environnementaux du procédé sur le chantier.

Difficile de trouver l'équilibre entre avantages et inconvénients dans une approche holistique. L'inclusion du flux de terres d'excavation contemporain dans la construction en terre crue est une idée intéressante dont l'ensemble des avantages n'a pas été discuté ici. En revanche, la promotion de la filière terre crue comme *exutoire* des déchets du BTP conventionnel peut inquiéter dans la dimension *greenwashing** qu'elle revêt, prenant le nom valorisant d'économie circulaire (Monsaingeon 2023).

1.4 Adjuvantation

Lorsque l'on compose un mélange de terre crue en vue de sa mise en œuvre, on appelle *adjuvants* les composés ajoutés à la terre. Dans la mise en œuvre paysanne, des éléments organiques cultivés ou « de cueillette* » peuvent être ajoutés : fibres végétales (pailles, foin…), fibres animales (crottins, poils…). L'ajout de granulats minéraux est également une possibilité (sable, graviers). A ces adjuvants courants peuvent s'ajouter d'autres produits issus de productions et transformation de plus grande échelle.

1.4.1 Les liants hydrauliques

L'adjuvantation en ciment de la terre dans la mise en œuvre des techniques de construction en terre peut être considérée comme une controverse scientifique (Pelé-Peltier 2023:52).

En effet, différentes raisons sont avancées pour justifier l'usage du ciment ou de la chaux dans la mise en œuvre du matériau (Pelé-Peltier 2023:53):

(1) améliorer les performances mécaniques, notamment lorsque la technique choisie n'est pas adaptée à la terre employée ;

(2) réduire sa sensibilité à l'eau ;

(3) faire passer le matériau dans la réglementation liée aux bétons de ciment lorsque les règles constructives ne sont pas adaptées à la mise en œuvre de la terre crue ;

(4) convaincre les clients et assurances lorsqu'ils sont réticents à l'emploi de terre crue.

Pourtant, l'adjuvantation hydraulique de la terre annule la plupart des avantages pour lesquels nous avons identifié la terre crue comme sociétalement* favorable :

17 https://www.vinci.com/vinci.nsf/fr/actualites/pages/granulats_recycles_l_economie_circulaire_au_service_du_btp.htm

18 Le groupe Pigeon, exploitant de carrières, commercialise désormais des parpaings de terre adjuvantée au ciment (et non crue comme indiqué dans les articles promotionnels) destinés à être remplis de terre coulée adjuvantée au ciment. https://www.opcalia-bretagne.com/blog/bretagne-pigeon-conjugue-terre-crue-et-industrialisation/

- la prise hydraulique de la terre lui fait perdre ses propriétés de « réversibilité » (1.2). La destruction ou la rénovation d'édifices bâtis en terre adjuvantée continuera à générer des déchets, dans la continuité de celle du BTP contemporain, et la ressource « sol » employée est détruite.

- l'adjuvantation au ciment ou à la chaux hydraulique réduit plus ou moins fortement la perméabilité à l'humidité (Jiang et al. 2024). Ce qui peut être souhaitable dans certaines situations d'exposition à l'eau, ne l'est pas dans l'ensemble des murs, car nous avons vu les bénéfices de confort et de performances énergétiques que les propriétés hygroscopiques de la terre crue peuvent apporter (1.2). A noter que la chaux aérienne préserve la perméabilité de la matière, tout en pouvant apporter une certaine résistance à l'eau, ce qui en fait un adjuvant plus adéquat que les ciments dans la réalisation d'enduits protecteurs des zones particulièrement exposées (Hamard et al. 2013)

- l'emploi de liants hydrauliques réduit le potentiel autonomisant* des techniques de construction en terre. L'approvisionnement en liants rend dépendant d'industriels et du marché conventionnel.

- la production des liants hydrauliques est une des sources principales des problématiques sociales et environnementales dont nous avons décrits les principaux traits : entre autres, désastres environnementaux et dominations sociales (1.1). Le ciment est ainsi le principal facteur d'impacts environnementaux d'un matériau terre adjuvanté (Ventura et al. 2022; Higuera Romero 2023).

Conclure sur les impacts de l'adjuvantation de la terre aux liants hydrauliques devrait donc se faire « au cas par cas » (Pelé-Peltier 2023). Nous pensons cependant que les « cas » où la terre adjuvantée présenterait un intérêt sociétal sont rares et se limitent probablement à l'adjuvantation sélective d'enduits pour les éléments particulièrement exposés. Dès lors qu'il n'y a pas d'adjuvantation hydraulique, on parle de terre « crue ». C'est pourquoi, dans ce travail de thèse nous ne considérerons que la terre dite *crue* maintenant ses propriétés de réversibilité. Nous nous inscrivons ainsi dans la ligne directrice du Projet National Terre Crue[19].

1.4.2 Les granulats

La surexploitation des granulats d'origine naturelle fait partie des grandes problématiques environnementales causées par le secteur de la construction (Peduzzi 2014). De ce fait, comme les liants hydrauliques, on peut supposer que leur usage raisonné dans des éléments composés de terre crue ne doive se limiter qu'à des situations particulières comme celui des enduits de finition ou des mortiers de maçonnerie.

1.4.3 Les liants « biosourcés industriels »

Des substances organiques, transformées dans des procédés industriels, sont employées comme adjuvants. Ces « biosourcés industriels* » sont de plus en plus envisagés dans les recherches académiques relatives à la construction en terre crue. Ce sont souvent des molécules aux comportements extrêmes vis a vis de l'eau, qui servent essentiellement à adapter le matériau terre crue à des procédés industriel, parfois robotisés (2.3.3) : par exemple, des extraits d'algues (Serlet et al. 2016), des farines de végétaux tropicaux (guar (Mustafa et al. 2023)), etc.

Nous ne pouvons enquêter sur l'intérêt holistique de l'emploi de chacun de ces adjuvants. Cependant, nous questionnons leur emploi, qui peut réduire une grande partie des potentiels d'émancipation que permettent les techniques de construction en terre crue :

- la dépendance aux systèmes de production industriels est maintenue ;

19 https://projet-national-terre.univ-gustave-eiffel.fr/cadre-et-principes-du-projet

- la production des matériaux comporte des étapes délocalisées donc les externalités négatives sont invisibilisées. Les impacts et problématiques considérables qu'engendrent l'exploitation des ressources en granulats comme le sable sont bien documentées (Peduzzi 2014; Driffort 2021). Moins connu, l'impact de la récolte du Kelp, l'algue employée pour la production d'alginates (extraits d'algues) est une des raisons du déclin des écosystèmes associés (Peteiro 2018).

Dans cette étude des techniques de construction en terre crue, nous nous sommes attachés à dépasser l'échelle du « chantier » et remonter autant que possible les chaînes de valeur de production des matériaux et matériels employés sur les chantiers. Nous intégrons ainsi les présents travaux au sein de ce qu'on pourrait appeler une approche holistique de l'étude des choix techniques de construction en terre crue.

2 La terre crue en France hexagonale : état des lieux

2.1 Intensité du bâti existant et dynamique de la filière actuelle

En France hexagonale*, en 1987, il y avait approximativement un million de maisons en terre (pisé, adobe et bauge) d'un âge moyen d'un siècle (Michel et Poudru 1987, dans (Hamard et al. 2013)). Une autre estimation de l'Agence Nationale pour l'Amélioration de l'Habitat, estimait à environ 15 % la part du bâti français composé de terre crue, soit 2 millions de bâtiments (ANAH, dans (Hubert Guillaud et al. 2008:17)).

Dans certaines régions comme en Rhône-Alpes, le pisé est estimé à environ 40% du bâti (Alex 2011, dans (Villain 2020:66)). Sur certaines communes bretonnes, la bauge concerne la presque totalité des édifices bâtis avant 1950 (Service de l'Inventaire du patrimoine culturel de Bretagne 2023). Les techniques de terre porteuse sont présentes majoritairement dans l'espace rural, mais également dans l'espace urbain (Mille 2023). En revanche, les techniques de torchis-colombage caractérisent encore le centre historique de nombreuses grandes villes, comme Rennes (Bardel & Maillard 2009).

L'essentiel du bâti existant en terre a donc été édifié avant le déploiement des matériaux de construction industriels au début du 20ème siècle. Mais à partir des années 70, des passionnées ont fait renaître les cultures constructives de la terre crue (Villain 2020).

L'intensité de l'effort de construction en terre a d'abord été relativement ténu. Un recensement des bâtiments en terre construits entre 1976 et 2015 n'a permis d'identifier en moyenne que 6,5 nouveaux bâtiments en terre crue par an sur cette période (Antoine et Carnevale, 2016, p. 60, dans (Pelé-Peltier 2023:86)).

Depuis, la dynamique semble s'être accélérée. Aujourd'hui, on compte plusieurs centaines de professionnels de la construction en terre crue, dont une grande partie s'est regroupée en collectifs régionaux pour organiser collectivement un redéploiement équilibré des pratiques de construction en terre crue, et fédérés à l'échelle nationale dans la Confédération de la Construction en Terre Crue (CCTC). La dynamique actuelle de la filière terre peut être illustrée par le développement en quelques années d'une offre de formation dans plusieurs régions du territoire (Figure 5).

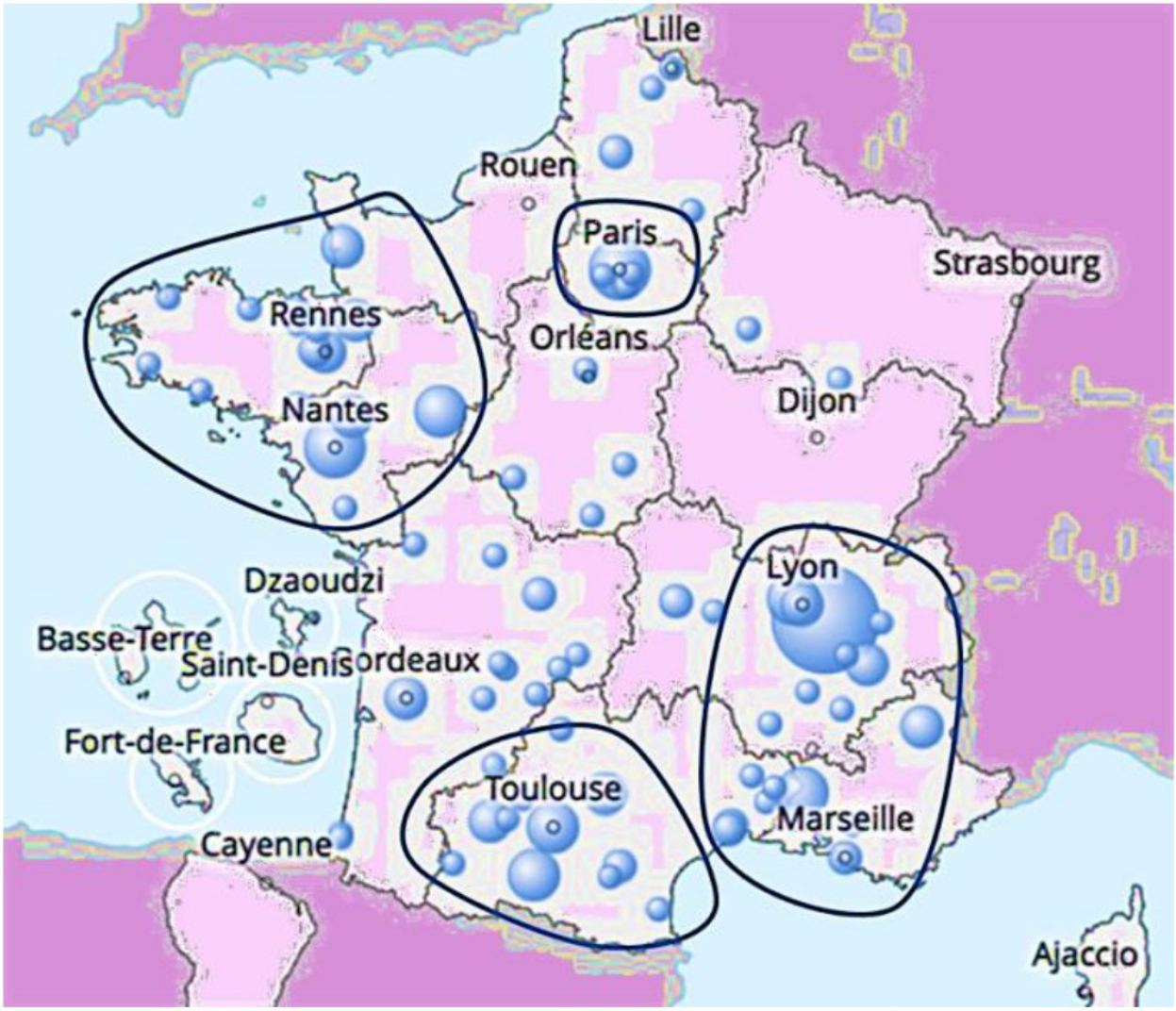


Figure 5 : localisation des formations intégrant la construction en terre crue en France (CCTC 2023:12). Les régions entourées indiquent les zones les plus « dynamiques » de la construction en terre crue.

2.2 Un patrimoine invisible, ou « invu »

Les professionnels et passionné.es de la construction en terre crue sont unanimes sur le fait que la construction en terre crue est jusqu'à aujourd'hui relativement peu connue du grand public, à la fois dans les potentiels des techniques pour la construction contemporaine et dans la connaissance de l'abondance du patrimoine sur notre territoire :

> "En France, le paysage de l'architecture en terre crue reste, de nos jours, méconnu du grand public. Les élans qui portent son renouveau, dans notre société actuelle, reposent sur des passionnés conscients de la richesse du domaine mais sont encore aux balbutiements d'un effet de corps. Malgré de nombreuses années de veille patiente d'associations soucieuses du patrimoine local, de la technique constructive, de production d'inventaires régionaux variés, la construction en terre crue demeure masquée." (Cannat 2022)

Il est en effet surprenant que le bâti ancien soit si peu remarqué des habitant.es qui souvent le côtoient au quotidien. Une des raisons de la méconnaissance de l'existance de ce patrimoine est liée à la présence d'enduits réalisés sur les murs qui le rendent invisible (Villain 2020:67).

A cette problématique d'invisibilité non négligeable dans son impact sur la dynamique du renouveau de ces techniques s'ajoutent celle de l'inadaptation de la plupart de ces enduits qui, composés de ciment, ne permettent pas au matériau de respirer et entraînent des pathologies (Hamard et al. 2013), qui peuvent conduire à des effondrements des bâtiments.

Mais même lorsque la terre est abondante et visible, elle demeure très souvent « invue » (Bavay 2008, dans (Aras-Gaudry et al. 2023)). Un symptôme du déracinement des habitant.es de l'histoire, pourtant relativement récente, des pratiques de subsistances vernaculaires de leur territoire.

2.3 Techniques de construction en terre crue et emplois associés

2.3.1 Techniques-type

L'acte de construire en terre crue rassemble une grande variété de procédés de construction. Les *techniques* de construction en terre crue sont généralement définies en familles de *procédés-types*, dont l'unicité est définie par la proximité des gestes, des outils et des consistances de la terre au cours des procédés. Puisque dans tous les procédés, même relativement spécifiques, il existe des variations presque infinies dans les méthodes de construction (Hamard, Cazacliu, et al. 2016; Fabbri et al. 2022; Higuera Romero 2023), nous emploierons le terme *technique-type** dans le but de souligner qu'il n'y a pas « une » technique de bauge, de pisé, d'adobes ou de torchis. Par ailleurs, le terme technique sera considéré au sens large, et pourra indiquer un procédé, une étape de ce procédé ou un geste (Sennett 2009). En effet, les philosophes et sociologues des techniques considèrent même l'échelle des institutions et filières comme des *techniques* (Illich 1973; Carnino et al. 2016) en tant que méthodes d'interaction des humain.es entre elles et avec le monde.

2.3.2 Techniques-type traditionnelles

Nous distinguerons dans ce travail les techniques-types dites « traditionnelles* », employées dans la construction des bâtiments pré-industriels* des techniques dites « modernes » dont l'émergence date d'après 1950. Cette distinction est importante dans la compréhension des procédés, car l'émergence des techniques modernes n'est permise que par l'abondance énergétique et matérielle qui caractérise la société industrielle.

On distinguera également les techniques mises en œuvre *in situ*, dont les éléments sont façonnés directement dans leur emplacement définitif, des techniques *préfabriquées* pour lesquels un façonnage des éléments est réalisé en dehors du mur avant d'appareiller les éléments dans leur emplacement final, avec ou sans mortier.

Enfin, la consistance du mélange de terre au cours du façonnage du matériau (ou « état hydrique », voir Chapitre 2, 5.2.3) implique l'usage de certains gestes ou outils, ce qui apporte un dernier critère de distinction entre catégories de procédés.

Nous décrivons ici les techniques-types rencontrées couramment en France hexagonale. Ce travail de description ayant déjà été réalisé dans la littérature, nous ne décrivons pas les techniques dans le détail. L'inventaire-glossaire des techniques de Knoll et al. (2019) par exemple décrit une grande diversité de techniques de construction en terre.

Nous ne décrivons pas les enduits composés de terre crue, car ces techniques ne sont pas mobilisées dans la présence étude. Ils méritent cependant d'être mentionnés par leur emploi très versatile et relativement fréquent, particulièrement sur les chantiers d'auto-rénovation (d'Halluin 2021).

2.3.2.1 Pisé

La construction en pisé consiste en la préparation ou l'extraction d'une terre directement à l'*état humide*, puis à sa compaction dans un coffrage en couches successives d'une épaisseur régulière et généralement proches de 10cm (Figure 6). C'est une technique mise en œuvre *in situ*.

La particularité de ce procédé est de recourir à une compaction conséquente. La cohésion de la terre est surtout garantie par la compacité atteinte, forçant le contact entre les éléments du sol. Pour obtenir une bonne compacité, la teneur en eau doit être bien maîtrisée : de fortes teneurs en eau empêchent la compaction car l'eau est incompressible ; tandis qu'aux faibles teneurs en eau les agrégats sont durs ou pulvérulents et ne collent pas.

La technique est très courante dans la moitié sud de la France, notamment en régions Occitanie et Auvergne-Rhône-Alpes, et autour du bassin méditerranéen.



Figure 6 : Compaction manuelle du pisé dans un coffrage. ©Association Georges Antonin

2.3.2.2 Bauge

Les techniques de bauge rassemblent tous les procédés mettant en œuvre la terre *in situ* et à l'état *plastique*. La terre extraite est hydratée si nécessaire, des fibres (p. ex. paille) sont éventuellement ajoutées. Les mélanges sont souvent réalisés par poinçonnement, par piétinement d'humain.es (Figure 7) ou d'animaux. Puis le mélange est transporté jusqu'au mur en vrac ou sous forme d'éléments (appelés « mottes », « pains », ou encore « caillebotis »). Traditionnellement, les éléments étaient appareillés plus ou moins régulièrement ou le mélange en vrac était placé sur le haut du mur. Un léger effort de compaction au pied ou à la main pouvait être appliqué. Le mur est monté par « levées », dont la hauteur est limitée par la fluidité du mélange. Après un temps de séchage intermédiaire, les deux faces du mur pouvaient être tranché, battu ou les deux successivement afin de le rectifier et de renforcer la cohésion en surface.

Dans les procédés type bauge, la terre est modelée : la teneur en eau et la composition du matériau doit permettre son façonnage à faible compaction tout en étant ferme pour pouvoir réaliser des levées de hauteur suffisante.

La bauge est présente dans de nombreuses régions. On la rencontre en effet, entre autres en Occitanie, en Bretagne, en Normandie, dans le Centre, en Rhône-Alpes, en Île de France (Seine-et-Marne), et en Pays de la Loire.



Figure 7 : Ajout des fibres au cours du piétinement d'un mélange plastique dans un procédé type bauge.

2.3.2.3 Adobes

Les techniques d'adobes, ou briques de terres moulées, sont des modes de mise en œuvre de petits éléments façonnés, puis séchés, avant d'être appareillés dans l'élévation d'un mur.

La terre est extraite du sol, puis de l'eau est généralement ajoutée afin d'atteindre un état plastique à visqueux selon les modes de mise en œuvre. Des fibres peuvent être ajoutées et mélangées. Puis, le façonnage est généralement réalisé à l'aide d'un moule (Figure 8), mais on rencontre des adobes « irréguliers » en France hexagonale qui ont pu être façonnés directement à la main. L'appareillage est généralement réalisé avec un mortier qui peut être composé de terre éventuellement adjuvantée d'autres matériaux (sable, fibres, chaux).

Des techniques-types variées existent au sein de la catégorie des adobes. Relevons ici la technique de l'appareillage en damier, rencontrée en Occitanie et en Champagne-Ardenne. Les adobes sont appareillés en alternance avec des galets dans du mortier. Il est surprenant de constater que cette technique ne déploie aucun recouvrement entre les briques, dans un appareillage droit qui n'est pas conseillé dans les règles de l'art contemporaines (CCTC 2018) et qui lui donne son nom.

Le façonnage préalable des éléments peut permettre de décorréler l'étape de modelage de l'étape d'élévation des murs. De ce fait, les techniques d'adobes sont très versatiles, permettant leur emploi dans de nombreux contextes et même d'être intégrées dans des systèmes d'échange et de commerce.



Figure 8 : Moulage d'adobes. ©Briquetterie T.E.R.R.E.

On rencontre des adobes dans une grande partie du territoire hexagonal : en Occitanie et Champagne-Ardenne où elles sont abondantes, mais également Rhône-Alpes et Île de France (Seine-et-Marne).

2.3.2.4 Pan de bois et torchis

Les techniques-types de pan de bois sont l'ensemble des techniques de construction traditionnelles où c'est une structure bois qui porte le toit de l'édifice. Le remplissage peut être réalisé par de la maçonnerie de terre crue (adobes, bauge ou torchis) ou par d'autres matériaux (pierre, brique cuite, bois) (Hueto-Escobar et al. 2022).

Le torchis est une technique-type qui est caractérisée par le fait que les procédés ne peuvent être mis en œuvre qu'en remplissage de structures type pan de bois : ce sont des techniques non-porteuses.

Les méthodes de façonnage sont très diverses, mais une des méthodes courante est le torchis tressé sur clayonnage (Figure 9). La terre est extraite et mélangée à l'eau, vers un état généralement visqueux. Des « torches » de fibres longues (paille, foin) sont façonnées en les imbibant du mélange de terre visqueuse. Puis, les torches sont enroulées autour d'une structure intermédiaire entre les pans de bois porteurs*, le clayonnage.

La terre en garniture de pan de bois permet la construction d'édifices hauts et aux murs étroits. Ce sont des techniques permettant de densifier l'habitat et de bâtir relativement vite, avec des matériaux légers.

Les techniques de torchis sont rencontrées sur tout le territoire hexagonal, et souvent présentes dans les centres historiques, mais également dans le bâti rural. Il semble que la technique soit présente dans la plupart des régions : Bretagne, Normandie, Pays de la Loire, Grand-Est, Nord, Ile-de-France, Rhône-Alpes, Occitanie, etc.



Figure 9 : Tressage du torchis sur éclisses.

2.3.2.5 Ailleurs : le gazon

A ces quatre techniques-type traditionnelles s'ajoutent de nombreux autres procédés que l'on trouve dans d'autres territoires que la France hexagonale. Le gazon est une technique de *terre découpée*, qui nous est utile dans la compréhension de la diversité des procédés de terre cru ; c'est pourquoi nous les décrivons ici succinctement.

Le gazon (*turf* ou *sod*, en anglais) consiste en le découpage de la surface d'un sol engazonné sous forme de mottes relativement grandes (de 30cm à 1m) qui sont ensuite appareillées directement sur le mur, généralement sans mortier. Cette technique mis en œuvre *in situ* est particulière pour plusieurs raisons :

- il s'agit d'une technique découpée, dont la matrice de terre n'est pas mélangée avant mise en œuvre pour ne pas rompre le réseau racinaire qui lui donne sa cohérence ;

- la terre employée est volontairement le sol de surface, alors que pour la plupart des autres techniques de terre crue le sol humifère de surface est généralement évité au profit d'horizons minéraux plus profonds (voir Chapitre 2, 2.1).

2.3.3 Techniques-type modernes

Les techniques-types modernes sont diverses et variées. Certaines retiennent notre attention ici de par leur potentiel pour la construction contemporaine (terre allégée). Les autres sont décrites ici du fait de l'intérêt récent que la recherche académique leur attribue, ce qui fait que de nombreuses publications récentes relatives aux propriétés de la terre les étudient où y font référence (terre coulée, impression 3D).

2.3.3.1 La terre allégée

La terre allégée est une technique-type inventée dans les années 1950 (Volhard & Reisenberger 2016). Il s'agit d'une technique-type particulière de torchis. La terre est mélangée à de l'eau jusqu'à l'état liquide, puis mélangé à une grande quantité de paille, enrobant simplement les fibres d'une fine couche de terre qui garantit leur cohésion. Le mélange est compacté dans un coffrage, et

généralement enduit après séchage. Il peut également être projeté manuellement ou par l'emploi de machines adaptées. La terre allégée peut être mise en œuvre dans la construction neuve en remplissage d'une ossature bois, ou en isolation ou correction thermique par l'intérieur ou l'extérieur de bâtiments existants.

La terre allégée est un matériau généralement considéré comme isolant du fait de sa relative légèreté apportée par les fibres. De ce fait, c'est une des techniques de construction en terre qui a le plus de potentiel dans le contexte actuel de besoin général de rénovation thermique. Il n'est pas aussi isolant que des fibres seules, mais présente une certaine inertie thermique du fait des propriétés hygroscopiques de la terre crue. La terre colle les fibres et stabilise la structure de l'isolant, qui est ainsi autoporteur*, c'est à dire qu'il ne nécessite pas de coffrages perdus comme les fibres en vrac.



Figure 10 : Terre-chanvre coffré dans une ossature bois.

Par ailleurs, les techniques de terre porteuse souffrent bien plus du manque de réglementation que les techniques de remplissage d'ossature (Marcom 2011; Vinceslas 2019). Relativement aisé à transmettre, les techniques de terre allégée sont les techniques de terre crue les plus employées sur les chantiers participatifs au côté des enduits composés de terre crue (d'Halluin 2021). Dans ces contextes la terre allégée est souvent appelé terre-paille (Marcom 2011; d'Halluin 2021).

Enfin, l'emploi de quantités conséquentes de fibres dans le matériau peut lui donner des propriétés de stockage carbone dans le cadre de mises en œuvres sobres (Hellouin de Menibus 2020; Lecomte & Hellouin de Menibus 2020). C'est un avantage commun à d'autres matériaux végétaux* paysans*, et qui dans les calculs d'analyse de cycle de vie peut se révéler décisif dans le potentiel réducteur, voir *regénératif** des impacts des matériaux de construction[20].

2.3.3.2 La terre coulée

La terre coulée est une technique-type de construction en terre ou la terre est portée à l'état liquide puis versée dans un coffrage. Des adjuvants sont employés afin de permettre son durcissement sans évaporation, sans lequel le retrait du coffrage permettant l'évaporation de l'eau et le durcissement du matériau est impossible.

C'est une technique expérimentale, c'est à dire qu'elle n'a pas encore été employée sur beaucoup de chantiers comme les techniques traditionnelles ou la terre allégée. En effet, elle n'a jusqu'alors pas pu être déployée comme technique de terre *crue*, du fait de l'incompatibilité entre la mise en œuvre d'une terre liquide et un décoffrage rapide permettant son séchage : la terre liquide ne tient pas au-delà de

20 Les techniques dites régénératives ont un impact sociétal* positif dans leur emploi, c'est à dire qu'elles compensent au moins les impacts négatifs qu'elles entraînent et procurent en plus de l'amortissement d'autres techniques ayant eu des impacts négatifs.

quelques centimètres d'épaisseur. Ainsi, jusqu'alors, des liants hydrauliques comme le ciment ont été employés, rendant cette technique peu intéressante d'un point de vue environnemental ou social. Des liants *biosourcés industriels** sont en étude et pourraient permettre d'ici quelques années l'emploi de cette technique sous le nom *biosourcée**. Cependant, même si l'adjuvantation hydraulique était remplacée, nous questionnons la pertinence de cette technique car l'emploi de liants industriels, biosourcés ou non, fait perdre tout l'intérêt de la construction en terre crue dans la réappropriation de l'acte de bâtir en maintenant la dépendance à des systèmes industriels énergivores et mondialisés. De plus, la continuité qu'elle permet dans l'emploi des méthodes de mises en œuvre du béton la rend particulièrement propice à la prolongation de modes de construction capitalistes et déshumanisants (Poste 2020) caractérisant les chantiers industriels contemporains (Jounin 2008).

2.3.3.3 L'impression 3D et les techniques robotisées

Ces dernières années, de nombreux programmes de recherche ont tenté de robotiser les techniques de construction industrielles, comme l'impression 3D du béton. Certain.es équipes de recherche ont tenté d'appliquer ces technologiques à la terre crue ou d'en développer de nouvelles. L'impression 3D de la terre crue consiste en le mélange d'une terre à l'état liquide ou visqueux dans un malaxeur mécanique, son transport par pompage jusqu'à un système d'extrusion. Celui-ci, porté par un bras robotique ou une structure en deux dimensions permet une « impression 3D » du filament de terre extrudé par déplacement de la buse. Selon leurs promoteur.ices, l'intérêt de ces techniques résiderait principalement dans un potentiel gain de temps dans la construction, et surtout permettraient de ne plus dépendre de main d'œuvre humaine. Ces derniers points ne sont généralement pas considérés comme positifs dans la filière artisanale terre crue, recherchant plutôt l'intensité sociale (Marcom 2011; Marcom & Pruvost 2021) que la robotisation des procédés aux externalités négatives sociales et environnementales considérables : extractivisme*, pollutions et exploitation humaine dans les chaînes de production mondialisées du numérique.

2.3.4 Classer les techniques

Les techniques de construction en terre crue sont souvent classées selon leur usage dans le bâti (porteur*, non porteur*), le type de mise en œuvre (in situ, préfabriquée), et la saturation en eau de la terre dans le mélange de terre crue (Figure 11, Figure 12).

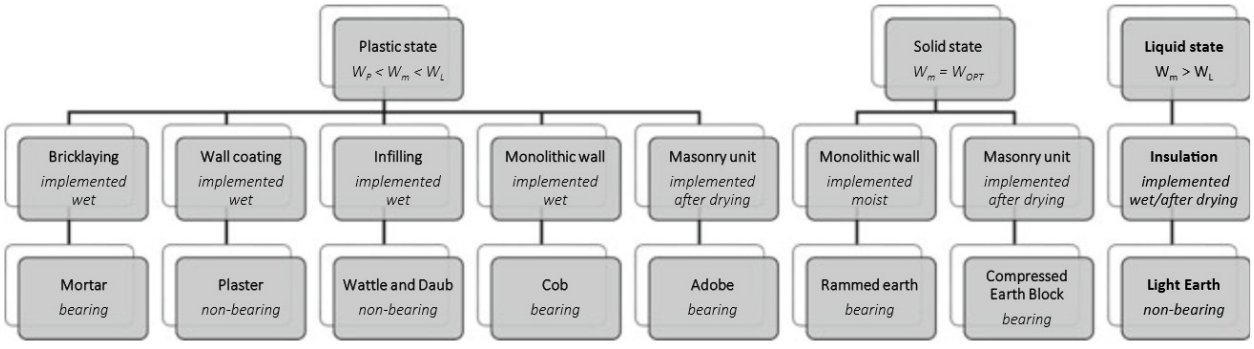


Figure 11: Classification des techniques de construction en terre crue selon la consistance de la terre employée dans le mélange et de la typologie de mise en œuvre (Fabbri et al. 2022:6).

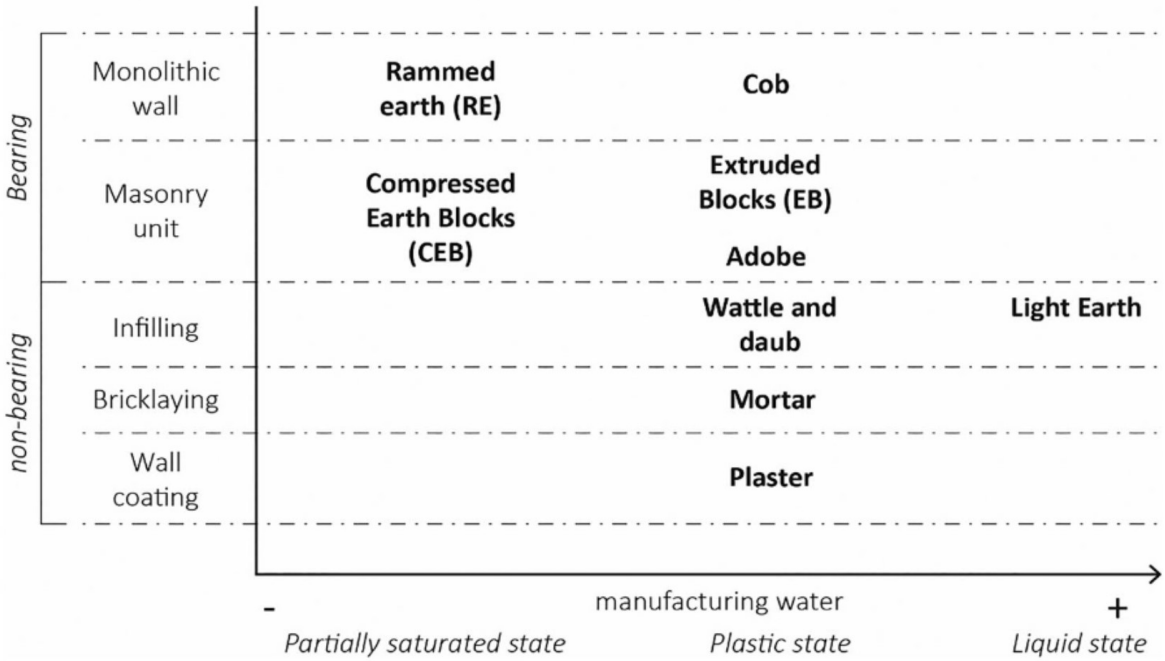


Figure 12 : Classification des techniques de construction en terre crue basée sur la saturation en eau de la terre des mélanges de terre crue à l'étape de façonnage des éléments (abscisse), et la fonction et le type de mise en œuvre de la terre (ordonnée) (Pelé-Peltier 2023).

Cependant, la catégorisation des techniques types et leur classification ne doit pas faire oublier la diversité des pratiques au sein de chaque technique. D'autre part, il existe une certaine continuité entre les techniques-types, soulignée dans la littérature (Chazelles & Klein 2003; Guillaud et al. 2007; Hamard 2017). Il est intéressant de remarquer la position intermédiaire que peuvent prendre les techniques-type de bauge entre les autres procédés ((Figure 13). Les constructeur.ices contemporaines évoquent également cette continuité dans leurs pratiques ("Davis" 2020 dans (Dycha 2021)).

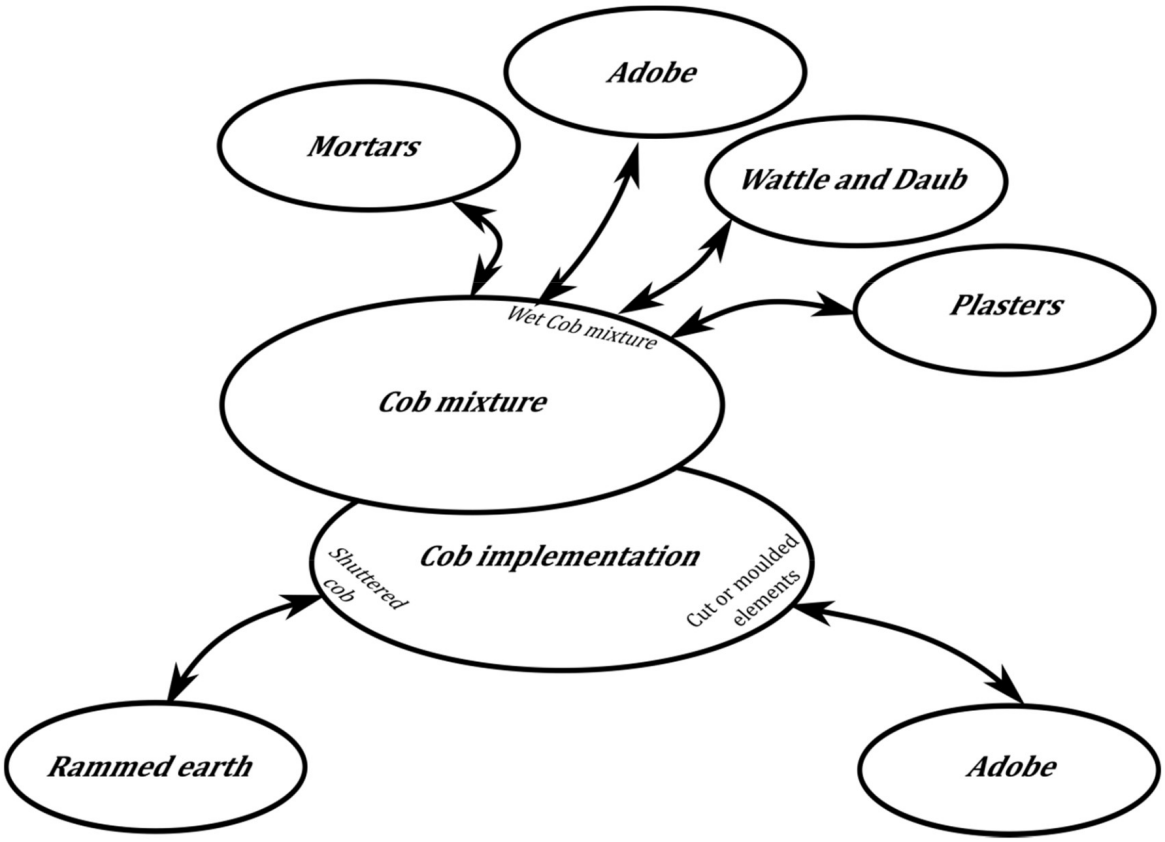


Figure 13 : Relations de continuité entre les techniques-type de terre crue (Hamard 2017).

Par exemple, il existe des intermédiaires entre le pisé et la bauge ("Davis" 2020 dans (Dycha 2021)). Les mottes de bauge peuvent être appareillées fraîches ou après un séchage préalable (Chazelles & Klein 2003; Hilton 2016), elles ressemblent ainsi fortement à des adobes. Les techniques porteuses* et non porteuses* peuvent être définies par une résistance à la compression minimale (Brouard 2018), mais la mécanique du matériau est plus complexe : certains éléments ne portent pas directement le toit, mais participent au contreventement de la structure. Nous avons observées quelques-unes de ces techniques « intermédiaires » sur le terrain, et il est vrai qu'elles sont difficiles à catégoriser dans les techniques-types classiques.

Cette continuité questionne sur le choix d'une technique de construction relativement à la terre disponible. S'il y a une influence de la terre à disposition sur les choix techniques, il s'agirait alors d'une influence continue, et les techniques intermédiaires mobiliseraient peut-être des terres de propriétés intermédiaires.

En contexte contemporain où l'abondance énergétique autorise le développement de techniques de tout ordres, cette continuité est encore exacerbée. Les éléments préfabriqués atteignent l'ordre de grandeur de dimension des techniques mises en œuvre *in situ*, avec la préfabrication de la bauge et du pisé ; les adjuvantations industrielles autoriseront peut-être l'emploi d'états hydriques visqueux et liquide dans des techniques porteuses coffrées (terre coulée) ou empilées (impression 3D).

La question des limites entre techniques de construction nous appelle à la notion de limite de la construction en terre crue. Lorsqu'il y a adjonction de liants hydrauliques comme le ciment ou la chaux, il ne s'agit plus de terre *crue*, et l'emploi de la terre perd alors ses intérêts sociétaux (1.4.1).

Mais ne faut-il pas placer la limite de la terre « crue » à des intensités énergétiques et industrielles plus radicales encore ? Les autres « nouveaux additifs » industriels, même « biosourcés » ne semblent pas correspondre à la philosophie frugale et autonomisante* de la construction en terre crue. La mécanisation, voir la robotisation des procédés de façonnage non plus. Sont-elles encore des techniques de construction en terre crue ?

Enfin, nous souhaitons également relever une certaine continuité entre les techniques employant des matériaux paysans*, notamment la limite entre mise en œuvre de pierre maçonnée dans beaucoup de mortier de terre et la présence de gros éléments rocheux dans les techniques de bauge.

2.3.5 Cartographies des techniques

De nombreu.ses auteur.ices ont cherché à cartographier la distribution de l'occurrence des différentes techniques-types de construction en terre crue sur le territoire hexagonal. Au cours des travaux de cartographie relatifs à cette thèse (Chapitre 3A, 5), nous avons pu constater des approximations de positionnement de zones de déploiement de techniques de terre crue pouvant aller jusqu'à l'échelle d'un département (Cannat 2022; Aras-Gaudry et al. 2023).

La cartographie à l'échelle d'un vaste territoire est en effet un exercice difficile, tant la présence de bâtiments en terre peut être ténue du fait de leur destruction ou de leur invisibilisation (2.2). Ainsi, chaque campagne d'étude révèle de nouvelles zones de présence du patrimoine bâti. Deux cartes circulent aujourd'hui dans les publications relatives à la construction en terre crue (Figure 14, Figure 15). La distribution n'est sensiblement pas la même. Celle de Dipasquale et al. (2011) semble plus « approximée », les formes sont plus arrondies (Figure 15). La carte est définie à l'échelle de l'Europe ce qui peut être à l'origine de ces approximations. Cette représentation met cependant en avant la superposition de différentes techniques-types sur certains secteurs comme en Occitanie ou en Rhône-Alpes.

Cependant, au cours de nos relevés de terrain et des collectes de données de patrimoine bâti géolocalisées (Chapitre 3A, 5), nous avons pu constater qu'une superposition des techniques-types était finalement presque systématique dans les régions traversées (Figure 26). Le Gers, la Limagne, la Champagne, montrent chacune au moins quelques occurrences des quatre techniques-type vernaculaires historiques. Parfois même, 4 techniques-types et même quelques « sous-techniques » particulières sont rencontrées dans une même commune, voir une même rue, comme dans le village de Haget dans le Gers (Figure 17).

Au regard du développement de l'offre de formation (Figure 5), on constate que la filière s'est principalement structurée autour de trois principaux « pôles de développement » correspondant à des zones d'abondance du patrimoine bâti en terre (Leylavergne 2018). En effet, la présence de bâti ancien à réhabiliter permet la stabilité économique des entreprises construisant en terre crue lorsque la construction neuve est peu abondante (Leylavergne 2018). Il est surprenant de constater l'absence de développement de formations dans certaines régions au patrimoine bâti en terre pourtant conséquent, comme la zone Champagne-Ardenne (Aras-Gaudry et al. 2023).

La présence du bâti vernaculaire en terre dans une région est une information permettant de supposer le potentiel d'emploi de la terre pour construire dans les techniques-types représentées. Cependant, sont-elles les seules techniques possibles dans ces régions ? Dans les régions où l'on n'a pas encore recensé de patrimoine bâti, la terre est-elle non adéquate pour bâtir en terre ? Quels sont les facteurs qui gouvernent le déploiement des techniques de construction en terre crue, et quelle est la place des sols parmi ces facteurs ?

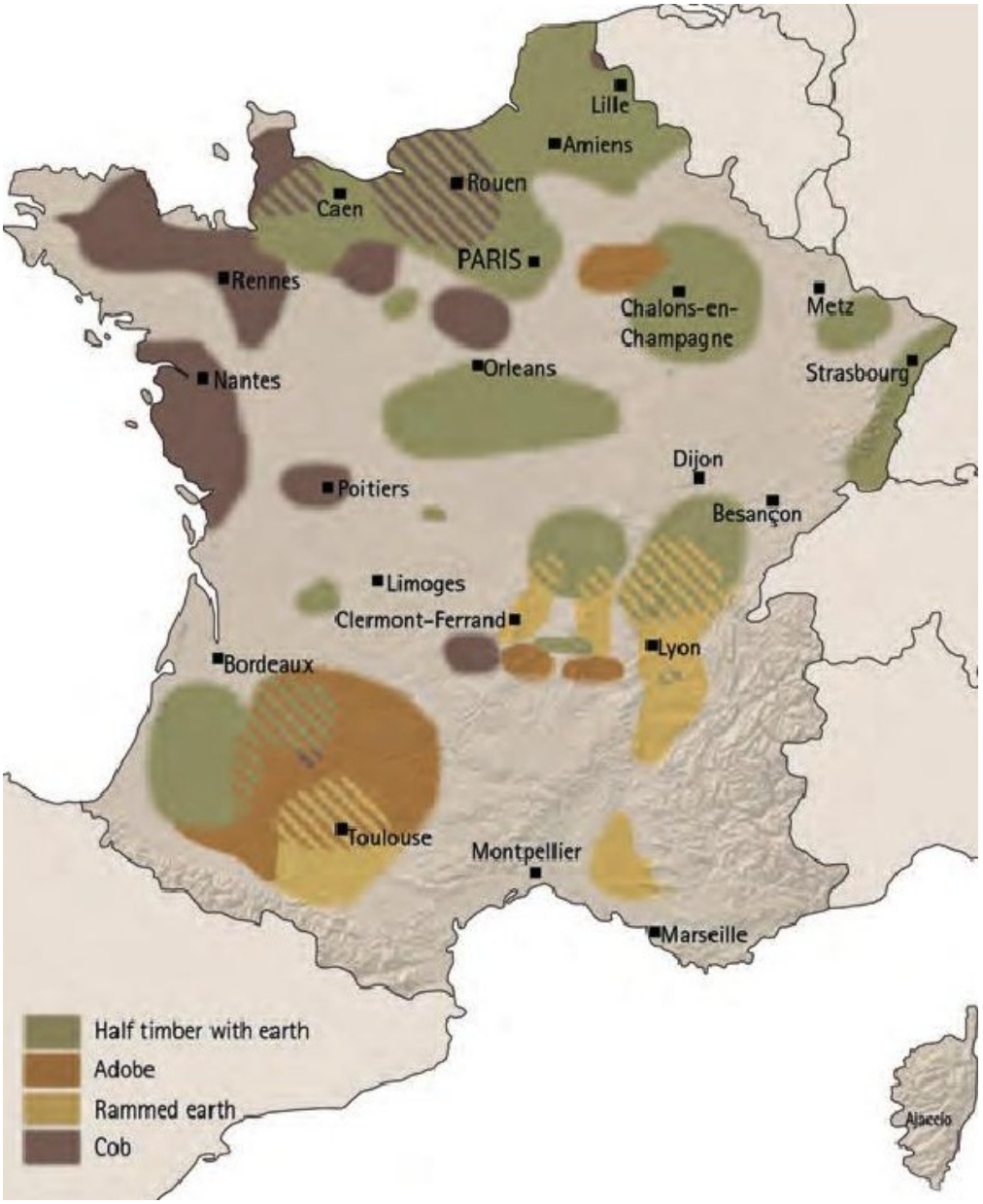


Figure 14 : Occurrence de quatre techniques-types de construction en terre crue en France hexagonale (Dipasquale et al. 2011).

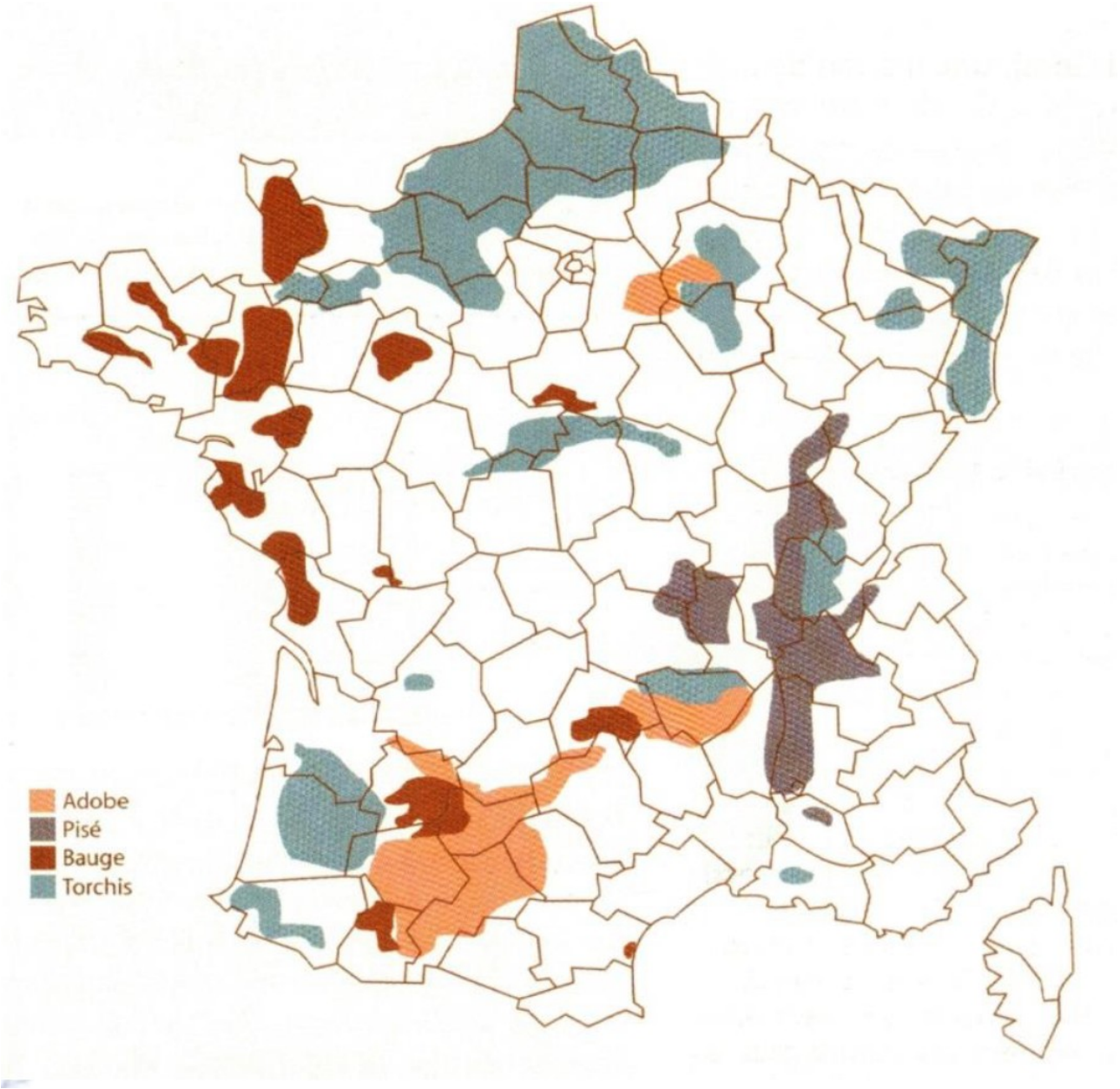


Figure 15: Occurrence des quatre techniques-types de construction en terre crue en France hexagonale. (d'après Guillaud 2006)

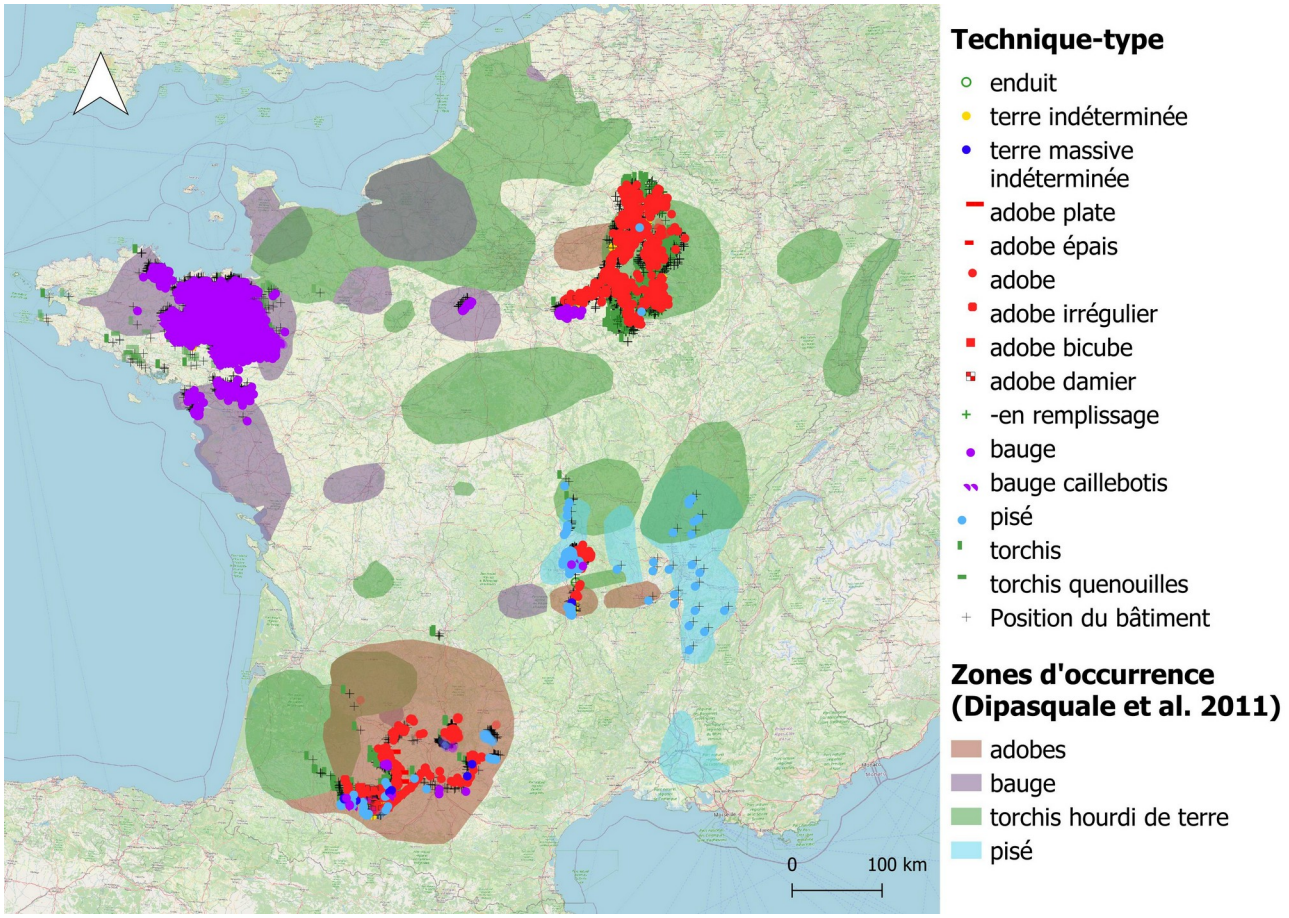


Figure 16 : Localisation des bâtiments en terre repérés au cours de cette étude et identifiés dans des bases de données patrimoniales existantes (points). Comparaison avec la carte de distribution du patrimoine bâti en quatre techniques-type de terre, selon Dipasquale et al. (2011).



Figure 17 : Techniques de construction en terre crue repérées dans le village de Haget (Gers).

3 Conclusion : parfois construire, mais avec soin

> « N'ayons pas peur d'affirmer que la mise en place d'alternatives durables implique une sortie du capitalisme, sans quoi les majors du BTP […] n'auront cesse de poursuivre la « récupération de pratiques ancrées à l'origine dans des modes de production vernaculaires ou dans les contre-cultures marginales ».» (Lavigne 2011 dans (La Facto 2023:30))

À l'image de l'adjuvantation hydraulique dans la masse du mur, du transport de la terre ou d'éléments préfabriqués sur plusieurs centaines de kilomètres, ou de la récupération mercantile du réemploi de terres d'excavation, certains procédés de mise en œuvre de la terre, dans certains contextes, peuvent résulter en un ensemble d'externalités négatives plus fortes encore que des solutions conventionnelles. Souvent limitée à l'« empreinte carbone », l'analyse de l'impact des choix techniques doit pourtant être conçue en considérant un prisme holistique des externalités possibles : à la fois sociales et environnementales. Cela inclut des conceptions économiques et politiques ; ce qui impose une prise de recul dans les travaux de recherche abordant ces thématiques (Avant-propos, 3).

La Figure 18 représente les principales étapes du cycle de vie d'un mur façonné via la technique-type de la bauge (2.3.2.2 , voir aussi Chapitre 2, 5.3). À chaque étape sont proposées des précautions de choix techniques qui nous paraissent des plus critiques s'il s'agit de réaliser un procédé sociétalement pertinent.

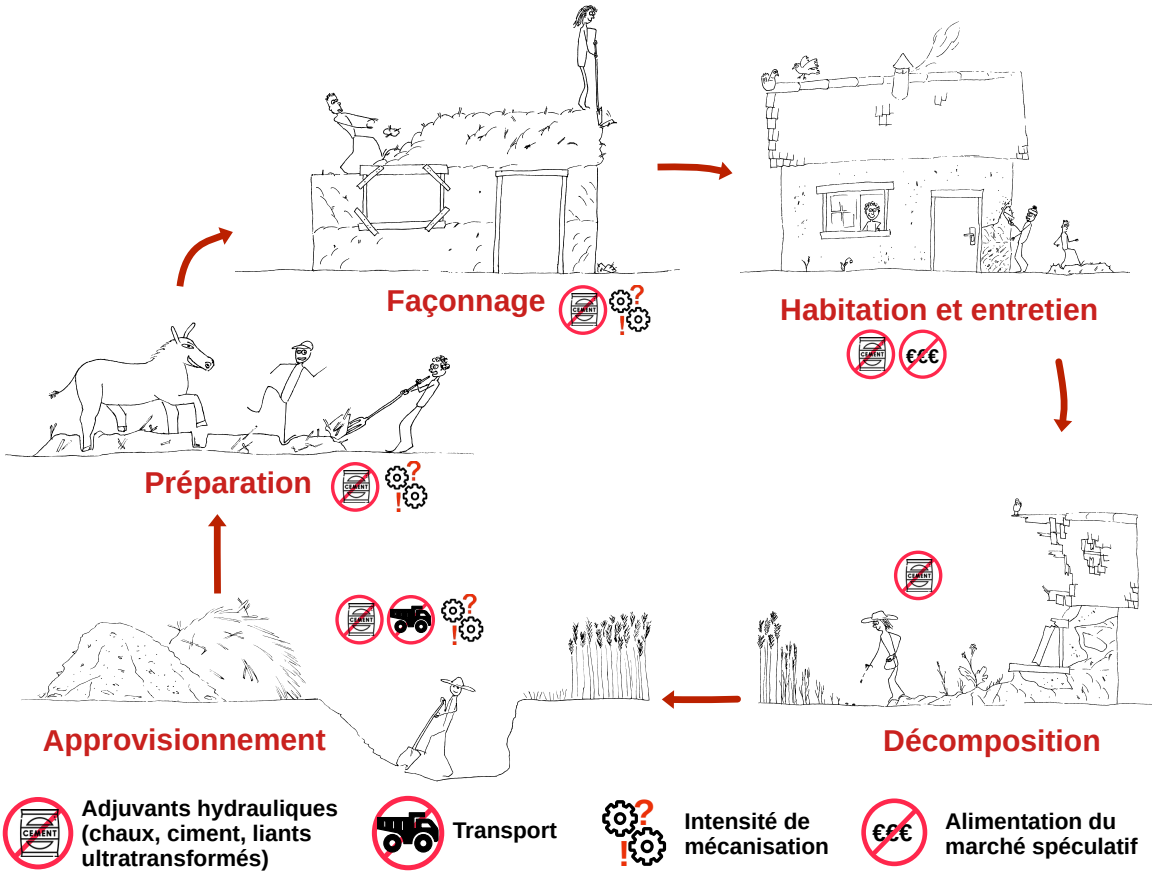


Figure 18 : Cycle de vie d'un mur en bauge, et conditions de pertinence sociétale pour chacune des étapes.*

3.1 Approvisionnement

L'étape d'approvisionnement consiste en un procédé d'extraction de la terre, ainsi que la culture ou cueillette des fibres. Un certain transport est souvent nécessaire pour apporter la matière à l'espace de préparation. Cependant, la terre est un matériau lourd, et du fait de l'épaisseur des murs de bauge, de grandes quantités doivent être transportées. Du point de vue des impacts environnementaux, l'approvisionnement par transport motorisé de la terre ou d'éléments préfabriqués sur plusieurs centaines de kilomètres devient très vite contre-productif par rapport à d'autres solutions conventionnelles* (Higuera Romero 2023).

Les « matières premières » nécessaires à la construction en bauge peuvent être immédiatement disponibles et gratuites ou peu coûteuses, ce qui permet aux classes sociales les moins aisées de se fournir en matériaux de construction. C'est d'autant plus pertinent si l'on considère que ce sont finalement ces groupes sociaux qui ont par ailleurs le plus de difficultés à accéder à des logements décents. Cet accès libre et immédiat est également un gage d'indépendance de procédés industriels dont on ne maîtrise pas les impacts. L'adjuvantation hydraulique à la chaux, au ciment ou à d'autres liants industriels ne permet plus cette indépendance économique.

Enfin, la mécanisation de cette étape (pelleteuses thermiques) peut être questionnée dans la mesure où elle implique une consommation conséquente d'énergie non métabolique*. Mais dans le contexte contemporain cette étape est la plupart du temps externalisée, du fait de l'existence de procédés de

terrassement à proximité (1.3). Par ailleurs, en l'absence de terres à disposition l'extraction de la terre semble être l'étape la plus couramment mécanisée, peut être du fait d'un bon rapport « pénibilité évitée / externalités négatives ». Malgré tout, l'extraction manuelle peut s'avérer un travail collectif épanouissant s'il est réalisé de manière ergonomique* et extensive*.

3.2 Préparation et façonnage

La terre est homogénéisée au cours de l'étape de préparation. Souvent, de l'eau et des fibres sont ajoutées au mélange. Afin de pétrir un mélange relativement ferme, c'est souvent par poinçonnement que le mélange est homogénéisé, par piétinement humain ou animal. Puis, le mélange à consistance plastique (voir 5.2.3) est modelé pour former un mur. Au cours de ces deux étapes, peu ou pas d'outils sont nécessaires, faisant de la bauge une des techniques-types traditionnelles nécessitant le moins de capital-outil* initial. On peut envisager une bonne inclusivité dans la participation à un chantier terre crue comme la bauge, car le matériau lui-même n'est pas dangereux. Les outils et adjuvants employés peuvent en revanche affecter l'accessibilité du chantier.

Les constructeur.ices sont en contact direct avec le mélange plastique: c'est une des raisons pour lesquelles l'adjuvantation hydraulique, agressive pour la peau, peut rendre pénible ce type de mise en œuvre. La manipulation des adjuvants hydrauliques en poudre présente d'autres risques, notamment respiratoires qui affectent les maçon.nes conventionnel.les (Gharpure et al. 2021).

La mécanisation de l'étape d'homogénisation est complexe pour la bauge, du fait de l'état plastique de la matière («Bosi» 2022; «Dugelay» 2022a), mais des outils spécialisés peuvent être employés (Hamard, Le Guen, et al. 2020). Comme pour la mécanisation de l'extraction, la consommation énergétique est inévitable, mais la productivité peut être considérablement accrue. Cependant, une transformation du rapport au chantier par la mécanisation, qui « dicte la cadence » («Dugelay» 2022a) au lieu de l'accompagner (Pillon 2012), et qui brise le silence et l'ambiance du chantier non mécanisé. Cela transforme les rapports sociaux : « tout le monde se met à courir au rythme du malaxeur » («Dugelay» 2022a), « il faut crier pour s'entendre » («Cornu» & «Dugelay» 2022). En ce qui concerne l'étape de façonnage, seuls des procédés complexes de robotisation peuvent approcher sa complexité : il est probable que cette dérive technologique et les chaînes de productions mondialisées qu'elle mobilise fasse perdre les intérêts sociétaux attendus de la terre crue. Surtout, le façonnage est probablement l'étape la plus satisfaisante, ergonomique* et créatrice de liens de l'ensemble du procédé (Figure 19). Pourquoi chercher à éviter du travail désirable ?



Figure 19 : Lancer de motte de terre sur deux chantiers type bauge. Une étape appréciée des constructeur.ices, quelle que soit leur degré d'expertise.

3.3 Habitation et entretien

Le matériau terre crue peut permettre de remarquables performances d'usage pour les éléments bâtis, notamment d'un point de vue hygrothermique, acoustique ou encore esthétique (1.2). La perméabilité hygrique et une partie de l'inertie/déphasage thermique de la terre est cependant perdue en cas d'adjuvantation au ciment (1.4.1). Par ailleurs, ces qualités ne sauraient être valables seulement si le bâtiment est effectivement *habité*. Éviter de construire sera toujours plus performant que bâtir en alimentant le gisement de logements vides (1.1). Si les acteur.ices de la construction en terre crue n'imposent pas un usage utile, par exemple dans des logements sociaux, ou pour des primo-propriétaires et autres précaires, le matériau terre ne deviendra qu'un « autre produit du catalogue », haut de gamme, donc réservé aux classes aisées (Marcom 2007 dans (Poste 2020) et à faible intérêt social. La plus-value qualitative de la terre ne doit pas être captée par des grands propriétaires. Pour cela, les dispositifs de logements sociaux se révèlent des outils précieux, bien que régulièrement mis a mal par les politiques du logement. D'autres alternatives plus discrètes émergent : des sociétés foncières coopératives telles que le Clip[21] proposent des montages juridiques permettant une sortie durable des biens immobiliers du marché et un passage à des fonctionnements de propriété d'usage.

3.4 Fin de vie : décomposition

Le matériau terre *crue* peut être gage de durabilité illimitée, car son entretien suit des procédés semblables à son façonnage : sain, économique et réversible, il est aisé à entretenir par les usagèr.es si la transmission des bonnes pratiques est réalisée. Les nombreux bâtiments pluriséculaires bâtis en terre rappellent que la durée de vie potentielle de ce matériau peut être bien plus conséquente que celle de la plupart des matériaux conventionnels. En comparaison, la durabilité des ouvrages de béton armé dépasse difficilement le siècle du fait de la corrosion inévitable des armatures métalliques (UNEP & YCEA 2023).

Un mur en terre *crue* bien entretenu peut durer des siècles, mais s'il est détruit, il présente l'avantage de ne pas alimenter le flux considérable de déchets du secteur de la construction : 240 Mt en France en 2018, soit deux tiers de l'ensemble des déchets produits (ADEME 2023). En l'absence de liants hydrauliques, la terre est réversible donc réemployable (1.2). Sinon, l'ensemble de ses composants peuvent se réintégrer au sol, la fraction organique (bois, fibres…) s'y décomposant.

3.5 Massifier la construction en terre crue ?

Présentée ainsi, la construction en terre crue semble pouvoir s'intégrer au sein de cycles avec peu d'intrants et d'externalités négatives. Mais dans une société organisée autour de l'abondance énergétique et de l'exploitation du travail, les dérives vers des procédés néfastes sont courantes : adjuvants écocidaires (1.4), mécanisation démesurée (2.3.3.3), dérive marchande (1.1), etc.. La nécessité d'une sobriété radicale est d'autant plus centrale si l'on considère l'ensemble du contexte, et non seulement l'empreinte carbone et/ou le coût financier dans une comparaison directe « par mètre carré » avec les procédés industriels. Car s'il n'est pas nécessaire de construire massivement des logements neufs, à quoi bon « massifier » la construction neuve en terre crue, aussi vertueuse soit-elle par rapport au béton de ciment ? En sortant de la nécessité et de l'urgence, le chantier terre crue apparaît plutôt comme un lieu d'émancipation sociale, de démonstration d'autres possibles, que comme un procédé rationalisé sur les coûts et bénéfices où il faudrait faire des compromis pour faire avancer la « cause » de la construction en terre. S'il convient de garder à l'esprit ces considérations idéalistes, des compromis doivent souvent être trouvés sur le terrain par les constructeur.ices. On

21 https://clip.ouvaton.org/quest-ce-que-le-clip/

pense par exemple à la mécanisation de techniques de rénovation employant des matériaux paysans qui pourrait bénéficier au parc de logements sociaux, ou l'accompagnement à l'auto-construction de logements neufs si elle donne accès au logement aux perdant.es du système économique.

4 Problématique : la variabilité des sols comme frein au déploiement de la terre crue ?

Les raisons pour lesquelles le secteur de la construction n'adopte pas les techniques de terre crue dans ses pratiques courantes sont principalement organisationnelles, politiques, sociologiques et économiques (Pelé-Peltier 2023). Il n'y a pas vraiment de problèmes techniques majeurs à l'emploi de la terre crue (Pelé-Peltier 2023), ce que montre d'ailleurs la dynamique de la filière et la diversité des pratiques employées (Vinceslas 2019).

Pourtant, de nombreux.ses acteur.ices du champ de la terre crue expriment un ressenti de « manque de guides techniques et de textes de références » relativement à ce matériaux dans le secteur de la construction (Pelé-Peltier 2023). En France, le déploiement de guides techniques ne viendrait en effet pas combler un manque de savoir-faire, mais un manque de documents permettant la reconnaissance du système normatif et assurantiel Français des techniques de construction en terre crue (Pelé-Peltier 2023).

Parmi les requêtes de guides techniques que l'on peut constater dans la littérature académique se trouvent des requêtes relatives à la production d'outils adaptés permettant de prédire les performances des matériaux composés de terre crue à partir de leur composition intrinsèque. En effet, il est très fréquent que les terres à disposition ne soient pas adaptées aux standards existants et couramment employés, ce qui a été relevé comme un frein à l'emploi de la terre crue par « manque d'accès à la ressource » (Pelé-Peltier 2023). Il est vrai que toutes les terres ne sont pas compatibles avec toutes les techniques de construction. Lorsqu'une technique de construction est choisie, il n'est pas toujours possible de trouver une terre adéquate à proximité immédiate, particulièrement en ville (Wright and Thorpe 2015 dans (Pelé-Peltier 2023)). Ainsi, la variabilité de la ressource terre est vu comme un frein à l'emploi de la terre crue (Lu and Liu, 2013, dans (Pelé-Peltier 2023)). Le secteur de la construction conventionnelle est en effet adapté à des matériaux standardisés et homogènes (Harries et al. 2020 dans (Pelé-Peltier 2023)). C'est ainsi une « contrainte » commune à la plupart des matériaux paysans (Vinceslas 2019). Pourtant, dans le cadre de l'emploi artisanal des techniques de construction en terre crue, cette variabilité ne pose pas de problème particulier (Vinceslas 2019:26). En effet, les artisan.es adoptent généralement une démarche d'adaptation, en choisissant une technique adaptée aux propriétés des terres à disposition (Morel et al. 2001; CCTC 2018, 2023; Rojat et al. 2020; Pelé-Peltier 2023).

Dans les territoires où du patrimoine bâti en terre est présent, le choix des techniques potentiellement adéquates aux sols locaux peut s'inspirer des pratiques historiques. En revanche, dans les régions où la terre n'a pas été employée par le passé, on peut se questionner sur l'importance des potentiels de déploiement de la terre crue. Comprendre les démarches qui conduisent au choix des techniques de construction en terre crue à partir des terres à disposition et les comparer avec les propriétés des sols du territoire hexagonal pourrait permettre de répondre à cette question.

Chapitre 1 : La « convenance des terres » dans la littérature académique



Résumé :

Il est généralement admis que toutes les terres ne conviennent pas pour toutes les techniques de construction. Construire en terre crue implique ainsi de rechercher une terre adaptée à la technique de construction choisie *a priori*, ou à choisir une technique de construction adaptée à la terre la plus immédiatement disponible. La première approche est nommée « convenance des terres » et repose sur la flexibilité du choix de la ressource (composition, site d'extraction). Elle est parfois mobilisée par des acteur.ices du BTP conventionnel* lorsque le choix de la technique de construction est décidé en amont de la connaissance des ressources disponibles sur site. La première approche, que l'on a nommé « convenance des techniques » est généralement celle des artisan.es. Elle considère la flexibilité du choix du procédé : en s'adaptant à la ressource disponible et aux besoins du projet, elle permet de réduire les impacts liés au transport de la terre en sollicitant l'expertise des constructeur.ices impliquées.

Dans les deux cas, comprendre l'influence des propriétés des terres sur les techniques de construction envisageable ou envisagées est nécessaire pour choisir la technique ou la terre. Les approches académiques actuelles semblent ancrées dans l'approche de « convenance des terres » : elles proposent des références de propriétés des terres sensées indiquer les terres « convenables » pour construire. Confrontées aux terres employées par les constructeur.ices historiques dans le patrimoine bâti, ces approches se révèlent insuffisantes ou erronées. Pourtant, ces approches académiques font référence et conduisent à des pratiques inappropriées en pratique sur des chantiers.

Alors, s'il s'agit d'affiner les prédictions, les propriétés des modèles d'évaluation doivent être questionnées. Sinon, peut-être s'agit-il de questionner le besoin de contrôle sur les propriétés des

matériaux, et d’explorer d’autres modèles décisionnels mettant en valeur le savoir-faire artisanal dans le choix technique et non seulement dans l’exécution des travaux.

1 L'inadaptation des références communément employées

Les *propriétés intrinsèques* d'un matériau terre crue sont les propriétés sensées être invariables quelles que soient la transformation qu'il subit : granulométrie, composition minéralogique, réactivité physico-chimique, *etc.*. Plusieurs auteur.ices se sont attaché.es à analyser les propriétés intrinsèques de matériaux issus du patrimoine vernaculaire* en terre crue, pour différentes techniques et dans plusieurs pays, et les ont comparées aux *références* relatives à ces propriétés proposées dans la littérature académique*[22] ou dans les normes du secteur de la construction.

1.1 Comparaison des propriétés de matériaux vernaculaires aux recommandations

Pagliolico et al. (2010) ont analysé 6 échantillons de briques d'adobes vernaculaires du 19ème siècle dans les Piémonts alpins au nord-ouest de l'Italie. Aucun d'entre eux ne rentre dans le fuseau granulométrique proposé par Houben & Guillaud (2006), pourtant très souvent utilisé comme information de référence (Figure 20).

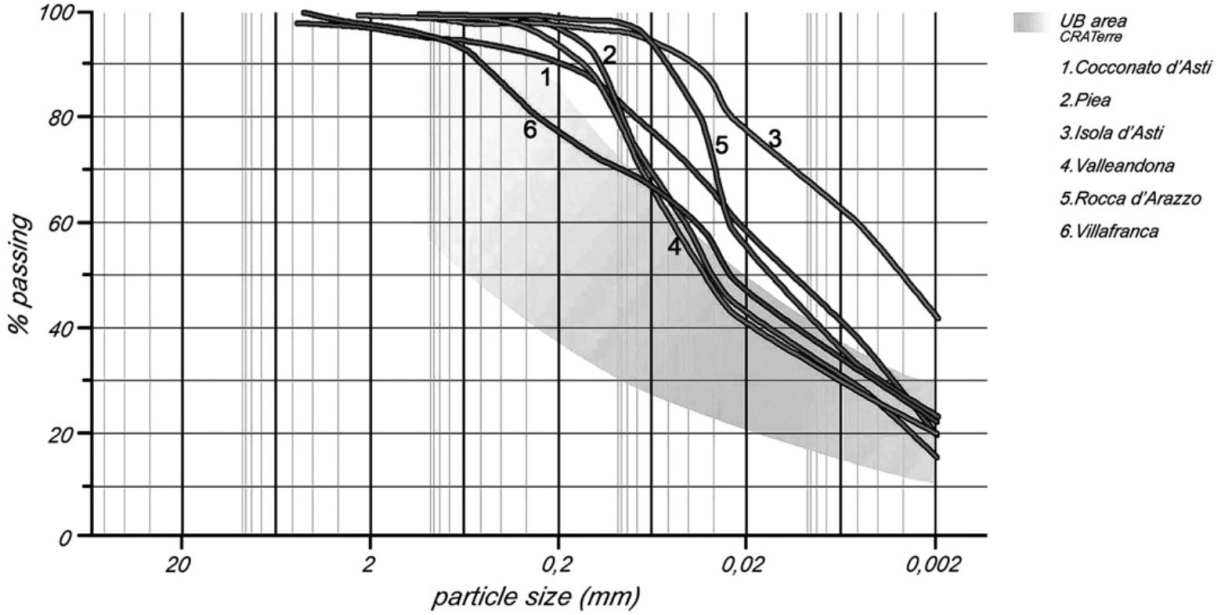


Figure 20 : Distribution granulométrique de 6 échantillons d'adobes comparés au fuseau granulométrique suggéré par Houben et Guillaud (2006) (Pagliolico et al. 2010).

Smith & Austin (1989) ont également analysé plusieurs dizaines d'échantillons de terre encore employées pour la confection d'adobes, BTC et pisé en 1989 au Mexique. En ce qui concerne les adobes analysés, la plupart contiennent moins de 10 % de passant granulométrique « argileux », parfois jusqu'à 1 %, ce qui est inférieur au seuil de 10 % recommandé par Houben & Guillaud (2006) pour ce même passant.

Gomes et al. (2014) analysent 6 échantillons de pisé vernaculaire du 19ème siècle dans la province d'Alentejo au sud du Portugal. Plusieurs propriétés sont mesurées et comparées aux recommandations : distribution granulométrique, plasticité, densité, retrait, teneur en matière organique, teneur en sels, minéralogie.

22 Académique*: qui relève de la recherche universitaire, du savoir produit par des professionnels de la production de connaissances. Les recommandations académiques sont celles qui sont disponibles sous forme écrite dans des publications dites « scientifiques » : revues à comités de lecture et ouvrages d'état de l'art. Voir lexique.

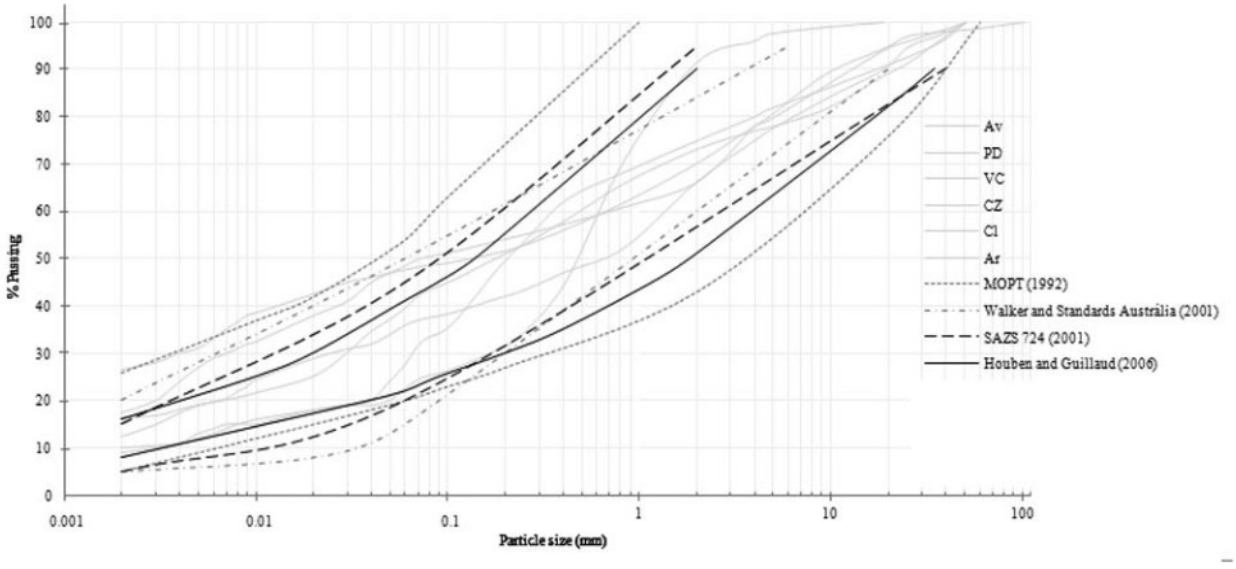


Figure 21 : Distribution granulométrique de 6 échantillons de pisé comparés à différents fuseaux granulométriques (Gomes et al. 2014).

Les auteur.ices comparent d'abord les recommandations entre elles et remarquent qu'elles sont relativement concordantes, mais ont des degrés de tolérance très variables (Figure 21). Les échantillons analysés sont globalement proches des limites les plus restrictives suggérées (Houben et Guillaud (2006), SAZS 724 (2001)), mais 4 des 6 terres les dépassent cependant, plus ou moins fortement. Gomes et al. relèvent que les autres fuseaux sont très larges : de nombreux sols rentrent dans ces limites. Malgré tout, une terre n'y rentre pas.

En ce qui concerne les recommandations sur la taille maximale des éléments grossiers du sol, Gomes et al. relèvent que les recommandations sont pour la plupart bien plus restrictives que ce qui est observé dans le patrimoine vernaculaire. Lorsque la justification des recommandations est explicitée, il s'agit de citations décrivant des précautions relatives à la résistance mécanique des éléments d'ouvrage et la fragilité de surface (Gomes et al. 2014).

Les recommandations sur les limites d'Atterberg[23] comparées aux échantillons analysés par Gomes et al. (2014) les amènent à la conclusion que certains sols ne rentrent dans aucune des recommandations. Notamment, deux des sols (Av & Cz dans l'étude) ne sont pas assez plastiques pour déterminer la limite de plasticité (LP), ce qui est contradictoire avec l'ensemble des recommandations suggérant une LP minimum. Pourtant, ici encore, ces bâtiments ont bien été construits, et perdurent plusieurs siècles après leur construction.

Pour l'optimum Proctor[24], aucun des sols ne satisfait les seules recommandations existantes de Houben et Guillaud (2006). En revanche, le retrait au séchage entre dans les limites recommandées, mais la diversité des modes opératoires possibles et la variabilité des résultats remet en question la cohérence de l'évaluation par rapport aux recommandations.

Pour la teneur en matières organiques, Gomes et al. (2014) remarquent encore un dépassement des seuils suggérés pour 4 des 6 sols testés : ils contiennent plus de 4 % de matières organiques y compris

23 Limites de teneur en eau indiquant des changements de consistance de la terre (voir Chapitre 2, 5.2.3).

24 L'optimum Proctor est la teneur en eau correspondant à la densité maximale obtenue lors de la compaction d'un échantillon de terre au cours d'un processus de compaction standardisé (compaction Proctor) (voir Chapitre 2, 5.2.4.1)

lorsque les macro-éléments (ex : racines) ne sont pas comptés, quand les recommandations suggèrent de maintenir ce taux en deçà de 2 à 4 %. Ici encore, les critères de sélection sont bien plus restrictifs que ce qui est observé dans le patrimoine vernaculaire.

En ce qui concerne leur teneur en sels, les éléments analysés ne présentent globalement pas de teneurs supérieures aux recommandations (Gomes et al. 2014).

Pour chacun des documents de recommandations analysées par Gomes et al. (2014), incluant des références académiques, des documents techniques et normatifs, la plupart des terres testées pour chacune des propriétés (distribution granulométrique, plasticité, densité, retrait, teneur en matières organiques, teneur en sels, minéralogie) ne peuvent être considérés « convenables » pour la technique du pisé. Or, ici encore, les bâtiments ont bien été mis en œuvre et ont résisté à l'épreuve du temps, montrant l'inadéquation entre les recommandations et les pratiques vernaculaires.

En 2016, Champiré et al. (2016) apportent 3 nouveaux exemples de terres issues du patrimoine vernaculaire en pisé en région Rhone-Alpine ne rentrant pas dans le fuseau granulométrique proposé par Houben et Guillaud (2006). Ces mêmes terres sont inclues dans une étude plus poussée sur 23 échantillons issus également du patrimoine en pisé Rhone-Alpin par (Rojat et al. 2020), qui pour la plupart ne rentrent pas non plus dans ce fuseau (Figure 22). Une représentation sur un diagramme de texture du sol est également proposée et permet de comparer les échantillons à d'autres recommandations granulométriques basées sur des quantités relatives de passants granulométriques argile/limon/sable (Figure 23). La comparaison aux recommandations relatives aux limites d'Atterberg montre ici aussi que de nombreux sols ne rentrent dans aucune des références suggérées. Quelques soient les références, les techniques ou les régions d'étude, on revient toujours aux mêmes conclusions : les informations de référence sur la granulométrie ne permettent pas d'intégrer la diversité des terres employées dans le patrimoine vernaculaire.

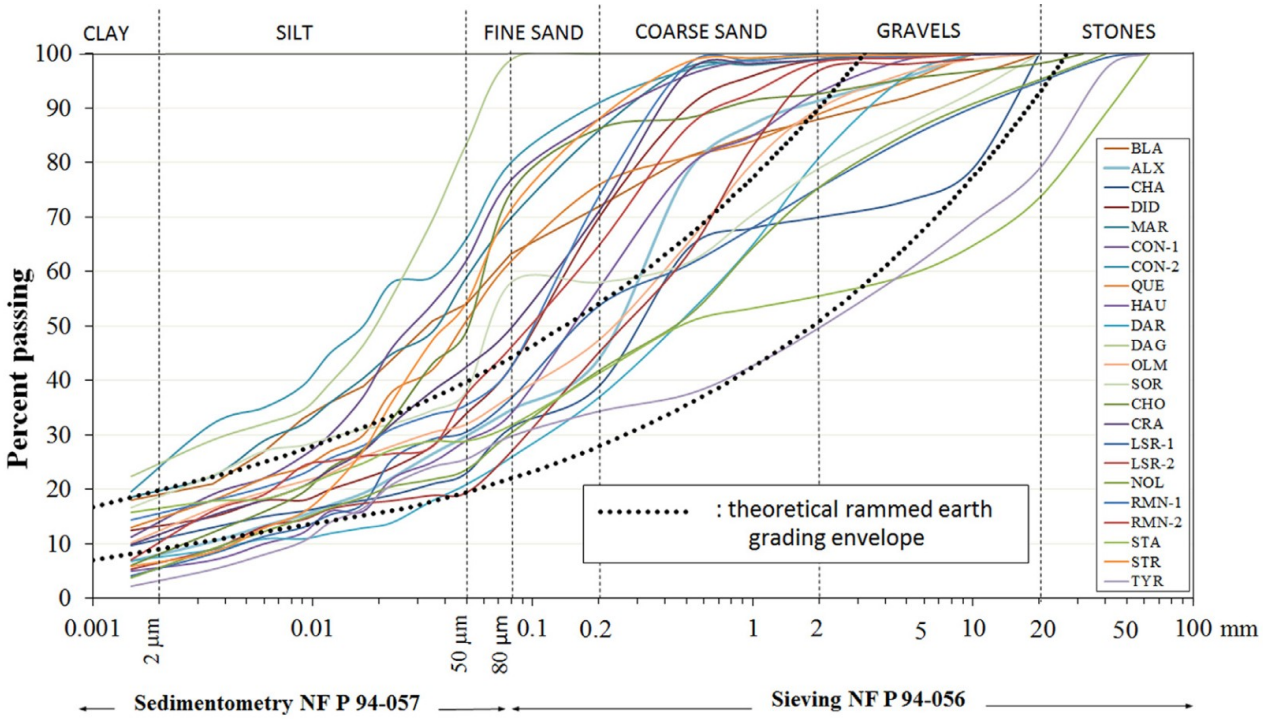


Figure 22 : Distribution granulométrique de 23 échantillons de pisé comparés au fuseau granulométrique de Houben et Guillaud (2006) (Rojat et al. 2020).

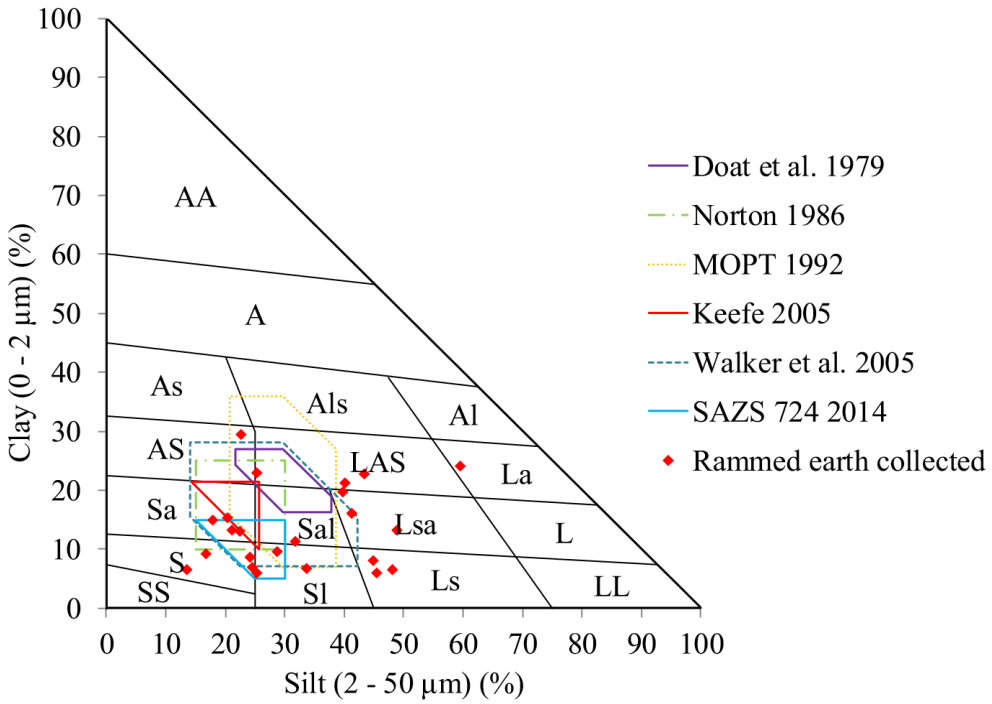


Figure 23 : Texture de 23 échantillons de pisé comparées à différentes recommandations sur la répartition des classes granulométriques, par Rojat et al. (2020).

Hamard et al. (2018) comparent la composition des sols sous-jacents à 7000 bâtiments géolocalisés en bauge avec celle de patrimoine vernaculaire construit en brique cuite et pierre en Bretagne, par croisement spatial le la localisation des bâtiments avec une base de données pédologiques[25]. En supposant que les terres employées pour l'édification soient similaires aux sols sous-jacents, ils représentent pour chaque unité pédologique la densité relative de bâtiments en bauge (nb bauge/nb vernaculaires). La composition granulométrique des unités pédologiques et les densités relatives correspondantes sont ensuite projetées sur le triangle des textures (Figure 24). Les plages de distributions des valeurs des sols à forte densité bâtie, a priori favorables à la bauge, sont comparées à des références de la littérature (Figure 25). Les plus fortes densités relatives de bauge sont identifiées pour des sols limono-argileux, alors que les recommandations de la littérature suggèrent préférablement des sols sablo-argileux (Figure 24). De plus, la teneur en graviers est faible à nulle dans les zones de forte densité bâtie en bauge, tandis que la plupart des références suggèrent une teneur minimum en élément grossiers. La teneur en argile n'est globalement pas loin des recommandations bien que supérieure, et les sols employés pour la bauge sont dans l'ensemble bien plus fins que ce qui est suggéré dans les références.

D'autres sources de données, issues d'analyses réalisées sur de nombreux échantillons en Allemagne et au Royaume-Uni, sont également représentées sur la Figure 24b. Elles semblent confirmer la tendance observée, à savoir une dominance des sols limoneux relativement aux sols sableux suggérés dans les références.

25 La méthode est décrite au Chapitre 3A (2.3)

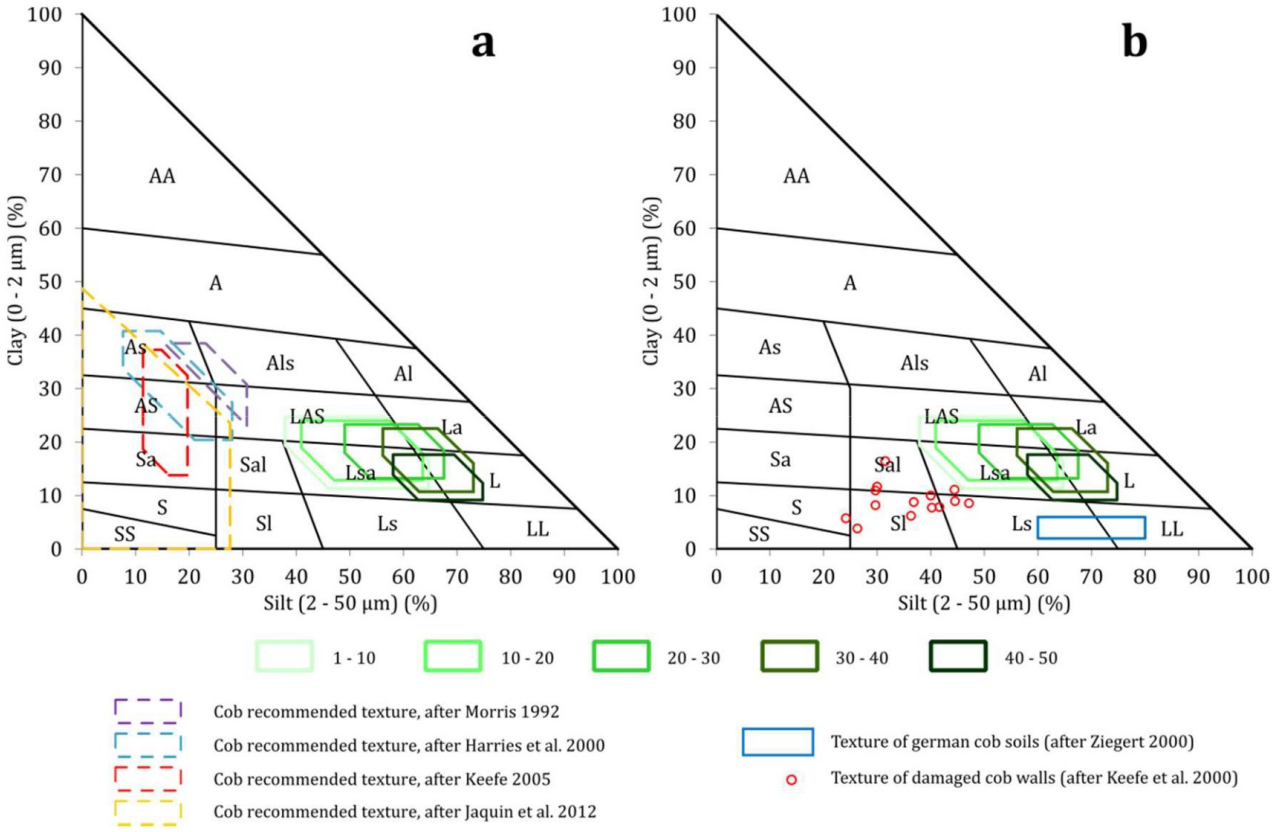


Figure 24 : Texture des sols employés pour la construction en bauge dans des bâtiments vernaculaires en Bretagne (dégradé vert par densité bâtie), Allemagne (bleu continu) et Royaume-Uni (points rouges, correspondant à des bâtiments présentant des pathologies) comparée à 4 seuils de référence (tirets discontinus) (Hamard et al. 2018). Dans cette représentation, la somme des classes granulométriques Argile/Limon/sable est égale à 100 %.

Accetta (2003) enquête sur l'adéquation entre les terres employées dans le patrimoine bâti en pisé et adobe et les références contemporaines sur des propriétés de composition des terres (fuseaux granulométriques et diagrammes de plasticité CRAterre). Il démontre ici encore l'existence de terres employées avec succès dans le patrimoine pluriséculaire et significativement plus « fines » que les terres recommandées, dans différentes régions d'étude (France, Espagne). Des essais mécaniques confirment par ailleurs que ce n'est pas la proximité au fuseau granulaire indiqué qui gouverne la résistance des éléments maçonnés, qu'ils soient issus du patrimoine ou façonnés pour l'essai.

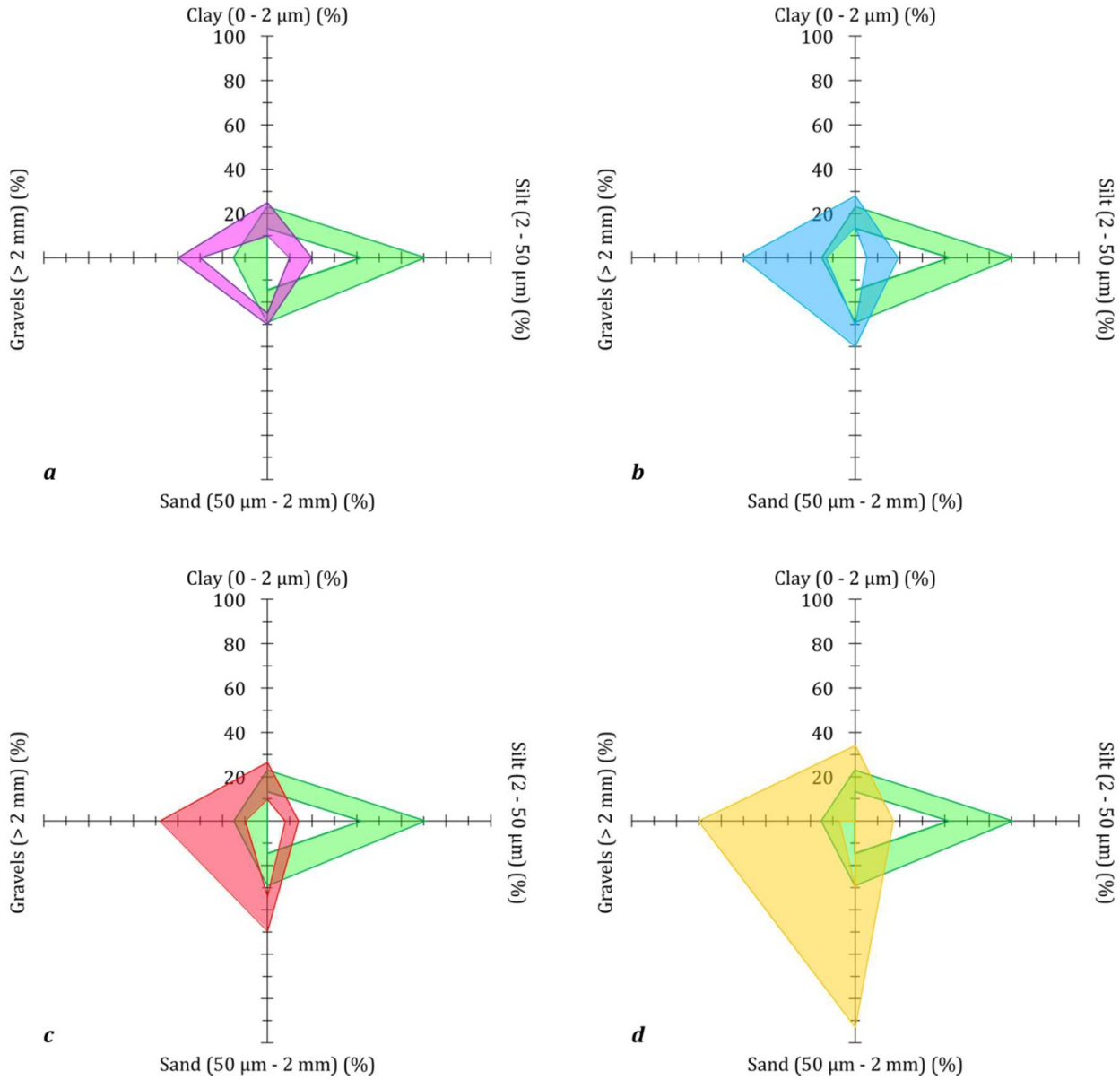


Figure 25: Fractions granulométriques 0-2µm, 2-50µm, 50-2000µm et >2000µm des sols employés pour la construction en bauge dans des bâtiments vernaculaires en Bretagne, comparées à 4 références issues de la littérature académique (Hamard et al. 2018).

1.2 Un début de consensus sur l'inadéquation des références courantes

Ces études analysent des matériaux issus de bâtiments vernaculaires* pré-industriel* (Pagliolico et al. 2010; Gomes et al. 2014; Aubert et al. 2015; Hamard 2017; Rojat et al. 2020) ou plus récents (Smith & Austin 1989) avec des quantités de données et méthodes d'analyse variables, et qui permettent dans certains cas de simples constats (Aubert et al. 2015; Champiré et al. 2016) ou des études plus statistiquement représentatives (Smith & Austin 1989; Hamard 2017; Rojat et al. 2020). Toutefois, même un simple constat de l'existence d'un bâtiment construit avec une terre ne satisfaisant pas les

référentiels techniques montre qu'il est possible de bâtir avec ce type de terre. Lorsque ces constats se répètent, on peut supposer que ces terres font partie du panel de terres bien adaptées à la technique.

En l'état, il apparaît que les recommandations auxquelles les auteur.ices se réfèrent ne représentent pas la diversité des terres employées dans les bâtiments vernaculaires. Cette incohérence indique premièrement la possibilité de construire avec chacune des techniques-types en dehors des références associées, notamment les fuseaux granulométriques, et donc a minima leur conception « trop étroite ». Comme indiqué par Rojat et al. (2020), les fuseaux granulométriques « échouent à représenter la diversité des terres employées pour la construction ».

Ce constat est établi dans la littérature académique au moins depuis les années 70, où le Garrec et al. (1978) remarquaient que de nombreux échantillons de terre issus du patrimoine vernaculaire bâti en bauge en Bretagne ne rentraient pas dans les recommandations granulométriques de l'époque, dont l'une semble être un fuseau granulométrique encore employé dans les recommandations de Houben & Guillaud (2006). Il a progressivement amené des chercheur.euses à questionner les recommandations, déclarant leur inadaptation par leur trop forte restriction (Accetta 2003; Pagliolico et al. 2010) et/ou l'inadaptation des propriétés choisies pour établir les critères, en particulier la granulométrie (Rojat et al. 2020; Fabbri et al. 2022).

Par ailleurs, il est souvent difficile de remonter à l'origine des recommandations. S'agit-il d'essais sur des matériaux ? Quelles sont les propriétés mesurées, et quels critères de validation ? Ou s'agit-il d'une estimation « à dire d'expert » ? Quelle est alors la représentativité des propriétés mesurées ou de l'expérience de ces acteur.ices de la diversité des pratiques historiques et contemporaines ? Accetta (2003) indique que le fuseau granulométrique proposé par CRAterre pour le pisé a pour origine le fuseau de Bolomey destiné à l'optimisation granulométrique des bétons de ciment. Or, on peut voir le béton de ciment comme « un cas particulier et récent du matériau terre crue » (Accetta 2003): restreindre l'emploi de terres à ce fuseau est au moins trop restrictif.

Après de tels constats et dans l'incertitude de ce que représente les recommandations communément employées, on peut se demander pourquoi celles-ci continuent de *faire référence* dans les travaux de recherche.

1.3 Une problématique qui dépasse le champ académique

Dans le contexte constructif contemporain basé sur la normalisation des matériaux, et en l'absence de standards consensuels sur des recommandations de *propriétés intrinsèques* idéales pour le matériau terre crue, l'existence de données de comparaison – quelque soit leur origine – semble entraîner leur utilisation au-delà de leurs condition de validité. Autrement dit, que les auteur.ices cherchent ou non à imposer ces données comme références, celles-ci très rapidement *font référence* dans et en dehors du champ académique. Ainsi, des analyses de la composition du sol et leur comparaison à ces références sont souvent « exigées par les bureaux de contrôle dans le cadre des chantiers terre crue » (« maçon-ingénieur » dans).

Des références restreignantes, par exemple des fuseaux trop étroits, pourrait provenir d'un principe de précaution, prémunissant de l'emploi de terres dont les propriétés finales ou de long terme ne seraient pas garanties. Cependant, les statistiques sur les édifices vernaculaires pré-industriels montrent bien que ces bâtiments ont passé l'épreuve du temps et ce, malgré un « entretien » parfois fort néfaste à leur stabilité (Contexte, 2.2). Avec la reprise inconditionnelle des recommandations, les fuseaux étroits entraînent une méfiance envers les terres qui n'y rentrent pas, surtout dans les contextes où des expert.es non praticien.nes sont aux commandes des choix techniques*. Or, il est très fréquent que les terres à disposition ne soient pas adaptées aux standards, ce qui a été relevé

comme un frein à l'emploi de la terre crue par « manque d'accès à la ressource » (Pelé-Peltier 2023) (Contexte, 4). En exacerbant les inquiétudes relative aux performances mécaniques des matériaux terre crue lorsqu'ils ne rentrent pas dans les standards (Luquain 2021), cette méfiance peut ainsi nuire à une réappropriation du matériau, pour plusieurs raisons :

(1) L'approche par caractérisation préalable en laboratoire pour comparaison aux standards « représente un coût temporel et financier conséquent, pouvant parfois entraîner le découragement des acteur.ices impliqué.es dans le projet et l'abandon de l'utilisation de la terre crue » (Rinino 2021b).

(2) Elle peut nuire aux performances sociétales* des procédés de construction en terre, en :

- incitant à la « correction granulaire » par l'ajout de granulats issus de filières extractivistes* ou même de liants hydrauliques (Rojat et al. 2020);

- incitant à écarter les terres à disposition immédiate, ce qui implique l'importation de nouvelles terres (Accetta 2003).

Cela est particulièrement important dans un contexte où le choix technique se fait trop[26] souvent *a priori* de la connaissance des propriétés de la terre du site de construction (Goizauskas 2019). Cette façon de faire se ressent dans certaines études analysant les liens entre propriétés de la terre et potentiels techniques pour les techniques de terre crue : lorsqu'une terre ne convient pas à la technique choisie, il est recommandé de changer de terre (Maniatidis & Walker 2003), de la modifier par « correction granulaire » en ajoutant des agrégats (Maniatidis & Walker 2003; Arrigoni et al. 2018; Koutous & Hilali 2019a; Dialmy et al. 2023; Ji et al. 2023), plus rarement par mélange avec une autre terre (Dialmy et al. 2023, 2023) ou encore d'ajouter des adjuvants hydrauliques (Maniatidis & Walker 2003; Silva et al. 2013; Danso 2018). L'ajout de fibres végétales est rarement proposé (Ji et al. 2023). Les recommandations sont souvent énoncées de manière très catégorique ce qui donne une impression de certitude :

> « L'étude suggère que plusieurs tests doivent être réalisés sur les échantillons de sol pour la construction en terre, et si l'un des tests est hors des recommandations, alors l'emploi de stabilisants devient nécessaire. […] tout sol identifié comme non convenable devra être amélioré par des stabilisants avant l'emploi dans la construction en terre crue. » (Danso 2018) (traduit de l'anglais)

A l'opposé de l'adaptation des techniques à la disponibilité des matériaux locaux, la « correction » des matériaux en vue de les adapter à une technique pré-sélectionnée est une stratégie que l'on peut qualifier de « hors sol ». On peut dire qu'elle se situe dans le prolongement des techniques de construction conventionnelles* où c'est le site de construction qui s'adapte aux techniques choisies, notamment par la puissance des techniques de terrassement (Meulemans 2019).

A l'inverse, l'existence de références recommandant des typologies de terres peut inciter à une sur-confiance en le matériau considéré « convenable », alors que les *propriétés d'usage*[27] d'un matériau dépendent au moins en partie de la qualité de la mise en oeuvre. Nous supposons que cette sur-confiance pourrait être accentuée par l'impression d'un consensus sur les propriétés recommandées :

26 C'est un constat récurrent des constructeur.ices terre crue, auquel on présente un ouvrage déjà dessiné qu'il s'agit de mettre en œuvre. En réponse, certains collectifs d'artisan.es proposent un accompagnement de la maitrise d'oeuvre dès le début du projet pour le choix des techniques, par exemple le Collectif des Terreux Armoricains : https://webmaster50050.wixsite.com/terreux-armoricains/le-collectif.

27 Les propriétés d'usage* d'un élément construit en terre crue sont les propriétés qui importent au cours de sa vie de service. Des propriétés d'usage souvent considérées sont sa solidité, sa durabilité, voire des considérations esthétiques.

par leur emploi généralisé (et peu questionné jusqu'à récemment) ; par leur « revalidation » permanente dans des études, où l'adéquation aux standards est indiqué comme « preuve » de leur pertinence parfois avec très peu d'échantillons. Par exemple, Lagouin et al. (2021) et Ji et al. (2023) indiquent les propriétés granulométriques comme pertinentes pour la sélection des sols pour construire après des essais sur seulement 4 terre naturelles différentes, dans les deux cas. De plus, puisque l'origine des recommandations est rarement explicitée dans les documents les proposant, il est difficile de savoir si celles-ci ne s'inspirent pas les unes sur des autres, ce qui donnerait une fausse impression de multiplicité de références concordantes. Par exemple, dans le cas des quatre références de limites granulométriques employées par Hamard (2017) pour la bauge (Figure 24a), aucune ne précise exactement comment les limites sont définies. Il est possible que les plus tardives aient été influencées consciemment ou non par les premières, conduisant à cette superposition manifeste sur le triangle des textures. Cette sur-confiance peut notamment conduire à des désordres, observés par des artisan.es par exemple suite à l'usage de terres vendues « prêtes à l'emploi » mises en œuvre par des personnes non formées au matériau terre crue[28]. En ne respectant pas les règles de base de l'usage du matériau terre (CCTC 2018), très différentes de celles des matériaux cimentaires conventionnels, des pathologies peuvent rapidement apparaître. Ces désordres nuisent à l'image d'un matériau qui subit déjà de nombreux préjugés quant à sa pertinence constructive.

Les problématiques que posent les incohérences entre les observations et les recommandations dépassent donc le champ académique et il est possible qu'elles impactent négativement la réappropriation collective de ces techniques vernaculaires. C'est en tout cas l'inquiétude de nombreux.ses artisan.es (Pruvost 2021a) et l'un des moteurs de leur regroupement pour la rédaction des Guides de Bonnes Pratiques (CCTC 2018). Cette remarque est par ailleurs valable pour les autres matériaux dits « naturels », car la variabilité de leurs propriétés se heurte à des cadres normatifs adaptés aux matériaux industriels* normalisés aux propriétés homogènes (Lecompte 2020). Mêmes non soutenues par un travail de normalisation légal, les références ont une portée normalisante « *de fait* » dans le secteur du bâtiment, en favorisant le soutien d'acteur.ices presque incontournables comme les assurances pour les techniques reconnues dans les référentiels techniques (Pelé-Peltier 2023:167). L'exemple du chaux-chanvre est démonstratif : les DTU (Document Techniques Unifiés)[29] produits par l'association « construire en chanvre », rassemblant producteur.ices de chanvre, industriel.les chaulièr.es et artisan.es (Lecompte 2020), sont difficiles à obtenir pour les petit.es acteur.ices car les démarches de certification sont longues et onéreuses[30] (Nomadéis 2012). L'établissement de ce type de norme, sensées « favoriser le déploiement de la filière chanvre », mais adaptées uniquement aux procédés industriels (Nomadéis 2012), ont été mises en place par les entreprises industrielles et les organisations les regroupant via un lobbying efficace sur les organisations publiques (Lecompte 2020). L'emploi du chanvre local, favorisée par l'association Chanvriers en Circuits Courts, est de ce fait défavorisé car leur « assurabilité » est comparativement moins bonne. L'accélération ou « massification » permise par la normalisation peut donc déboucher sur une perte de pertinence des choix techniques.

Si l'on admet que toutes les recommandations sont issues d'un travail de comparaison, empirique* ou académique*, de performances constructives des matériaux en fonction de leurs propriétés intrinsèques, cette incohérence peut alors avoir plusieurs origines :

28 Cette problématique nous a été confiée par des artisan.es au cours de discussions informelles.
29 Le contexte normatif français est décrit dans la thèse de Pelé-Peltier (2023)
30 Constat partagé par des membres de l'association Chanvriers en Circuits Courts, qui cherchent à faire évoluer cet état de fait en proposant une certification de pair à pair. https://actu.fr/normandie/mortagne-au-perche_61293/noce-les-chanvriers-se-retrouvent-dans-le-perche_5706343.html

- les *propriétés de prédiction** (ex : classes granulométriques) utilisées pour prédire les *propriétés cibles** (ex : mécanique) ne sont pas les bonnes. Par exemple, les classes de dimensions granulométriques ne sont peut-être pas les *propriétés de composition** apportant le plus de discernement.

- les *propriétés cibles* optimisées dans la comparaison de performances ne sont pas celles qui gouvernent les choix techniques relatifs à la ressource en pratique.

- les choix techniques sont faiblement guidés par la ressource à disposition et découlent d'autres variables environnementales ou sociales.

La première possibilité est discutées ci-après. Elles a été envisagée en réponse à ces constats par plusieurs auteur.ices. Les deux dernières n'ont, à notre connaissance, pas encore été explorées dans le champ académique.

2 Voies de réponses existantes

Face au constat de l'inadéquation des recommandations relatives aux caractéristiques des éléments de terre crue présents dans les bâtiments vernaculaires, plusieurs stratégies d'adaptation des classifications existantes sont suggérées dans la littérature académique :

- Adapter les classifications en modifiant les seuils existants sur les mêmes *propriétés prédictives* (p. ex. granulométrie) (2.1);

- Adapter les classifications en proposant d'autres *propriétés prédictives* paraissant plus pertinentes ou en les combinant à celles couramment utilisées, tout en restant dans des classifications par seuils simples (2.2);

- Adapter les classifications en passant de seuils simples à des modélisations plus complexes à partir des mêmes *propriétés prédictives* (2.3) ;

- Passer à une approche dite *performancielle*, où l'adéquation d'une technique à une terre est validé par des essais des *propriétés d'usage* recherchées directement sur des échantillons maçonnés dans des conditions représentatives de celles du chantier (2.4).

2.1 Modifier les seuils

Pagliolico et al. (2010) recommandent de modifier les seuils, par exemple en les « adaptant localement aux matériaux analysés dans le patrimoine bâti existant », sans expliciter la méthode permettant cette adaptation. Cette proposition sous-entend que des seuils granulométriques restent pertinents dans la classification des sols relativement à leur convenance pour la construction en terre crue (ou au moins, en pisé).

Cuccurullo et al. (2021) évaluent la variation des performances mécaniques d'un matériau composé de terre crue lorsque sa distribution granulométrique est amendée par l'ajout de sable (Figure 26). Les deux matériaux sont hypercompactés à 100 MPa[31] à la teneur en eau optimale, et un second échantillon du matériau non amendé est compacté à la dame Proctor à la teneur en eau optimale. Après conditionnement à différentes humidités relatives, les échantillons sont testés en compression. On observe que, quelque soit le conditionnement, l'échantillon amendé hypercompacté présente une résistance en compression moins importante que l'échantillon non amendé hypercompacté ou que

31 L'hypercompaction est dite « statique » et son intensité est donnée en MPa (pression par unité de surface) ; tandis que la compaction Proctor est dite « dynamique », sa force est donnée en kJ/m³ (énergie par unité de volume). Ces intensités ne sont donc pas directement comparables mais des équivalences sont possibles (voir Chapitre 2, 5.2.4.1) : la compaction Proctor équivaudrait à une compaction statique de quelques MPa seulement.

celui non amendé compacté à l'optimum Proctor. Les auteur.ices concluent que la *correction granulaire*, c'est à dire l'amendement en granulats (sable ou graviers) visant à faire entrer un matériau dans les standards n'est pas une garantie d'amélioration de ses performances mécaniques. Ils suggèrent que en revanche que la régularité de la distribution granulaire, garante d'une densité optimale, permettent de bonnes résistances mécaniques.

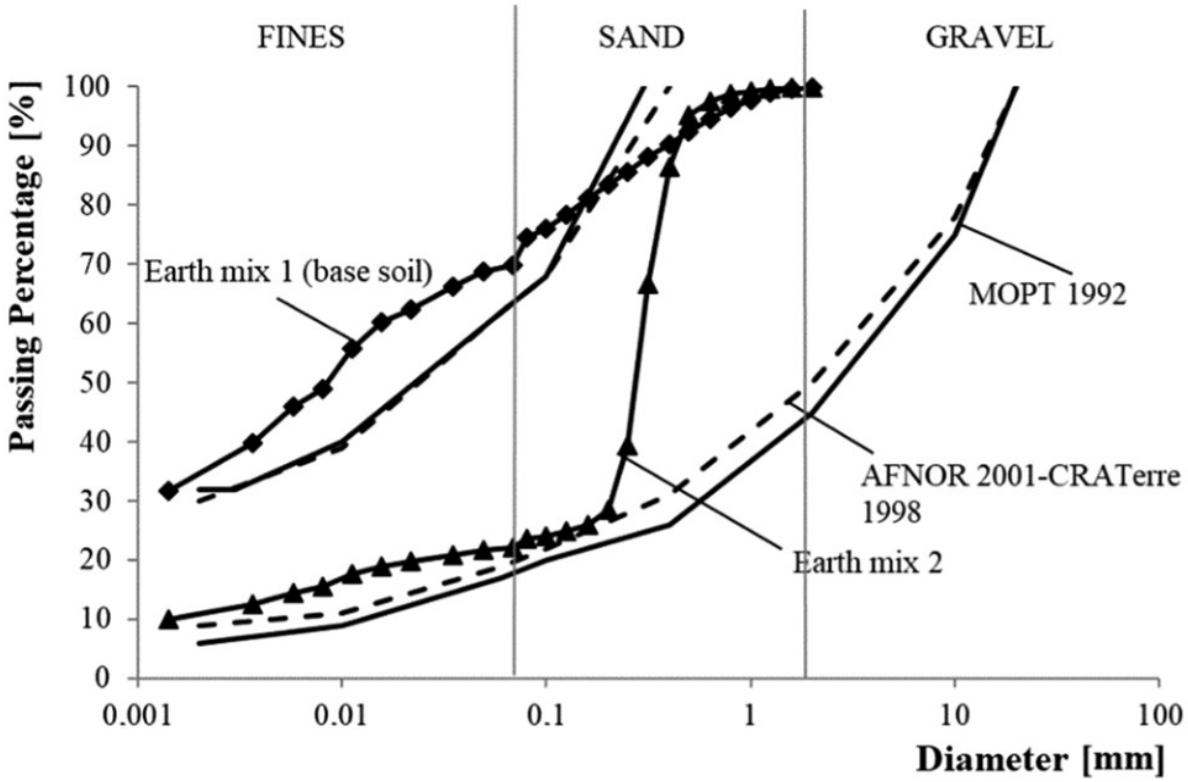


Figure 26 : Distribution granulométrique du sol non amendé (Earth mix 1) et du sol amendé de 68 % de sable (Earth mix 2), comparés aux deux fuseaux granulométriques les plus restrictifs référencés par Gomes et al. (2014) (voir Figure 21) (Cuccurullo et al. 2021).

Ces résultats sont « exploratoires », dans la mesure où ils n'ont été réalisés que sur un échantillon de terre, ce qui n'est pas représentatif de la diversité des propriétés des terres rencontrées en France (et encore moins dans le monde). De plus, s'il est vrai qu'avec une forte teneur en sable ajouté (+68% massiques), les caractéristiques granulométrique du matériau amendé entrent dans le fuseau de Houben et Guillaud (2006), on ne sait pas si elles rentrent également dans les recommandations relatives aux limites d'Atterberg de ces mêmes auteurs. Il est pourtant probable qu'elles en sorte, contrairement à ce qui est supposé par les auteur.ices de l'expérience. On peut alors se demander si la réduction conséquente de la fraction la plus fine, *a priori* plus cohésive, n'est pas à l'origine de la chute de résistance mécanique, plutôt que la mauvaise distribution granulaire.

Toujours est-il que l'appartenance à ce fuseau granulométrique n'apparaît pas comme une information fiable pour la prédiction du comportement mécanique des éléments composés de terre crue.

Par ailleurs, la dispersion des distributions granulométriques observées dans les matériaux issus du bâti vernaculaire pour plusieurs techniques-types (1.1) pose question : n'avons-nous pas là représentés une majeure partie des granulométries rencontrées en France, notamment pour le pisé ? Si c'est le cas, alors soit la « convenance des terres » n'est pas une vraie problématique car presque

tous les sols pourraient être utilisés, soit la granulométrie n'est pas une propriété intrinsèque très limitante des choix techniques.

Adapter les seuils à la composition des terres locales n'apparaît donc pas, en première approche, une proposition assurant la prédiction des performances mécaniques.

2.2 Apporter de nouvelles variables compositionnelles

Après ces observations, il est difficile de concevoir des seuils granulométriques adaptés permettant une garantie de performances mécanique. Mais peut-être que l'analyse granulométrique, couplée à la mesure d'autres *propriétés intrinsèques*, pourrait quand même aider à la décision pour des choix techniques pertinents.

Accetta (2003) souligne l'inadéquation des propriétés couramment choisies pour caractériser les terres (granulométrie et limites d'Atterberg). Les classifications granulométriques ne rendent pas compte de l'agencement final des grains ni de leurs propriétés cohésives et plastiques. Les limites d'Atterberg sont des approximations de comportements plastiques, et ne permettent pas non plus de prédiction d'agencement ou de caractéristiques mécaniques finales. De ce fait, il regrette que les essais de caractérisation ne soient pas plutôt orientés vers des analyses physico-chimiques des constituants : « analyse chimique classique, analyse thermique différentielle, diffraction X, spectrométrie infrarouge, [etc.] ». Ces essaient pourraient permettre de mieux prévoir la « pérennité » des éléments de terre crue.

La complexification des essais pour caractériser les propriétés d'usage des matériaux pose plusieurs questions :

- elle introduit une plus forte dépendance aux laboratoires de recherche et d'ingénierie, et rien ne montre aujourd'hui qu'elle permettrait de proposer des prédictions de qualité ;

- il s'agit de prédire des propriétés de « pérennité » d'usage (mécaniques) alors que le choix des techniques n'est probablement pas qu'une question de résistance finale des éléments.

Rojat et al. (2021) proposent d'utiliser une classification à deux variables pour évaluer la « convenance des terres » pour les techniques de terre crue : le Guide des Terrassements Routiers (GTR). Le GTR propose une classification utilisant une variable granulométrique, le passant à 80µm dit « teneur en fines » et une variable de réactivité électrochimique, la valeur au bleu de méthylène du sol (VBS ou MBV, *Methylene Blue Value* en anglais). L'avantage de cette classification est que les analyses nécessaires sont aisées à réaliser et que les entreprises de terrassement les emploient déjà, ce qui pourrait faciliter la mise en relation avec des artisan.es terre crue pouvant réutiliser des terres déjà excavées (Contexte, 1.3).

Lorsque les auteurs représentent les 23 échantillons de pisé rhone-alpins décrits précédemment et 33 échantillons de bauge bretonne sur cette classification (Figure 27), une transition progressive semble apparaître entre les deux techniques. Les échantillons de bauge présentent globalement une plus forte VBS et un passant à 80µm plus important que les échantillons de pisé.

Les auteurs suggèrent qu'il s'agit là d'une démonstration de la pertinence de cette classification pour pré-guider les choix techniques, avec pour condition de validité que la teneur en matières organiques reste faible[32]. Ils précisent cependant que cette classification ne pourra pas remplacer des essais performanciels complémentaires (essais sur échantillons ou avis d'expert.es).

32 La matière organique présente une forte VBS, ce qui fausserait les résultats (Annexe I, 2.2.4.2.3).

Si les conclusions de Rojat et al. ont le mérite d'ouvrir le débat sur une sortie de l'emploi généralisé des références granulométriques, la séparation entre pisé et bauge sur la Figure 27 n'est pas nette, et son origine pose question. En effet, les matériaux étant prélevés dans deux régions aux contextes pédogénétiques différents (Massif armoricain pour la bauge et piémonts alpins pour le pisé dans (Rojat et al. 2020)), la différence de propriétés moyennes observées pourrait s'expliquer plus simplement par la différence des sols des deux régions. Le fait que l'on ait construit en bauge en Bretagne et en pisé dans la vallée du Rhône n'est peut être pas lié aux propriétés du sol. D'autres facteurs influencent l'occurrence des techniques de construction en terre crue, par exemple la présence du savoir-faire dans les cultures constructives locales : si le pisé n'est pas connu en Bretagne, cela explique qu'il n'y soit pas mis en œuvre. Dans ce cas, une différence entre les propriétés des matériaux produits dans ces deux contextes n'est pas directement causé par le potentiel des sols selon ces propriétés.

Pour valider l'impact du sol sur les choix techniques, il faudrait idéalement observer la distribution du patrimoine bâti en terre dans une région où les deux techniques sont employées (ou du moins connues) : une différence statistique entre les matériaux employés témoignerait d'un choix préférentiel influencé par les propriétés du sol.

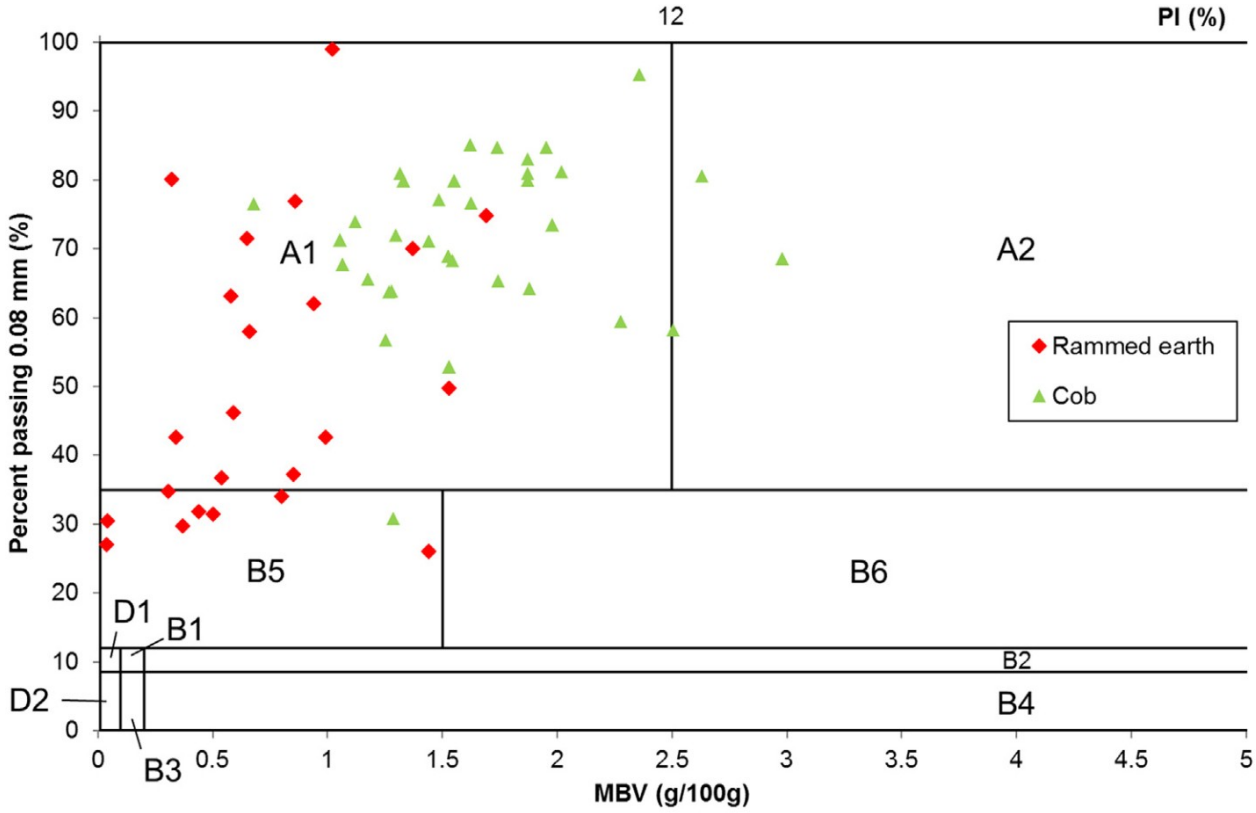


Figure 27 : Positionnement des 23 échantillons de pisé vernaculaire Rhone-Alpins et de 33 échantillons de bauge Bretonne selon leur passant granulométrique à 80µm et leur réactivité au Bleu de méthylène (Rojat et al. 2020). La classification est issue du Guide des Terrassements Routiers (GTR).

2.3 Proposer des modèles complexes basées sur les propriétés compositionnelles*

Face à l'échec de la conception binaire de la convenance à « fuseaux granulométriques », certain.es auteur.ices conceptualisent des modèles de prédiction plus complexes.

(Dialmy et al. 2023) proposent un modèle de prédiction de la compacité du pisé selon sa composition granulométrique, la compactibilité de chaque classe granulométrique mesurée indépendamment, l'énergie de compaction et la forme des agrégats. En effet, la compacité du matériau gouverne sa résistance mécanique en compression (Chapitre 2, 5.2.4). Le modèle permet le calcul de l'amendement en sable nécessaire pour optimiser la compacité du matériau final, donc *a priori* la résistance mécanique. Un essai en compression est réalisé sur un échantillon de terre naturelle, puis ce dernier est corrigé selon l'optimum, montrant alors une résistance en compression supérieure de 137 % par rapport au premier (2.75 contre 1.16 MPa).

L'étude est réalisée sur un seul échantillon de terre formulée, ce qui rend ce résultat difficilement généralisable. Mais il va dans le sens de l'approche de (Cuccurullo et al. 2021), suggérant que l'arrangement granulométrique n'est pas une question de fuseau mais d'empilement granulaire, optimisant la densité.

Les milieux granulaires argileux sont des matériaux complexes dont les propriétés mécaniques ne peuvent être prédites avec de simples seuils binaires sur des propriétés de composition. Par ailleurs, la prédiction des performances mécaniques n'est intéressante que comparée à des objectifs de performance, eux-mêmes dépendants du contexte de production de l'édifice qui imposent les contraintes aux matériaux.

Poursuivre dans la voie de la validation de la « convenance des terres » par prédiction des performances mécaniques (et son corollaire, leur optimisation) paraît nécessiter effectivement une complexification des modèles d'évaluation en intégrant au moins des propriétés liées à la mise en œuvre et aux performances recherchées.

Cette complexification va cependant à l'encontre de la démarche proposée par (Rojat et al. 2020) de proposer des essais « de terrain », c'est à dire faciles à mettre en œuvre afin qu'ils puissent être employés sur les chantiers pour aider à la prise de décision. La méthode proposée par Dialmy et al. (2023) implique une analyse séparée de différentes classes granulométriques pour obtenir leur densité et compactibilité respectives, puis des essais sur le sol complet, puis des essais sur le sol amendé en cas d'objectif d'amélioration. On est donc loin d'une démarche frugale car celle-ci semble impossible à mettre en œuvre simplement sur le terrain. Est-il alors seulement possible de concilier simplicité du test et précision de la prédiction ?

Par ailleurs, la méthode de Dialmy et al. (2023) ne considère que la technique du pisé, avec la compacité comme *propriété de prédiction** de la résistance mécanique. Les résistances mécaniques des autres techniques de construction en terre crue ne sont pas forcément gouvernées par la compacité. Faudrait-il développer un modèle complexe pour chacune des techniques séparément, et réaliser les essais nécessaires, pour enfin choisir une technique de construction sur un critère unique de résistance mécanique en compression finale ? Nous doutons qu'une telle approche soit pertinente dans d'autres contextes que celui de la recherche fondamentale.

2.4 L'approche performancielle

Face à l'échec de la prédiction des performances des matériaux terre crue à partir des propriétés de composition, des auteur.ices recommandent une approche dite *performancielle* (Silva et al. 2013; Rojat

et al. 2020). Il s'agit de mesurer directement les performances souhaitées des éléments composés de terre crue plutôt que de mesurer les propriétés de composition de la terre employée (Goizauskas 2019; Géomaterio 2022). L'approche performancielle évite la dépendance des résultats à de modèles prédictifs depuis les propriétés de composition. Cette approche semble être ainsi la seule permettant de connaître les propriétés du matériaux sans incertitudes conséquentes liées aux modèles.

L'approche performancielle est déjà envisagée dans les pratiques de recherche. Les résistances mécaniques mesurées sont également comparées à des standards. Par exemple, des sols issus de granite du nord du Portugal, mis en œuvre en échantillons de pisé et testés en compression montrent des résistances situées entre 0.2 et 0.5 MPa (Silva et al. 2013). Ces valeurs sont considérées comme « très basses » comparées aux critères de compressions « requis dans la documentation » (Silva et al. 2013). Pourtant, Ciancio et al. (2013) remarquent que pour des murs porteurs* de bâtiments de plain-pied, des résistances en compression de 0.12 MPa peuvent être suffisantes. Étant donné l'intensité de la construction actuelle d'édifices de plain-pied, considérer des seuils de performance mécanique trop stricts pourrait être préjudiciable à l'emploi de techniques ou de sols présentant pourtant des performances suffisantes.

Finalement, comme pour les autres approches, afin que l'approche performancielle puisse guider les choix techniques, il manque une définition de ce qu'est une « performance convenable » d'un élément composé de terre crue. Or, des standards sur les performances d'usage des éléments, sans prise en compte du contexte de leur emploi, semblent assez hasardeuses.

Face aux exigences de garanties du système normatif actuel, certain.es constructeur.ices pensent que l'approche performancielle serait un moindre mal, préférée à l'approche dite « de caractérisation » (Rinino 2021b). L'approche performancielle permet d'envisager un changement du rapport au matériau de construction : au lieu de chercher la terre ayant des propriétés supposées permettre les meilleures performances, les éléments sont façonnés puis leur performance est évaluée. C'est potentiellement une première étape vers un paradigme d'adaptation aux matériaux à disposition, où l'on peut « adapter l'architecture du bâtiment aux capacités du matériau » (Goizauskas 2019). On sort de la caractérisation de la matière première pour considérer le matériau final, et on passe ainsi « d'une obligation de moyens » qui caractérise les normes produit conventionnelles à « une obligation de résultat » (CCTC 2024) qui « replace les questions de confiance et de responsabilité au plus proche de l'acte constructif » (Goizauskas 2019:97).

Toustes les constructeur.ices ne sont cependant pas de cet avis, et certain.es promeuvent plutôt une émancipation du système réglementaire ("Maggi", dans (d'Halluin 2021)). En effet, réformer le cadre normatif pour qu'il permette l'emploi du matériau terre crue pourrait renforcer la légitimité de celui-ci et *in fine* participer à le faire perdurer. Or, la réappropriation de l'acte de bâtir et d'habiter pourrait passer par des voies plus libertaires où les choix techniques ne seraient pas guidés par des cadres administratifs.

2.5 Solliciter l'expertise artisanale dès la phase conception

Dans les projets conventionnels, le choix technique intervient généralement en phase conception, avant le choix de l'entreprise qui réalise les travaux. L'adaptation aux matériaux à disposition n'est alors possible que si les concepteur.ices ont les compétences pour ce choix technique. Les architectes sont formé.es au dimensionnement d'éléments d'ouvrage composés de matériaux industriels homogènes, or, ce n'est pas le cas du matériau terre. L'expertise du choix technique peut intégrer la phase conception par deux biais : la formation des concepteur.ices et/ou la consultation de constructeur.ices spécialistes en amont de la conception (La Facto 2023). Dans les deux cas, il s'agit d'associer le savoir-faire artisanal aux choix techniques, plutôt que de le rationaliser* dans des

procédés de mesure le laboratoire. Par exemple, le Collectif des Terreux Armoricains propose dans cet objectif une prestation d'« analyse de convenance des terres » des sites de construction qui peut être commandée dès la phase de conception. Un ensemble d'essais sensoriels (voir Chapitre 5) et d'essais de mise en œuvre d'éléments est réalisé pour indiquer le potentiel de plusieurs techniques de construction en terre crue, et les conclusions sont synthétisées dans un rapport (p. ex. (Collectif des Terreux Armoricains 2022a, 2022b). Cette approche s'est révélée favorable au bon déroulement des chantiers en ayant un rôle d'amorce du dialogue entre les artisan.es et les différent.es acteur.ices du projet de construction, et peut s'intégrer dans une démarche globale de réappropriation de l'acte de bâtir recherchée par les habitant.es. Les autrices de la Facto (2023:68) recense des exemples de chantiers où des artisan.es ont été associés avec succès à la conception des projets.

3 Questionner les *propriétés cibles* et le *déterminisme environnemental*

Nous observons une ambiguïté dans les objectifs proposés par chaque auteur.ice présenté.e.

D'un côté, l'objectif semble être de *garantir des performances d'usage* des matériaux à partir des propriétés intrinsèques, et particulièrement la résistance mécanique. Dans ce cas, la prédiction se heurte d'une part à la variabilité liée à la mise en œuvre, et d'autre part à la complexité des modèles de prédiction.

De l'autre, l'objectif est de comprendre, et si possible faciliter le choix des techniques dans les projets de construction. C'est pourquoi l'analyse du bâti existant sert d'exemple, validant un ensemble de *propriétés cibles** incluant des performances d'usage et de mise en œuvre.

Ces deux catégories de recommandations ne peuvent pas concorder car elles n'ont pas les mêmes *propriétés cibles*. Nous voyons ici un angle mort dans la réflexion sur la « convenance des terres » : pour *choisir* une bonne technique, ne devons-nous pas d'abord définir ce qu'*est* une bonne technique ?

3.1 Redéfinir les *propriétés cibles* dans le lien terre-technique?

Rojat et al. (2020) suggèrent que les « fuseaux » ou « seuils » granulométriques, sont généralement déterminés en utilisant une approche géotechnique, où la variable optimisée est la résistance mécanique d'échantillons de terre crue, mesurée et mis en œuvre en laboratoire, ou plus rarement sur le terrain. Ces informations sont difficiles à vérifier en pratique, car la plupart des références ne précisent pas l'origine des seuils proposés. On peut espérer qu'il s'agisse de « dires d'expert », liés à une expérience significative au contact du matériau. Il est vrai que les publications type *état de l'art* (Maniatidis & Walker 2003; Jiménez Delgado & Guerrero 2007; Reddi et al. 2012; Ciancio et al. 2013) justifient la plupart du temps explicitement ou implicitement les références granulométriques proposées par des *propriétés cibles* appartenant aux *propriétés finales** (ou *propriétés d'usage*) du matériau, particulièrement la résistance mécanique en compression mais également la durabilité à l'érosion par exemple. Il est cependant rare que ces *propriétés cibles* soient détaillées, en explicitant ce qu'est une bonne résistance mécanique, par exemple en terme de résistance en compression minimale, ou de vitesse d'érosion, que la propriété granulométrique *de prédiction** garantirait. Il est surtout très rare que ces *propriétés cibles* intègrent des propriétés de *facilité de mise en œuvre*.

Certain.es auteur.ices sont manifestement conscient.es de l'importance de prendre en compte les étapes de mises en œuvre dans le choix de la terre ou de la technique, pour des raisons de possibilité/facilité de mise en œuvre (Maniatidis & Walker 2003; Schroeder 2016; Koutous & Hilali 2019a; Rojat et al. 2020; Fabbri et al. 2022; Ansaa-Asare et al. 2023; Dialmy et al. 2023; Meimaroglou &

Mouzakis 2024), ou d'impacts financiers* de l'usage d'une ressource non adéquate (Koutous & Hilali 2019a). Par exemple, la méthode de Dialmy et al. (2023) suppose une connaissance de l'énergie de compaction appliquée au sol, donc des outils et techniques de compaction, prise en compte par des coefficients dans le calcul. Également, les auteur.ices suggèrent que la meilleure résistance à la compression se retrouve en théorie dans les sols à fortes teneurs en graviers, mais rappellent simultanément que ces sols sont en réalité plus difficile à compacter et pourraient en pratique ne pas être suffisamment compactés pour donner de bonnes performances. Ce faisant, la facilité de mise en œuvre n'est pas vraiment rattachée à une variable d'économie d'effort* dans cet article, mais à la qualité de la résistance mécanique ou esthétique des échantillons : des difficultés de compaction entraîneraient une densification inférieure à celle prédite par le modèle (Dialmy et al. 2023). Ainsi, dans de nombreux cas, lorsque l'aisance de mis en œuvre est considérée c'est avant tout dans le champ des *propriétés de prédiction* et non dans les *propriétés cibles* (Schroeder 2016; Rojat et al. 2020; Fabbri et al. 2022; Ansaa-Asare et al. 2023; Dialmy et al. 2023). L'aisance de mise en œuvre est alors une condition de garantie des propriétés d'usages du matériau final (mécaniques essentiellement), et non un objectif en soi. Malgré tout, cela souligne que lorsque l'on cherche à prédire avec précision les propriétés mécaniques d'éléments composés de terre crue, on ne peut ignorer les conditions de mise en œuvre. Malheureusement, cette remarque ne résonne jamais avec un questionnement plus explicite des *propriétés cibles*, c'est à dire de ce qui fait qu'une terre est « convenable ». Pourtant de fait, ces propriétés cibles sont souvent implicitement ou explicitement ramené à une performance mécanique. Même Rojat et al. (2020) n'explicitent pas ce qu'ils entendent par une terre « convenable » malgré le fait qu'ils critiquent l'usage des classifications granulométrique en référence, et qu'ils proposent des essais de convenance « faciles à réaliser sur le terrain ».

Certain.es auteur.ices remarquent la possibilité d'obtenir des résistances mécaniques a priori « convenables » pour différentes techniques-types* de mise en œuvre pour une même terre (Kouakou & Morel 2009; Ansaa-Asare et al. 2023). Ces constats font écho la présence de plusieurs techniques-types dans une même région, parfois dans une même rue (Contexte, 2.3.5), employant visiblement la même terre pour bâtir. Ce qui soulève la question suivante : si plusieurs techniques sont « mécaniquement convenables » pour une même terre, alors qu'est-ce qui guide *ensuite* les choix techniques ?

Si les propriétés mécaniques finales sont importantes dans le choix technique comme le rappellent de nombreux.ses auteur.ices (Kouakou & Morel 2009; Fabbri et al. 2022), l'optimisation de ces seules variables n'est probablement pas le seul objectif des constructeur.ices utilisant les procédés vernaculaires. Ces personnes sont également préoccupées par des considérations de *facilité de mise en œuvre* – que l'on pourrait qualifier de performances d'*économie d'effort,* ou d'*économie paysanne** – ou d'autres performances architecturales (p. ex. hygrothermiques, esthétiques, etc.). Le choix d'une technique de construction implique donc d'autres considérations que la résistance mécanique finale du matériau. En effet, à partir du moment où une résistance suffisante pour l'ouvrage réalisé est supposée atteignable avec le matériau disponible, d'autres facteurs sont à considérer dans l'ensemble des procédés de travail de la matière. C'est à dire, il s'agit de considérer l'ensemble des impacts sur les humain.es et l'environnement du cycle de vie du matériau terre crue, de son extraction à sa fin de vie, en passant par ses procédés de transformation en dehors et sur le chantier.

Il paraît important de définir les *propriétés cibles* des recommandations présentes si elles devaient continuer à être employées ; et celles d'éventuelles recommandations à venir. Les résistances mécaniques font sans aucun doute partie des variables d'évaluation de la qualité des ouvrages composés de terre crue. La garantie de ces performances relève d'une garantie de *performances*

d'usage, qui vise *a priori* à protéger les usager.es de malfaçons. Cette protection des *consommateur.ices*[33] fait donc partie de ce qu'on pourrait appeler une *pertinence sociétale** plus générale du choix d'une technique de construction (ou d'une terre « convenable »). Cependant, elle n'en est pas non plus la totalité, et ne doit pas être considérée comme une référence de choix technique au sens large, car l'optimisation des propriétés d'usage pourrait se faire au détriment de la qualité sociétale des étapes de mise en œuvre. Cette focalisation sur la mécanique pourrait *in fine,* pour reprendre les termes d'Ivan Illich (1973), devenir *contre-productive*, par exemple en rendant pénible la mise en œuvre pour les constructeur.ices ou en démultipliant les impacts environnementaux des procédés. On ne compte plus les articles académiques traitant de l'optimisation du dosage en liant hydraulique relativement à la performance mécanique des éléments composés de terre crue (p. ex. (Silva et al. 2013; Raju & Venkatarama Reddy 2018; Tinsley & Pavía 2019; Sangma & Tripura 2020; Mustafa et al. 2023)). Pourtant, dans la plupart des cas, l'adjuvantation hydraulique n'améliore pas les performances mécaniques des matériaux composés de terre sans annuler tout l'intérêt écologique de leur emploi (Contexte, 1.4.1). La méconnaissance des impacts au-delà des performances mécaniques est d'autant plus manifeste que les auteur.ices indiquent en introduction que l'intérêt de la construction en terre est sa performance environnementale (la plupart des articles précités).

L'optimisation d'une seule variable, aveuglément aux autres, est appelée *pensée en silo* (Berlan et al. 2023). C'est l'un des mécanismes menant à la *contre-productivité* sociétale du développement technique, surtout lorsqu'il est régi par une classe d'expert.es-spécialistes manquant de recul face aux enjeux de leur discipline.

Des recommandations basées sur les seules performances mécaniques peuvent non seulement manquer leur cible par l'impossibilité d'atteindre les performances prédites *en pratique*, mais surtout peuvent conduire à des non-sens économiques* ou écologiques, par exemple en suggérant des corrections de composition qui réduisent les performances environnementales des techniques de terre crue en employant des ressources* issues de filières extractivistes*, ou en restreignant l'emploi de terres du site au profit de terres transportées. Ainsi, ces recommandations perdent de leur pertinence lorsqu'elles sont prises pour des références suggérant des terres idéales pour l'ensemble du procédé, de la mise en œuvre à la fin de vie.

Par ailleurs, il semble important, dans le contexte d'une filière en cours de déploiement, de discuter de l'impact des prescriptions académiques sur les choix techniques réels et finalement sur leurs implications sociétales. Publier des référentiels techniques a pour conséquence… leur utilisation (1.3), que ce soit pour guider la décision, ou l'imposer. A-t-on la garantie que cela est pertinent, pour la filière terre crue mais plus largement dans nos objectifs de changements de paradigmes sociétaux ? Quel type d'outils seraient utiles pour guider les choix techniques, pour quelles *propriétés cibles* ? Il semble adéquat, *a minima*, de consulter les premier.es concerné.es : les artisan.es et constructeur.ices employant la terre crue.

33 Les garanties de performances officielles comme les normes ou *de fait* comme les référentiels techniques (Pelé-Peltier 2023) ont une portée juridique protégeant les usagèr.es de malfaçons dont la faute reviendrait aux constructeur.ices n'ayant pas respecté les règles de l'art. De ce fait, elles n'ont de sens que lorsque l'usagèr.e n'est pas la même personne juridique que la constructeur.ice. Le terme consommateur.ices insiste sur la catégorie d'usagèr.es non constructeur.ices des édifices qu'iels emploient.

3.2 Questionner le déterminisme de la « convenance des terres » sur le choix technique

Si des propriétés cibles pertinentes étaient définies, il est possible que certaines propriétés de composition de la terre puissent être des *propriétés de prédiction* adéquates. La compréhension des impacts qu'impliquent les procédés de construction-habitation en terre crue sur l'ensemble de leur cycle de vie peut permettre de comprendre les liens entre terre à disposition et choix techniques. Ainsi, certaines techniques pourraient être « optimales » pour une terre, dans un compromis entre impacts socio-environnementaux, facilité de mise en œuvre, et en optimisant ses performances finales.

Cependant, l'observation du patrimoine bâti nous indique que dans de nombreuses régions, plusieurs procédés de mise en œuvre de la terre crue coexistent dans de mêmes espaces-temps historiques (Contexte, 2.3.5). Cela suppose que la technique n'est pas seulement choisie au regard des *propriétés intrinsèques* de la terre, mais également de ce qu'on peut appeler un *contexte constructif* plus large, impliquant potentiellement de nombreuses considérations économiques* (monétaires ou d'effort) de mise en œuvre de la terre, l'accès à d'autres matériaux, des questions esthétiques, ou encore politiques. On sort alors d'une approche *déterministe* de l'environnement « naturel » sur les choix techniques. De multiples propriétés cibles, probablement de nombreuses propriétés de prédiction : voilà qui questionne le potentiel d'outils de prédiction du choix technique à partir des propriétés d'une terre.

4 Hypothèses de travail

Il nous semble important de clarifier l'expression de « convenance des terres », communément employée pour désigner l'étude des propriétés intrinsèques des terres qui seraient supposées adéquates à une technique de construction en terre crue. En l'état, elle porte en elle l'idée que les processus de choix techniques seraient d'abord indépendant de la terre à disposition (par exemple esthétique), puis impliquant la sélection d'une terre appropriée à ce choix, en évaluant sa « convenance » au procédé préalablement choisi : une « sélection d'une terre convenable». Pourtant, dans le cadre de l'emploi de terres à disposition (sur site ou déjà excavées), garant d'une pertinence environnementale et d'efficacité dans le travail, il apparaît que le choix technique devrait se faire au regard des propriétés de la terre disponible, comme cela semble être le cas dans le contexte artisanal contemporain : une « sélection d'une technique convenable ». Il s'agit donc moins d'une question de « convenance des terres » pour la technique choisie, mais de « convenance des techniques » pour la terre à disposition. D'autre part, le choix d'une technique de construction n'étant probablement pas uniquement gouverné par la terre à disposition, nous utiliserons plutôt le terme de « choix technique » qui a l'avantage d'être plus généraliste et de placer ainsi l'étude de la construction en terre crue parmi d'autres champs disciplinaires d'études des techniques (philosophie, sociologie, histoire).

Une grande partie de la littérature académique relative à la construction en terre crue propose l'analyse de *propriétés intrinsèques* d'échantillons de matériaux mis en œuvre selon les différentes techniques-types de terre crue présentées en introduction. Lorsque ces analyses sont réalisées sur des matériaux issus du bâti vernaculaire pré-industriel, on peut dire que ce sont des matériaux « convenables » pour construire en terre crue, car d'une part, ils ont été mis en œuvre avec succès, et d'autre part, leurs qualités de durabilité dans le temps sont vérifiées. On suppose que l'approche du choix technique de l'époque était une approche d'économie de moyens, donc de « convenance des techniques » puisque le libre choix des propriétés de la terre n'était pas permis par une industrie du transport développée comme aujourd'hui.

Plusieurs de ces études analysant le bâti vernaculaire (Smith & Austin 1989; Pagliolico et al. 2010; Gomes et al. 2014; Aubert et al. 2015; Hamard 2017; Rojat et al. 2020) ont comparé les propriétés des terres employées par les batisseur.euses vernaculaires avec les recommandations existantes et remarqué des incohérences. L'acuité, voire la pertinence, des *propriétés de prédiction** utilisées, mais également des *propriétés cibles** que les propriétés de prédiction sont sensées prédire, et qui gouverneraient les choix techniques, ne coïncident pas avec les choix techniques *en pratique.*

En effet, les études actuelles relevant de la « convenance des terres » n'ont généralement pas pour objectif la compréhension des choix techniques ou l'accompagnement au choix d'une technique *sociétalement pertinente*, mais consistent bien souvent en l'optimisation d'une ou rarement plusieurs propriétés d'usage des matériaux, par exemple les résistances mécaniques des éléments secs, relativement à la composition de la terre. Ces travaux concluent souvent par des recommandations sur la composition des terres « idéales », parfois en suggérant l'emploi de « corrections » des propriétés lorsque la composition initiale n'est pas « idéale » (Maniatidis & Walker 2003; Arrigoni et al. 2018; Koutous & Hilali 2019a). Par ailleurs, ils sont souvent réalisés à partir de peu d'échantillons testés (Lagouin et al. 2021; Ji et al. 2023) ce qui questionne sur leur représentativité de la diversité des propriétés potentielles des terres.

Pourtant, dès lors qu'une recommandation est publiée, elle est reprise dans la littérature académique et dans les rapports techniques (type « ingénieur ») comme entrée en matière dans le choix technique : la terre est presque systématiquement comparée à ces recommandations en guise d'analyse préliminaire. L'existence de ces recommandations vient en effet combler un « manque de guides techniques et de textes de références » ressenti par de nombreux acteur.ices du champ de la terre crue (Pelé-Peltier 2023) (Contexte, 4). Malheureusement, la mauvaise adaptation des recommandations peut poser problème en pratique au sein de la filière terre crue. Analyser et comprendre ce qui déconnecte les recommandations des choix techniques pourrait permettre de remettre les recommandations existantes dans leur contexte de pertinence afin qu'elles ne soient pas employées « par défaut » sans considérations sur ce qu'elles représentent sur le social ou environnemental.

Cette considération nous amène à notre première hypothèse :

Hypothèse 1 : les *propriétés cibles* dans l'évaluation académique de la convenance des terres sont principalement des *propriétés d'usage* et ne sont pas les mêmes que celles qui guident les choix techniques *en pratique*, en tout cas les choix vernaculaires. Ceux-ci seraient évalués selon un ensemble de propriétés cibles, dépendantes du contexte, et relatives à toutes les étapes du cycle de vie de l'élément bâti en terre crue (de l'extraction à l'entretien) et ses implications sociales ou écologiques.

Pour valider cette hypothèse, il conviendra de sortir du champ académique pour interroger les sources de savoir empiriques et vernaculaires, c'est-à-dire les guides techniques relatifs aux procédés de construction en terre crue, ou directement les artisan.es en les interrogeant sur ce qui guide leurs pratiques (voir Avant-propos, 4.3). Puis, leurs choix techniques seront comparés avec les optimums et recommandations proposés dans la littérature académique.

Considérons une approche déterministe suggérant que les propriétés intrinsèques de la matière ont effectivement un impact décelable sur les choix techniques. L'observation des incohérences entre, d'une part, les recommandations basées sur des seuils sur des propriétés intrinsèques, et d'autre part,

la diversité des terres employées, nous indique que ce lien déterministe est bien plus complexe que supposé jusqu'alors dans les recommandations.

Hypothèse 2 : Quelles que soient les *propriétés cibles* définissant la convenance, celles-ci ne peuvent être appréhendée par des *propriétés de prédiction* composées de seuils simples sur des propriétés de composition* standard. Il est possible qu'elles nécessitent *a minima* une intégration dans des modèles multi-variables, voir qu'elles ne puissent se laisser appréhender par des modèles mécanistes/déterministes.

Modéliser les choix techniques relatifs à la terre nécessite la compréhension et l'intégration de l'ensemble des propriétés physiques de la matière terre, à tous les états d'humidité et d'adjuvantation par laquelle elle passe au cours des procédés, ainsi que l'impact de ces propriétés physiques sur la facilité/possibilité de mise en œuvre dans les contraintes propres au chantier. Dans le chapitre suivant (Chapitre 2), nous proposerons une description des liens de causalité entre processus de formation du sol, sa composition, et les propriétés mécaniques des mélanges de terre crue en résultant. Cela permettra de percevoir l'impact des propriétés de la terre sur les étapes de transformation et sur les propriétés finales des procédés de construction.

Enfin, la diversité culturelle dans l'espace et le temps pouvant influencer bien des choix techniques, nous suggérons une dernière hypothèse de travail :

Hypothèse 3 : les propriétés intrinsèques de la terre ne sont pas les seules facteurs de choix technique et peuvent être dominées par d'autres propriétés du *contexte constructif.*

Nous chercherons à déterminer ce que sont ces autres propriétés et quelles sont leurs importances relatives, pour comprendre la place du *déterminisme environnemental* qu'implique la matière à disposition dans l'ensemble des choix techniques.

Ces hypothèses remettent en question l'approche « naturaliste » (Goizauskas 2019) du choix technique basée sur la caractérisation de la composition de la terre. Au cours de cette enquête, on se demandera s'il est possible, ou même pertinent, que la recherche scientifique tente de dépasser l'efficacité de l'approche « sensible » et « pragmatique » des artisan.es par l'établissement de modèles universels.

5 Conclusion du Chapitre 1

Qu'est-ce qu'une technique adaptée à la terre à disposition ? Une approche courante dans les recommandations académiques sur les choix techniques, dite de « convenance des terres », consiste à comparer la composition de la terre à disposition à des *références* situant le matériau dans des « classes de convenance » pour chacune des techniques-type. Souvent, la comparaison aux références implique ensuite la *correction* du matériau afin de le faire entrer dans le cadre normatif. Ces comparaisons sont parfois accompagnées d'essais mécaniques validant l'intérêt de la modification de la composition sur la résistance des matériaux, mais questionnent rarement le choix initial de la technique ni la pertinence sociale et environnementale des corrections apportées. Cette approche dite de « convenance des terres » est à contre-courant des pratiques artisanales majoritaires dans la filière terre crue visant à adapter la technique au matériau (Morel et al. 2001; CCTC 2018; Rojat et al. 2020; Pelé-Peltier 2023), que l'on pourrait finalement appeler « convenance des techniques ».

Les *propriétés de prédiction* les plus souvent employées pour proposer ces classifications sont des propriétés granulométriques, décrivant des seuils (minimums et/ou maximums) sur des classes de

taille de grains ou un ensemble de seuils sur la granulométrie complète (sous forme de « fuseaux », p. ex. Figure 20) (Rojat et al. 2020). D'autres propriétés dites « intrinsèques », c'est à dire supposées indépendantes du remaniement de la matière et propres à chaque sol, sont parfois considérées : teneurs en matières organiques, propriétés de retrait-gonflement, limites d'Atterberg, *etc*.

Lorsque l'on compare ces propriétés de prédiction aux matériaux employés dans le bâti vernaculaire *pré-industriel*, on constate très souvent que les propriétés intrinsèques ne correspondent pas aux recommandations contemporaines. Pourtant, la présence de ces terres dans le bâti existant montre d'un part qu'il est possible de les employer pour construire et d'autre part que leurs propriétés fonctionnelles sont adéquates et durables puisqu'ils ont perduré jusqu'au 21ème siècle. De plus, ce choix technique peut même être considéré comme un optimum d'économie de moyens dans l'emploi des ressources locales si l'on considère que les batisseur.euses de l'époque ont employé les techniques les plus frugales en ressources et en travail.

Les recommandations contemporaines sont donc au mieux trop limitantes, au pire erronées. Il est rare que les raisons conduisant à ces recommandations soient précisées. On suppose qu'il peut s'agir d'essais de laboratoire de résistance mécaniques, ou de « dires d'expert ». Dans ce dernier cas, les point de vue *situés* des expert.es peuvent amener à des optimisations décorrélées de ce que les constructeur.ices recherchent (ou ont recherché) en pratique.

Une première hypothèse de travail suggère que les *propriétés cibles* des constructeur.ices contemporain.es et historiques ne sont pas seulement des résistances mécaniques, mais également des considérations plus holistiques (aisance de mise en œuvre, impacts socio-environnementaux, etc.). Une seconde hypothèse est que ces *propriétés cibles* ne peuvent être appréhendées par des modèles mécanistes simples, mais que les propriétés du sol doivent être intégrées dans un réseau complexe d'interactions. Enfin, la dernière hypothèse remet en question l'importance des propriétés de la terre dans le choix des techniques de construction : finalement, quelle est leur poids face à l'ensemble des contraintes environnementales, sociales, économiques*, voir financières* que s'imposent ou qui s'imposent aux constructeur.ices contemporain.es et pré-industriel.les ?

Des recommandations non adaptées posent problème lorsqu'elles sont massivement réemployées dans la littérature académique ou pire, dans la pratique du secteur de la construction. La filière construction contemporaine est formatée à l'emploi de normes-produits particulièrement adaptées aux matériaux industriels à faible variabilité. En l'absence de standards sur le matériau terre, les professionnel.les sont tenté.es d'employer tout critère quantitatif existant pour valoriser le matériau, notamment devant la demande du système assurantiel. Ainsi, la simple existence de classifications finit par *faire référence*, parfois même au-delà des contextes de validité suggérés par les auteur.ices. L'emploi déraisonné de ces outils, associé à la restriction exagérée des propriétés de prédiction, menace alors la réappropriation équilibrée des techniques de construction en terre crue. Les classifications non adéquates peuvent mettre en péril la qualité sociétale des chantiers en favorisant un excès de transformation ou de transport des matériaux. Elles entraînent des faux besoins d'expertise, en imposant aux maîtres d'ouvrage des études coûteuses, chronophages, inutiles et aliénantes, pouvant même conduire à l'abandon de la terre au profit de matériaux industriels. Une surconfiance dans l'approche scientifique supposée dans la production de tels outils de prédiction peut également engendrer des pathologies si elle fait oublier que la réussite de l'emploi de la terre dans un projet est essentiellement une question de savoir-faire : mettre en œuvre un matériau terre « idéal » selon les standards n'est pas une garantie de réussite.

Lorsque la recherche académique s'attelle à cette problématique, c'est généralement dans une approche *réformiste*, proposant une modification des seuils sur les propriétés de prédiction ; l'apport de nouvelles variables ou la complexification des modèles de prédiction. Plus rarement, certain.es

mettent l'accent sur l'impossibilité de prédire les propriétés des matériaux due à la diversité des sols et des techniques employées. On se demandera alors s'il est réaliste d'espérer prédire la qualité constructive d'une terre à partir de ses propriétés *intrinsèques*, et quel serait le travail à mener afin d'y arriver.

Pour satisfaire le cadre normatif, certain.es proposent de passer par une approche *performancielle*, mesurant les propriétés désirées (résistances mécaniques principalement) plutôt que de les prédire. Mais cette approche fait également débat : l'inadaptation du système normatif conventionnel-industriel aux matériaux naturels, fortement variables, n'est-elle pas l'occasion de faire sécession avec ce système aliénant ?

Chapitre 2 : de la matière à l’ouvrage

L’association “De la matière à l’ouvrage”[34] *organise des sessions de formations sur chantier-école permettant un transfert de savoir-faire collectif autour des matériaux naturels et locaux, dans une approche de questionnement politique du rapport à l’acte de bâtir et à la subsistance collective. Le titre de ce chapitre y fait référence, car c’est par leur accueil sur les chantiers que j’ai intégré la dimension “pratique” de la construction en terre crue ; et car je pense partager leur approche de l’acte politique du* « *faire* ».



Résumé :

Comment la matière terre influence-t-elle les propriétés des mélanges et éléments bâtis composés de terre crue ? Quels composants gouvernent leurs comportements mécaniques ? Comment ces comportements sont appréhendés dans les gestes de transformation de la matière, et comment influencent-ils les choix techniques* en pratique ? Dans un cheminement depuis le microscopique vers le macroscopique, ce chapitre présente une synthèse des liens de causalité entre les propriétés principales de la terre, de la pédogenèse jusqu’à la pratique de la maçonnerie de terre crue.

34 https://www.matiere-formation.com/

1 Introduction

Dans la recherche académique*, il y a consensus sur le fait que le comportement des matériaux composés de terre crue dépend fortement des propriétés intrinsèques des terres employées (Meimaroglou & Mouzakis 2024).

Expliciter les liens entre les propriétés des terres employées pour construire et les techniques choisies pour les mettre en œuvre paraît central pour comprendre les choix techniques* vernaculaires*, que l'on suppose adaptés aux matériaux locaux. C'est aussi une voie de compréhension de ce qui guide des choix techniques pertinents pour des chantiers efficaces, ergonomiques* et enracinés dans le contexte local pour aujourd'hui et pour demain.

Le travail bibliographique réalisé pour la rédaction de ce chapitre avait pour objectif initial la proposition d'un modèle de calcul reliant la composition de la terre à ses propriétés d'usage* dans les procédés de construction en terre crue : ouvrabilité* et performances des éléments finis. Des sources d'information principalement issues du monde académique ont été parcourues, mais lorsque l'information faisait défaut, nous avons mobilisé quelques références moins « formelles » : littérature dite « grise », retranscriptions d'entretiens (Avant-Propos, 4.3). Cependant, la création d'un tel modèle mécaniste s'est révélée trop complexe, et de nombreux chaînons manquent dans la littérature académique pour relier les propriétés de composition* aux propriétés d'usage de la terre par le calcul. En revanche, elles peuvent être décrites par le récit. Dans ce chapitre, nous proposons une synthèse de ce travail et des questionnements qu'il a soulevé.

Le travail bibliographique détaillé est publié en tant qu'annexe du manuscrit (Annexe I).

2 Le sol, un objet de recherche interdisciplinaire

2.1 Définir la terre

Comment définir la *terre* ? Au cours des processus pédogénétiques, dès lors que la roche se fragmente, on a affaire à un matériau dit « meuble ». Pourtant, le gravier et le sable sont des matériaux meubles mais nous n'avons pas l'habitude de les nommer *terre*. On peut suggérer que ce qui manque est la présence d'éléments fins formant en quelque sorte une « matrice » dont les éléments ne sont pas visibles à l'œil nu. Peut-être également est-ce une sensation de cohésion à la manipulation lorsque le matériau est humide, ou encore la présence d'éléments organiques caractéristiques de ce que l'on imagine peupler le sol, comme des racines. Le mot terre a des définitions multiples et variées, car cette matière façonne et est façonnée par les sociétés humaines.

Par conséquent, les propriétés d'intérêt et les méthodes d'étude du sol varient selon les disciplines scientifiques (Fabbri et al. 2022), et la définition du « sol » l'est également.

En géotechnique, l'objet d'étude est le sol comme support à divers objets techniques du génie civil (routes, édifices…) : l'attention se concentre donc sur les propriétés mécaniques des sols, avec une attention particulière sur l'influence de la nature et la granulométrie des constituants du sols (LCPC 2000). La définition d'un « sol » est donc relative à ses *propriétés mécaniques de matériau « meuble »* : le sol concerne alors la partie supérieure impactée par la pédogenèse, mais également tout matériau meuble sous-jacent (Figure 28a.).

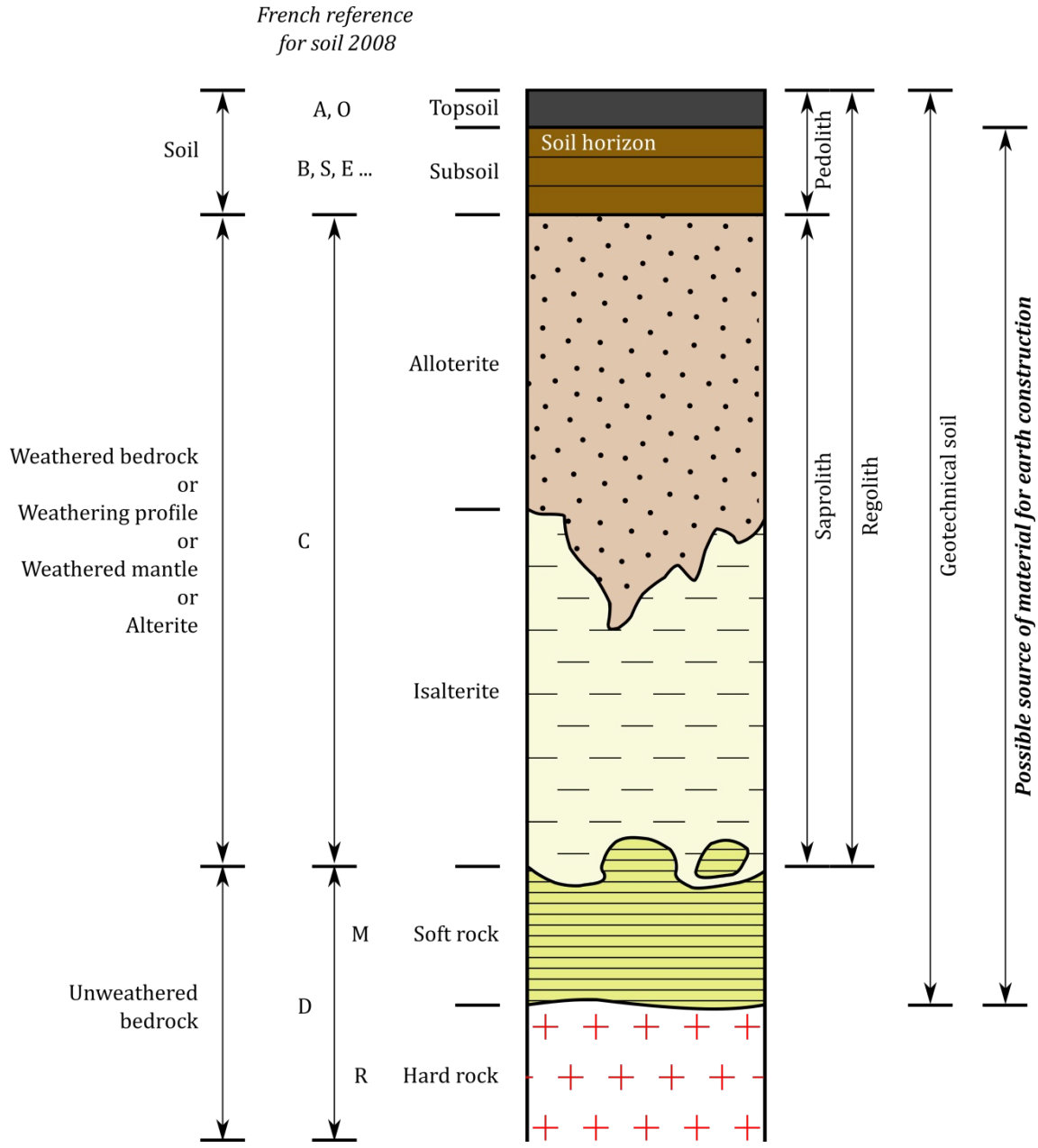


Figure 28: Définition du sol selon les disciplines d'étude. Adapté de (Hamard et al. 2018)

La pédologie est une science développée plutôt à des fins agronomiques : on s'intéresse principalement aux potentiels de culture des sols (y compris sylvicole) et donc à toute une diversité de processus et propriétés biologiques, hydrologiques, et plus rarement mécaniques, par exemple relativement à l'impact des machines agricoles sur son tassement. L'analyse des constituants est un sujet d'étude récurrent dans les études pédologiques. Cependant, contrairement aux sols utilisés dans les travaux de terrassement, les sols en place ne sont pas homogénéisés par mélange et présentent des variations naturelles de composition dans l'espace. Ainsi, au-delà des constituants, c'est également leur organisation à différentes échelles dans le temps et dans l'espace qui sont étudiés (Jamagne et al. 2011). On a vu que le sol est un écosystème d'interactions qui conditionne la pédogenèse: en pédologie, le sol est donc le *substrat impacté par la pédogenèse* (Association Française pour l'Étude des Sols 2014), c'est à dire présentant une différentiation par rapport aux propriétés du matériau sous-jacent (par exemple, substrat rocheux) *via* son interaction avec la biosphère et l'atmosphère.

La géologie a pour sujet d'étude la formation et les propriétés des roches. Le *sol* des pédologues y est donc plutôt considéré comme un *substrat issu de l'érosion des roches* et n'est que rarement considéré. En effet, l'échelle de formation des roches est celle des temps géologiques, dont l'ordre de grandeur est plus grand que celui de la pédogenèse et concerne des volumes de matériau bien plus importants. L'échelle de variation verticale des substrats géologique est plutôt supérieure au mètre et peut atteindre le kilomètre, là où celle des sols approche la dizaine de centimètres. De ce fait, on trouve généralement peu d'informations détaillant les propriétés des sols superficiels sur les cartes géologiques, sauf lorsqu'un dépôt sédimentaire conséquent (de l'ordre du mètre, au moins) couvre les substrats géologiques et impose une attention particulière en tant que phénomène géologique. On retrouve par exemple les sédiments des lits des rivières ou les dépôts éoliens sur ces cartes. Par simplification, on considérera ici le début du domaine géologique comme la fin du domaine pédologique, c'est à dire généralement le *matériau parental* du sol, non altéré par la pédogenèse.

En ce qui concerne la construction en terre crue, la plupart des auteur.ices s'accordent sur deux points : le matériau doit être « meuble », et pauvre en matières organiques. Cette définition nous rapproche de la définition géotechnique d'une *terre minérale*, excluant les *terres végétales*. Dans cette perspective, le sol considéré peut être bien plus profond que le sol pédologique si le matériau sous-jacent (« géologique ») est meuble. En revanche, ce qui caractérise la limite supérieure de « terre végétale » est plus discutable, car il apparaît que la teneur en matières organiques n'a pas toujours été une condition stricte d'emploi de la terre pour bâtir en terre crue. La composition organique d'un horizon est probablement une propriété parmi d'autres dans la considération du matériau « convenable pour bâtir », comme sa cohésion ou la présence d'éléments grossiers.

Ces quatre approches sont des approches académiques du matériau terre, que l'on peut nommer « naturalistes » et « abstraites » : la culture scientifique « vise surtout à savoir ce qu'est la matière pour mieux la contrôler » (Goizauskas 2019:97). Les artisan.es* terre crue ont généralement un rapport différent à la terre crue, « phénoménologique et pragmatique » avant tout concentré vers l'usage du matériau, « ce que la matière peut faire ». Celle-ci est manifeste dans l'emploi de dispositifs sensoriels pour caractériser la terre (Goizauskas 2019) (voir Chapitre 5, 2). Deux pôles d'approches de la terre qui se superposent parfois dans les constructions de chacun.e des artisan.es, notamment pour celleux issu.es de formations scientifiques type ingénieur. L'approche phénoménologique est indispensable pour comprendre la complexité des enjeux des projets mobilisant la terre crue, et particulièrement lorsqu'il s'agit de comprendre l'impact des propriétés de la matière sur les choix techniques. Elle est cependant difficile à concilier avec les approches de génie civil académiques : les modèles mécanistes, les tests statistiques, les mesures de laboratoire, ne semblent pas pouvoir appréhender les systèmes sociotechniques dans lequel le matériau terre est engagé sur les chantiers.

L'approche académique du sol qui semble la plus appropriée à la construction en terre crue contemporaine est celle du génie civil, car elle traite des matériaux selon leurs comportements (p. ex. cohésion, compressibilité) plutôt que leur histoire ou leur disposition dans l'espace. C'est probablement la plus proche de l'approche phénoménologique/pragmatique des constructeur.ices. Mais celle-ci ne peut être suffisante pour appréhender les enjeux de choix des techniques de construction en terre crue. Dans ce travail de thèse, nous définirons la terre comme un « matériau meuble possédant des propriétés cohésives ». Nous mobiliserons les approches déployées par les différentes disciplines académiques, complétées par les approches phénoménologiques des artisan.es à l'aide de documents techniques et d'entretiens.

2.2 Terminologie

2.2.1 Sol

Suivant l'exemple de Théo Vinceslas (2019), le terme *sol* sera utilisé ici en référence à une terre dite *en place*, qui n'a pas subi de processus d'excavation récent d'origine anthropique. On pourra utiliser le mot *solum* ou *profil* pour préciser qu'il s'agit d'un profil complet de sol en place comprenant *a priori* plusieurs horizons. L'*horizon* qualifiera un *horizon pédologique*, c'est-à-dire un volume de terre en place possédant une certaine homogénéité (Annexe I, 3.3.1) de ses propriétés et généralement délimités par une discontinuité horizontale plus ou moins nette.

Enfin, la terre extraite subit des processus plus ou moins importants de transformation de ses propriétés de composition ou d'organisation. En ce sens, dans les procédés de construction en terre crue, on parlera de *mélange composé de terre crue* – suggérant que d'autres composants peuvent avoir été ajoutés à la terre extraite (eau, fibres, granulats minéraux…). On utilisera alors le terme *mélange* pour simplifier, mais il doit être clair que ce travail de thèse ne concerne que la terre dite *crue* donc les mélanges sans adjuvants *hydrauliques*, *ultratransformés** ou *non biodégradables* (voir Contexte, 1.4).

La *terre* qualifiera la matière terre en général dans tous ses états, excavée ou non, mélangée ou non. Cependant dans la mesure du possible on utilisera les termes *sol* et *mélange de terre*, plus précis quand aux états de la matière concernés.

2.2.2 Granulométrie : proposition de codification

Les dimensions des granulats de la terre n'ont pas de limites et vont de l'échelle moléculaire à l'échelle du mélange de terre étudié. On parle de classification granulométrique lorsque l'on étudie la répartition en fractions massiques de différentes classes de taille des éléments d'une terre. Quatre noms de classes granulométriques sont systématiquement repris, mais leurs limites varient selon les disciplines et selon les normes nationales et internationales (Tableau 1).

	Géotechnique		**Pédologie**		**Standards Français Aggrégats**		**Standards Français Sols**	
	Taille min.	Taille max.	Taille min.	Taille max.	Taille min.	Taille max.	Taille min.	Taille max.
Argile	0	0.002	0	0.002	0	0.002	0	0
Limon	0	0.075	0	0.05	0	0.063	0	0,08
Sable	0.075	2	0.05	2	0.063	2	0.08	2
Gravier	2	-	2	-	2	-	2	-

Tableau 1 : Limites dimensionnelles des classes granulométriques en fonction des classifications (Vinceslas 2019, issu de Briaud 2013 et Lark & Budiman 2009)

On suppose que les classes proposées sont basées sur des limites permettant leur usage dans les domaines pour lesquelles elles ont été définies. C'est pourquoi en pédologie, on prête moins d'attention à catégoriser les différents éléments grossiers, car c'est plus leur pourcentage massique total qui importe plutôt que leur distribution de tailles relativement aux propriétés agronomiques; tandis qu'en géotechnique, la taille des gros éléments est plus importante. A l'inverse, en géotechnique on rassemble souvent les « fines » c'est à dire le passant à 2µm (« argiles ») et celui à 80µm (« limons »), alors que leur distinction est systématique en pédologie. On peut supposer que l'attention se focalise sur l'échelle de taille des interactions avec la matière des usagèr.es de chaque classification, qui est de l'ordre du centimètre et plus pour les engins de chantier tandis qu'elle est de

l'ordre du millimètre et moins pour les phénomènes biologiques du sol : croissance des végétaux, transferts et rétentions hydriques.

Finalement, dans chaque discipline, c'est une arborescence de classes et de sous-classes qui est utilisée dans le langage comme dans la classification. Nous retiendrons pour ce travail de thèse celle qui est employée par les pédologues. Afin d'éviter les confusions, nous utiliserons des formules pour nommer les fractions granulométriques notamment dans les tables et graphiques. Les « fractions », c'est à dire classes délimitées par un maximum et un minimum, seront appelées « F <max> <unité> » où <max> est la limite maximale et <unité> est l'unité de mesure (par exemple, F50µm est la classe des limons en pédologie agronome). Pour la fraction maximale qui n'a pas de limite supérieure, on rajoutera le suffixe _D (« jusqu'au plus gros diamètre »).

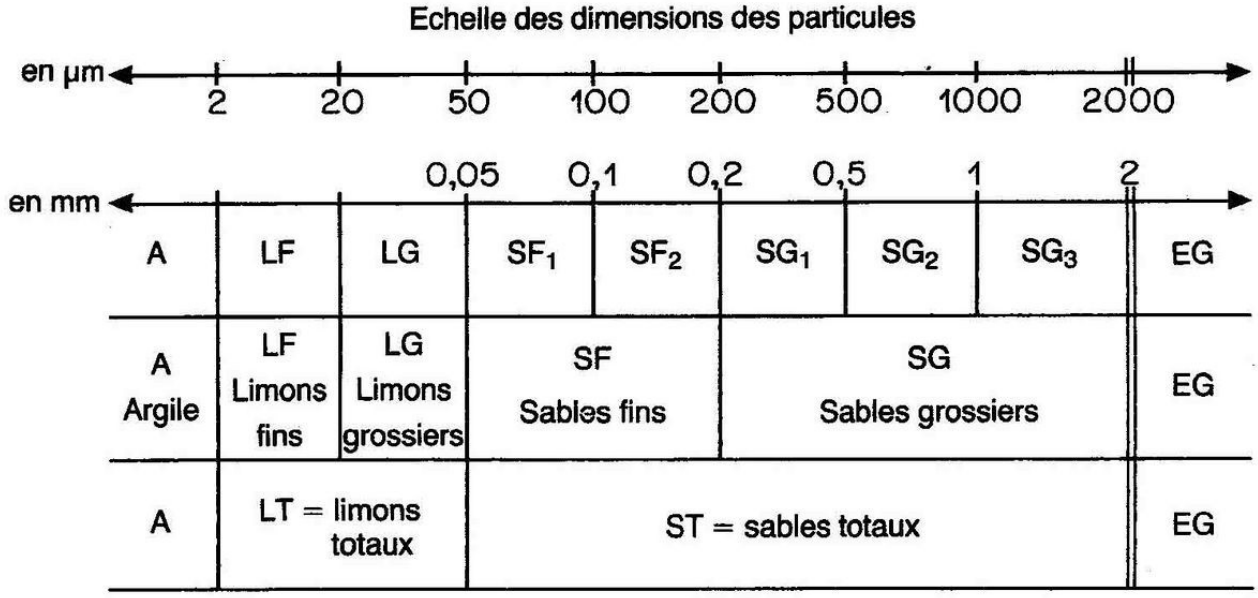


Figure 29 : classification des éléments du sol selon leur taille (Baize 2024).

Dans cette classification issue de la littérature agronomique (Figure 29), une première division s'effectue entre la « terre fine » ou *fraction fine** et la *fraction grossière**, qui regroupent respectivement les granulats de taille inférieure à 2000µm (2mm) et supérieure à 2000µm (2mm). Afin de ne pas mélanger les unités nous utiliserons principalement le micromètre pour désigner les passants granulométriques des classes de la *fraction fine*, et le centimètre pour les passants granulométriques des classes de la *fraction grossière.*

La *fraction fine* y est subdivisée en 3 classes :

- La fraction granulométrique 0-2 µm (appelée par la suite « F2µm »), généralement appelée « argile ».

- La fraction granulométrique 2-50 µm (appelée par la suite « F50µm »), généralement appelée « limon » ;

- La fraction granulométrique 50-2000 µm (appelée par la suite « F2000µm ») appelée « sable ».

Les subdivisions inférieures sont détaillées sur la Figure 29.

La *fraction grossière*, que l'on appellera également *éléments grossiers* (EG) est parfois subdivisée en classes plus précises, mais on ne les explicitera pas toujours et on utilisera principalement la formule F2000µm_D. Si nécessaire, suivant la classification du Référentiel Pédologique (Association Française

pour l'Étude des Sols 2008) nous distinguerons les *graviers* (0.2-2cm, « F2cm »), les *cailloux* (2-7.5cm « F7cm »), les *pierres* (7.5-20cm « F20cm ») et les *blocs* (>20cm « F20cm_D »).

On utilisera également une formulation pour qualifier les passants granulométriques cumulés, avec un P au lieu du F. Par exemple, P50µm qualifie l'ensemble des éléments de dimension inférieure à 50 µm (soit P50 = F2µm + F50µm).

3 La variabilité des sols hexagonaux est gouvernée par le matériau parental, le relief et l'action anthropique

Comprendre les propriétés d'une terre, c'est comprendre les proportions de chacun de ses composants et leur agencement micro et macroscopique. Avant excavation, ces propriétés sont héritées de l'histoire du sol et des facteurs environnementaux qui ont gouverné son évolution : la pédogenèse.

On peut résumer les facteurs pédogénétiques à 5 catégories de facteurs, regroupées sous l'acronyme (un peu) mnémotechnique ClORPT proposé par Jenny (1994) : Climat, Organismes, Relief, matériau Parental, Temps.

Parmi ces facteurs, le matériau parental domine clairement la pédogenèse des sols hexagonaux. Il gouverne la minéralogie du profil de sol, dont la plupart en sont *hérités*. Son *altérabilité* conditionne la taille des éléments solides et la profondeur du profil de sol. Sa composition chimique tamponne l'acidification progressive du pH du sol, paramètre de premier ordre sur les populations d'êtres vivants s'y développant. Si le matériau parental est dur (cas de certaines roches cristallines, p. ex. les granites), la fragmentation de la roche est lente et le sol produit est souvent peu profond ; s'il est meuble (cas des dépôts de limons éoliens, de certains grès ou schistes ou de certaines roches carbonatées), la pédogenèse altère rapidement le matériau en profondeur (Egli et al. 2014). Les sols développés directement dans des sédiments meubles sont gouvernés par les propriétés initiales de ces sédiments : sédiments fluviaux, limons éoliens, etc.

Le relief est le deuxième facteur dominant à l'échelle hexagonale. Il engendre des phénomènes de *colluvionnements*, c'est à dire de glissement des éléments du sol par gravité et sous l'influence du climat. Cela engendre un mélange des éléments de différents horizons, et peut favoriser l'apparition de pierres plus « récemment » détachées du matériau parental en surface du sol. En forte interaction avec le climat, ce phénomène rend la distribution des éléments grossiers dans le profil plus difficile à prédire.

Le facteur « organismes » est dans le contexte hexagonal sous forte influence anthropique. D'abord, les êtres vivants sont sous influence de gestion humaine dans ce qu'on peut appeler des « agro-écosystèmes » : les sociétés humaines influencent notamment les populations végétales se développant sur les sols selon les services qu'elles peuvent fournir. D'autre part, et particulièrement depuis le début de l'industrialisation (Price et al. 2011) la civilisation humaine est devenue le premier facteur de pédogenèse (qui comprend la destruction des sols) par exemple via le déplacement, l'érosion, le tassement, l'appauvrissement ou l'eutrophisation, et surtout les pollutions difficilement réversibles des sols. Ce facteur « terrassement » a une influence extrême mais souvent très localisée et peu corrélée aux conditions environnementales.

Une fois les facteurs de relief (d'altitude) considérés, à l'échelle de la France hexagonale*, le climat peut être considéré comme globalement homogène. Ce qui implique que la pédogenèse n'est pas impactée très différemment selon les micro-climats du territoire. Ainsi, si la néoformation des

minéraux et l'intensité de pédogenèse varie selon les zones climatiques Figure 30, ce n'est pas un facteur dominant à l'échelle hexagonale.

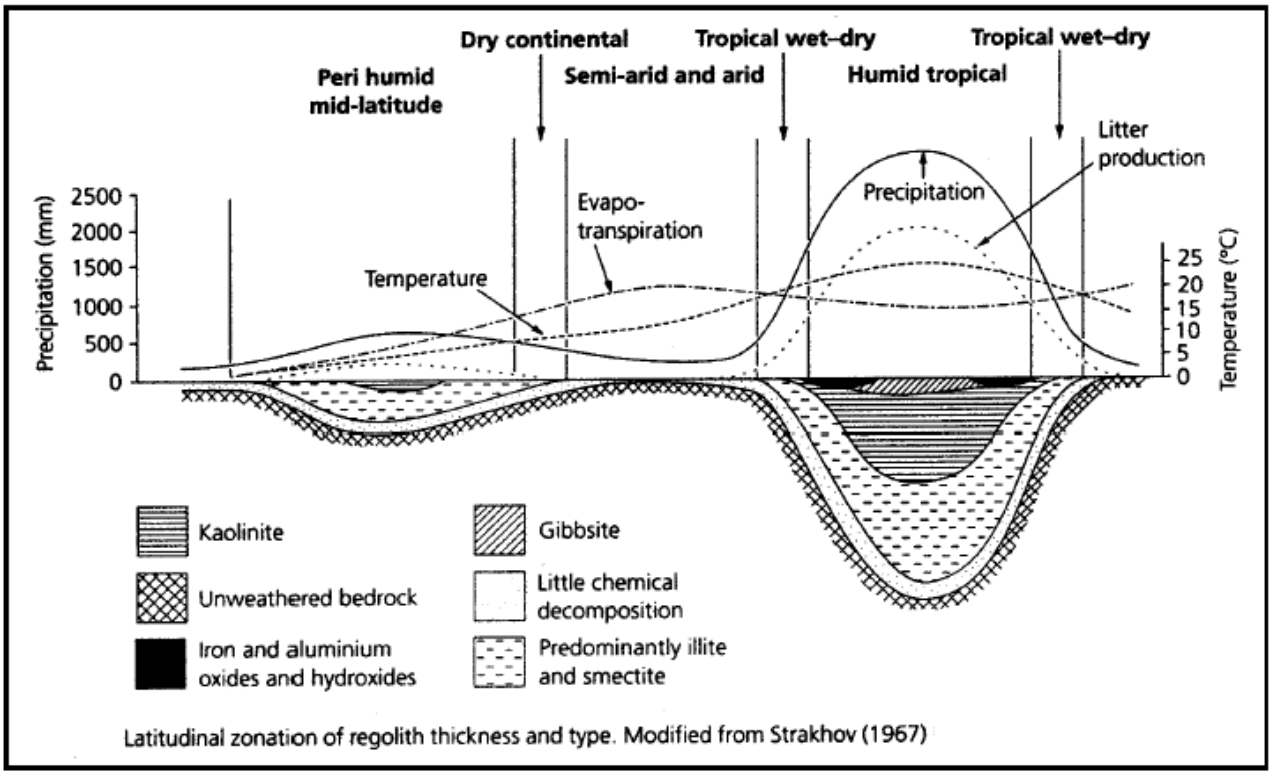


Figure 30 : néoformation des minéraux dans les sols selon le climat de la pédogenèse. La variation des températures et des précipitations selon la latitude est représentée (Allen 1997, référence initiale introuvable).

Le facteur temps également est globalement homogène sur le territoire, car on considère que la pédogenèse de la plupart des sols hexagonaux a débutée à partir de la déglaciation. En l'espace des 10 000 ans qui nous en séparent, les sols hexagonaux ont atteint une profondeur moyenne d'un peu plus d'un mètre. Cela correspond à approximativement 0.1mm par an, ou 1cm par siècle dans des conditions pédogénétiques favorables (Egli et al. 2014). C'est peu, ce qui nous fait remarquer que le sol n'est pas une ressource *renouvelable** si certaines propriétés sont perdues au cours de son emploi (Contexte, 1.2 et 1.4.1).

Ainsi, si les sols présentent une forte variabilité spatiale horizontale, de l'échelle de la dizaine de mètres au kilomètre, et verticale, de l'échelle du centimètre au mètre, celle-ci peut être appréhendée par la compréhension des facteurs principaux : la géologie à l'échelle du territoire hexagonal; le relief à l'échelle régionale/départementale et l'action anthropique à l'échelle locale.

4 Représenter les matrices de terre en phases volumiques

Parmi les familles de composants du sol, les proportions volumiques relatives de l'air, de l'eau et des solides du sol sont d'importances fondamentales pour les propriétés mécaniques des matrices de terre crue. Cette composition des phases des éléments du sol peut être décrite par leur proportions relatives. On peut les exprimer en masses relatives, comme c'est généralement le cas pour les analyses granulométriques (voir Annexe I, 2.2.3.2.4), ce qui facilite l'évaluation par simple pesée dès lors que les éléments ont été séparés. On peut également les exprimer en volumes relatifs, qui

représentent mieux leurs proportions dans l'espace et leur agencement relatif. Nous proposons ici une représentation originale de ces proportions dans un diagramme ternaire (Figure 31), que l'on appellera *diagramme ternaire volumique* afin de le distinguer du diagramme ternaire des textures (voir Annexe I, 2.2.3.2.3).

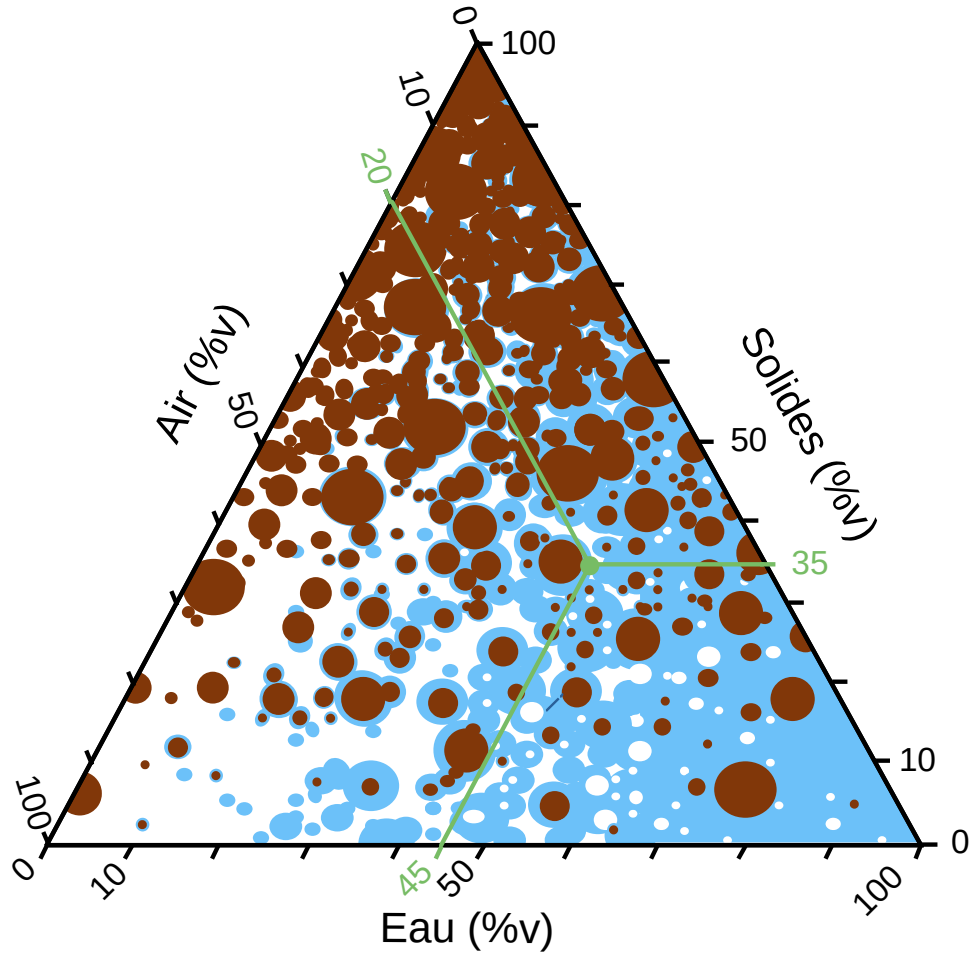


Figure 31 : représentation des teneurs volumiques des solides, de l'eau et de l'air d'une terre selon leurs proportions relatives dans le diagramme ternaire volumique. Un exemple de lecture du diagramme est donnée et montre le point où la teneur en solides est de 35 %, la teneur en eau est de 45 %, et la teneur en air de 20 %. On a bien 35+45+20 = 100 %.

Dans ce diagramme, les volumes relatifs d'air, d'eau et de solides sont exprimés en pourcentage et leur somme est égale à 100%. C'est à dire que si l'une des teneurs augmente, l'une ou les deux autres teneurs décroissent d'autant, comme pour les diagrammes de texture granulométrique du sol (Annexe I, 2.2.3.2.3).

4.1 De la teneur en eau à la fraction saturée

La teneur en eau du sol est une variable clef de la compréhension de son comportement macroscopique. Par exemple, c'est la teneur en eau de la *porosité* qui gouverne la tension superficielle et les forces de capillarité qui participent à la cohésion des sols insaturés (Annexe I, 4.2). Pour évaluer

le remplissage de la porosité du sol, on évalue le *taux de saturation* (Mitchell & Soga 2005) des pores par le ratio entre la teneur en eau volumique et la porosité totale (air + eau). Lorsque la teneur en eau volumique est de 1, le matériau est dit *saturé* en eau : il n'y a plus d'air dans les pores.

La compacité étant égale à la fraction volumique solide, elle se lit comme telle sur le diagramme volumique. En revanche, le *taux de saturation* est la fraction volumique d'eau relativement au volume de porosité, indépendamment de la teneur en solides, elle n'est donc pas directement liée à la fraction volumique en eau, mais à la proportion air/eau dans le mélange. Pour visualiser la saturation, on peut représenter des lignes d'équi-saturation sur le diagramme volumique (Figure 32). Le côté droit du triangle correspond à la pleine saturation : il n'y a pas d'air dans le mélange de solides et d'eau. Le côté gauche correspond à un état pleinement sec : il n'y a pas d'eau dans le mélange. L'état saturé est rencontrée dans les sols naturels ou les mélanges composés de terre crue. En revanche, une terre complètement sèche est peu probable à température et humidité ambiante notamment lorsqu'il y a présence d'éléments colloïdaux qui adsorbent fortement les molécules d'eau (Annexe I, 4.2.2.3).

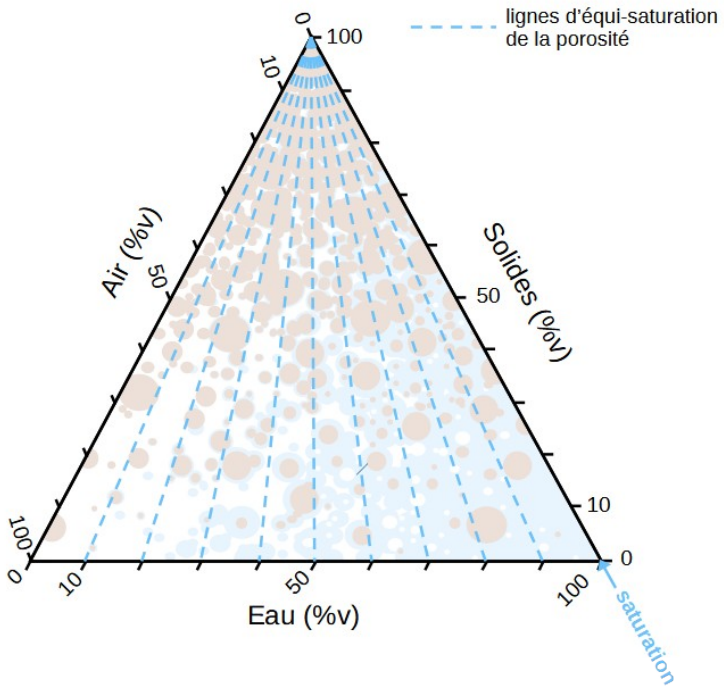


Figure 32 : évolution de la saturation sur le diagramme volumique. Lorsque air = 0 %, le sol est saturé. Lorsque eau = 0 %, le sol est sec.

Ainsi, pour les matériaux dont la compacité et la densité propre ne varient pas, par exemple un sol en place ou un matériau composé de terre crue dans son état final, la teneur en eau massique est proportionnelle à la fraction saturée et peut représenter l'état de saturation des pores du matériau.

Pour les matériaux dont la compacité varie (p. ex. par compaction), la teneur en eau massique n'est pas sensible à cette variation alors que le *taux de saturation* évolue (resp. se rapproche de la saturation). On peut par exemple arriver à saturation par compaction, ce qui induit un changement de comportement de cohésion du mélange : cela est visible sur un diagramme ternaire volumique mais invisible dans l'évaluation d'une teneur en eau massique.

Si la densité propre des solides change, c'est à dire si la composition solide du sol varie, la quantité d'eau est la même mais la teneur en eau massique (relative à la masse totale du mélange) varie ; tandis que la fraction saturée en eau reste constante.

Dans le cas des procédés de construction en terre crue, la terre peut être mélangée/compactée, on a donc potentiellement des variations de compacité. On peut également être amené.es à comparer différentes terres, où à les adjuvanter en solides, donc les densités propres sont variables. La teneur en eau massique doit alors être employée avec précautions.

4.2 De la densité à la compacité

On définit la compacité comme la proportion volumique de solides relativement à celle des fluides (air, eau) dans le mélange de terre. Sur le diagramme ternaire volumique (Figure 31), la compacité est donc directement la teneur volumique en solides. L'inverse de la compacité est la *porosité totale,* c'est à dire la teneur relative en air+eau du mélange.

La *compacité* est une mesure volumique, tandis que la *densité* (ou masse volumique) dépend de la masse des composants du mélange : solides, eau et air. Ainsi, si la densité des éléments solides d'un matériau est plus forte que celle d'un autre matériau, alors à compacité égale, on a une masse de solides supérieure.

La *densité propre* (ou *poids spécifique*, ou *masse volumique absolue*) est la *masse volumique des solides* du mélange de sol. C'est la densité du mélange lorsque la *porosité totale* est nulle, ce qui est généralement impossible à atteindre. C'est par exemple la densité de la roche composant les granulats minéraux du sol.

La *densité sèche* est la densité théorique d'un mélange sans compter la masse d'eau. Si l'on néglige la masse de l'air, on a alors la relation :

densité sèche = compacité x densité propre

La densité sèche est donc bien corrélée avec la compacité dans l'hypothèse où la densité propre des éléments solides ne varie pas ou peu, par exemple entre deux échantillons d'un même sol à différentes compacités.

Cependant dans le cas contraire, si les solides n'ont pas la même densité propre, la densité peut être différente même si la compacité est la même. Or, c'est bien la compacité plus que la densité qui gouverne les propriétés mécaniques intrinsèques des matrices de terre crue, ce qui impose son évaluation dans les études de capillarité granulaires, par exemple pour (Scheel et al. 2008). Ainsi, la densité sèche ne peut représenter correctement les propriétés des matrices de terre crue que dans la comparaison de mélanges de composition solide semblable, par exemple un même sol compacté à différentes compacités.

La densité (ou masse volumique) incluant la fraction d'eau n'apporte pas beaucoup d'informations sur l'état de la matrice granulaire, car en l'absence d'information sur la densité propre, on ne peut savoir quelle proportion d'eau et de solides composent la matrice. En revanche, elle peut servir comme mesure de masse en fonction du volume d'un élément ce qui peut servir dans des évaluations de résistance mécanique sous contrainte de gravité sur des éléments de terre crue empilés.

5 Propriétés gouvernant la mécanique des matrices à l'état frais

La compréhension des propriétés mécaniques des matrices de terre crue à l'état frais* permet de les mobiliser dans la compréhension des procédés de mise en œuvre de la terre. Dans la littérature relative à la construction en terre crue, des études évaluent les propriétés *finales** des matrices et des éléments de terre crue, mais peu d'études se consacrent à la compréhension des phénomènes dans les matrices *en cours de procédé de fabrication*.

5.1 Angles de contraintes, ruptures et comportements-types

La compréhension des phénomènes mécaniques dans les procédés de mise en œuvre de la terre crue nécessite une prise de recul sur les formes de contraintes qui sont appliquées aux mélanges. La résistance en compression non confinée, contrainte relativement bien appréhendée par la littérature relative à la construction en terre, n'y est plus la contrainte de référence. L'angle, la force et l'énergie des vecteurs de contrainte, les plans de rupture qui y répondent dans la matrice, et la résistance liée à la friction et la cohésion en leur sein gouvernent l'effet des contraintes appliquées aux matériaux *frais**. Ce n'est qu'en considérant la variabilité de ces types de contraintes que l'on peut isoler l'influence des *propriétés de composition* des matrices de terre crue sur leur réponse aux contraintes.

5.1.1 Force et énergie

Les contraintes que subissent les mélanges de terre crue peuvent être décrites *via* deux mesures d'intensité de résistance : la pression et l'énergie de déformation.

La *pression*, mesurée en Pascals (Pa = N/m^2) est une force (Newtons) par unité de surface (m^2). Par exemple, pour un poinçon d'une surface donnée enfoncé dans un élément de terre crue frais*, la pression varie selon la puissance avec laquelle on appuie sur le poinçon. La pression détermine également sa vitesse d'enfoncement : plus on appuie fort, plus il s'enfonce vite.

Cependant, une force seule ne décrit pas l'intensité d'une déformation : lorsque la force est appliquée, le matériau se déforme en dissipant l'énergie. Pour maintenir la force, il faut à nouveau de l'énergie, qui déformera le matériau jusqu'à dissipation. *L'intensité de déformation* d'un matériau ne dépend donc pas que de la force appliquée mais également de l'*énergie de déformation*. Cette énergie peut être mesurée par l'énergie mobilisé par unité de volume de matière déplacée, par exemple en Joules par mètres cubes (J/m^3).

L'énergie de déformation cumulée est l'ensemble de l'énergie appliquée au cours de la contrainte. Plus la pression est maintenue longtemps, plus l'énergie cumulée augmente. Plus la pression est forte, plus l'énergie appliquée est intense à chaque instant, plus sa quantité cumulée augmente vite. Ainsi au cours du poinçonnement, on peut atteindre une même énergie cumulée (= quantité de déformation) en poinçonnant longtemps mais à faible pression, ou en poinçonnant fortement mais moins longtemps.

Sur un graphique contrainte/déformation (*stress/strain*), la contrainte (*stress*) représente l'intensité de la contrainte, c'est à dire le vecteur de force appliqué au matériau. Une fois la contrainte appliquée contre la matière, quelle que soit son intensité, il n'y a pas d'énergie cumulée s'il n'y a pas de déformation (*strain*). En effet, c'est lorsqu'il y a une déformation de la matière que de l'énergie doit être appliquée pour *maintenir* la contrainte. Dans le comportement *élastique*, l'énergie appliquée sera restituée au retour élastique de la déformation. Dans le comportement *ductile* ou *cassant*, l'énergie est absorbée par la matière en énergie cinétique (déplacement) puis dissipée par friction entre éléments

solides ou avec les fluides dans la déformation de la matière. Le comportement cassant pourrait être considéré comme ne dissipant plus l'énergie : l'énergie cinétique (la vitesse) des éléments déplacés n'est pas dissipée donc augmente rapidement et les éléments se séparent (rupture).

L'énergie absorbée étant dissipée par le frottement au cours de la déformation ductile, elle peut être considérée comme proportionnelle à la déformation. Barnes (2013a) suggère ainsi que l'énergie cumulée d'une déformation est l'intégrale de la courbe de déformation type « contrainte-déformation » (Figure 33), soit la « surface sous la courbe ».

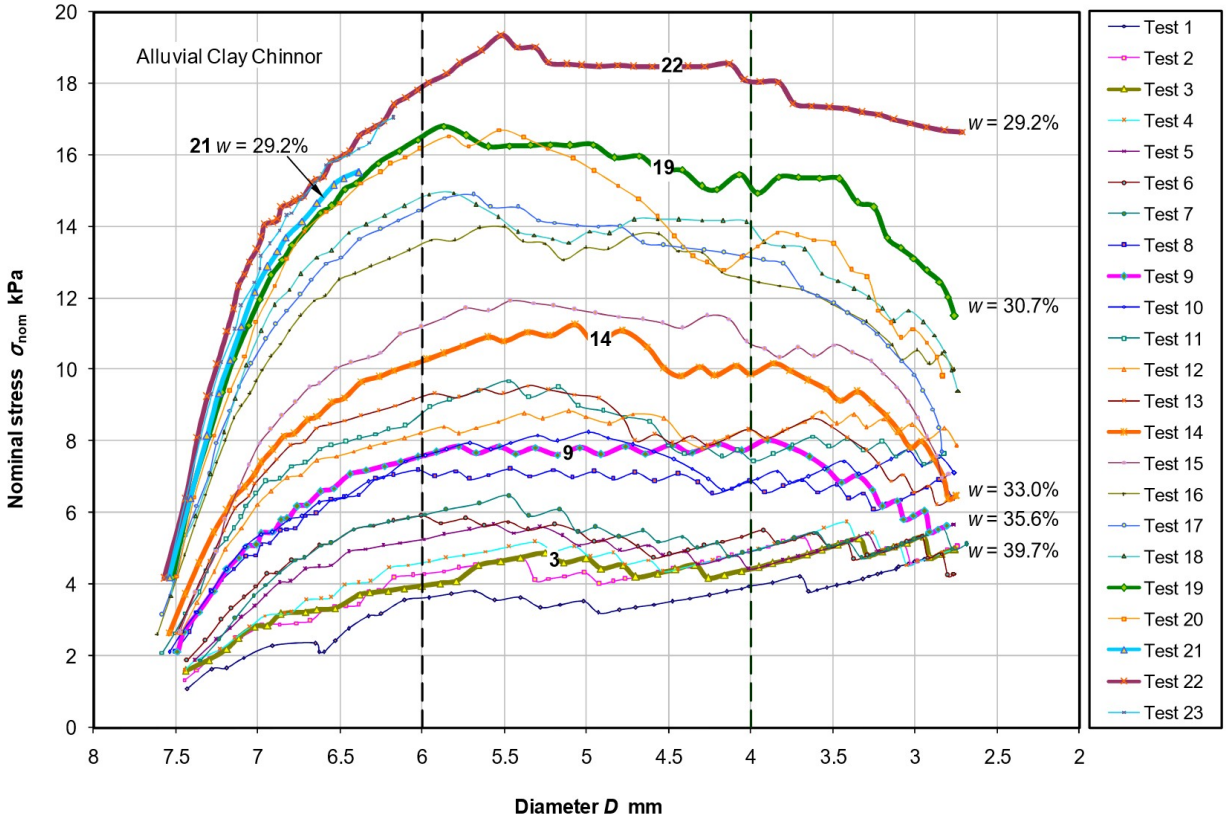


Figure 33: Courbes de réponse contrainte/déformation d'une argile soumise à l'appareil de Barnes en fonction de la teneur en eau. L'aire sous la courbe correspond à l'énergie cumulée pour la déformation : plus la teneur en eau augmente, plus l'argile est ferme et l'énergie nécessaire par volume déformé est importante (Barnes 2013b:195).

Il propose alors une unité de mesure du volume déformé par unité d'énergie appliquée au cours d'une contrainte : la fermeté. Valable pour une contrainte ductile, cette énergie nécessaire par volume déformé (en J/m^3) semble correspondre à ce qui est parfois appelée *viscosité*, probablement lorsqu'elle est plutôt faible et que le mélange est proche d'une consistance liquide (p. ex. (CCTC 2018; Ji et al. 2023)). Mais ce terme étant également celui d'une *consistance* (5.2.3), nous emploierons celui de fermeté. L'inverse de la fermeté est la *fluidité*.

5.1.2 Angles de contraintes et plans de rupture

Lorsqu'un matériau est soumis à une contrainte, il se déforme. Mais cette déformation varie selon ses propriétés et l'intensité de la force qui lui est appliquée. Dans les matériaux composés de terre crue, trois comportements-types peuvent être rencontrés : élasto-plastique, ductile, cassant. Le terme

« plastique » du comportement élasto-plastique créant une ambiguïté avec la *consistance* plastique (5.2.3), nous emploierons plutôt le terme ductile (élastique-ductile).

Le comportement *élastique* est dominant lors de la phase d'initiation de la déformation. Il est défini par le retour du matériau à sa forme initiale après le retrait de la force.

Le comportement *ductile* peut ensuite apparaître selon les conditions de confinement. Il est défini par une déformation irréversible de la matière, sans rupture brutale. La résistance observée, c'est à dire la force nécessaire pour continuer la déformation, peut y être constante ou augmenter au cours de la contrainte. Sur la Figure 34, l'essai étant réalisé en compression, lors de la déformation la compacité augmente ce qui fait augmenter la résistance au cours du comportement ductile.

Le comportement cassant est également irréversible, mais il est défini par une *augmentation* plus ou moins brutale de la déformation alors qu'une contrainte constante est maintenue. Dès lors de l'apparition d'un comportement cassant, on parle de *rupture*.

Ces trois comportements se succèdent de manière plus ou moins superposée dans la réponse à des contraintes d'intensité croissante (Figure 34). Par exemple, les comportements élastiques et ductiles sont la plupart du temps combinés dans l'initiation de la déformation : le comportement est en ait élastique-ductile (souvent appelé élasto-plastique). Ainsi dans les matériaux composés de terre crue le retour à l'état initial est rarement total dans la composante que l'on identifie comme « élastique » (1). On parle alors de comportement élastique-ductile (2). Les comportements ductiles et cassants (3) peuvent également se superposer dans des déplacements par « à-coups », qui peuvent être liés à l'hétérogénéité du matériau (fibres, gros éléments, agrégats, etc.). La Figure 34 présente une courbe-type de réponse aux contraintes d'échantillons de bauge sèche ; mais l'intensité des différents comportements varie selon les conditions des matrices composées de terre crue.

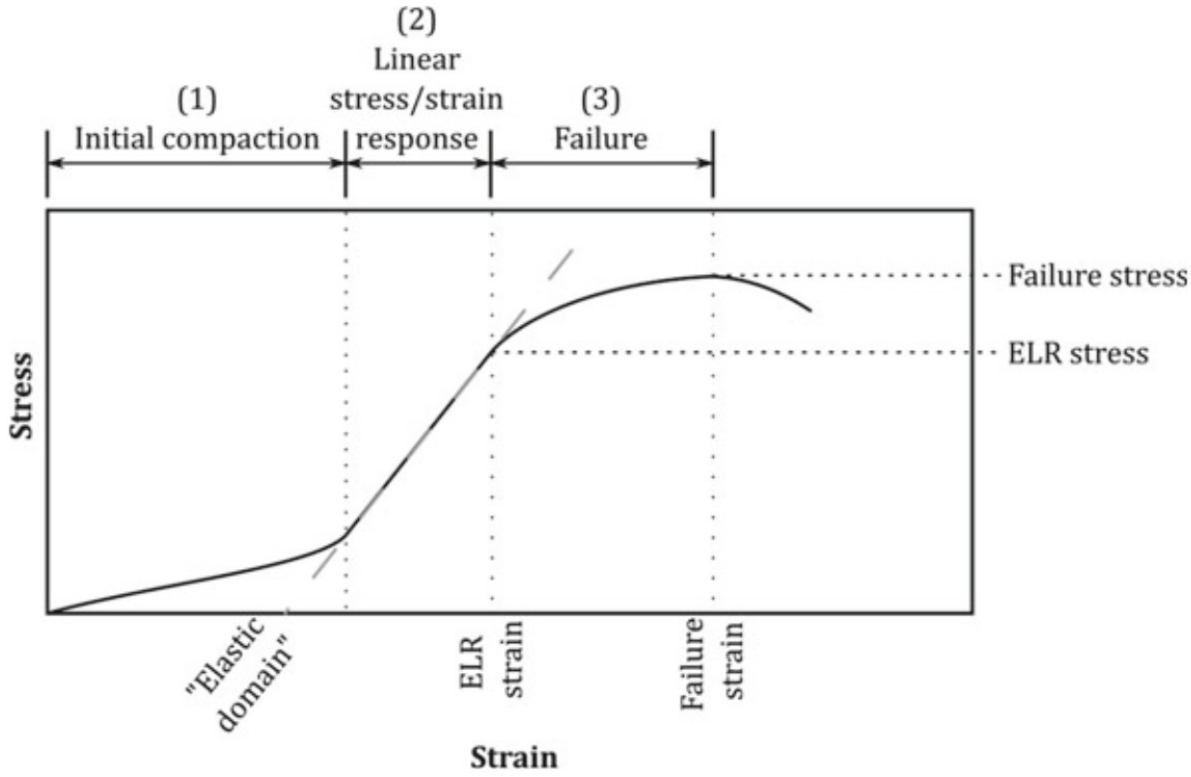


Figure 34 : Courbe type contrainte-déformation d'un échantillon de bauge sèche soumis à une contrainte compressive non confinée (Miccoli et al. 2014).

Selon les conditions de composition de la matrice, le type de contrainte et le confinement des éléments, la déformation entraînée par la contrainte appliquée varie en intensité et en type de comportement.

Une contrainte compressive (Figure 35) force le contact entre les éléments de la matrice. Tant que les éléments solides de la matrice se rapprochent, la résistance ne peut qu'augmenter avec l'augmentation de la contrainte. Tant que le matériau se densifie, le comportement ne peut donc être qu'élastique ou ductile. En revanche, si l'échantillon rompt la contrainte n'est plus directement compressive : les éléments de la matrice se séparent le long de plans *cisaillants* voir *extensifs*, la résistance chute avec l'augmentation de la contrainte, c'est un comportement cassant. Des éléments secs et compactés testés en résistance en compression non confinée, présenteront au bout d'une contrainte donnée un comportement cassant malgré que la contrainte soit compressive, car les éléments séparés par les plans de rupture peuvent s'éloigner sans contrainte en l'absence de confinement.

L'application d'une contrainte directement extensive (P. ex. flexion trois points) sépare les éléments et induit plus rapidement un comportement cassant.

L'intensité du confinement des éléments autorise ou non un comportement de rupture. Dans un contexte confiné, la résistance ne peut qu'augmenter au cours de la contrainte, et le comportement reste

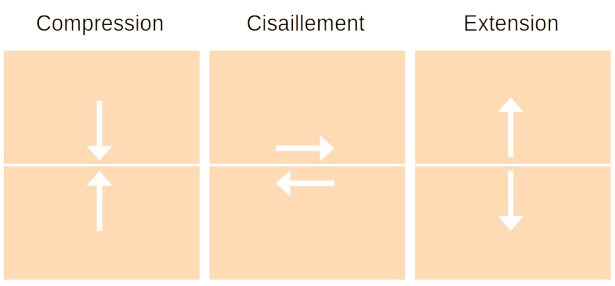


Figure 35 : direction des contraintes appliquées à une matrice composée de terre crue

élastique et/ou ductile. Lors du poinçonnement d'une matrice de terre crue, le mélange alentour « confine » la zone poinçonnée : il ne peut y avoir de comportement de rupture mais seulement élastique ou ductile.

Finalement, le confinement des éléments empêche qu'une contrainte compressive ne se transforme en contraintes plus « cisaillantes » voir « extensives ».

5.1.3 Composition et homogénéité

L'adhérence capillaire des solides favorise les comportements ductiles en favorisant la fermeture des plans de rupture occasionnés par la contrainte, c'est la propriété de *tenacité*. Un sol argileux très hydraté, à l'état « plastique », se comporte de manière ductile même en compression non confinée ; à l'état « visqueux », il peut être ductile même en contrainte extensive. Lorsque l'épaisseur du *manteau d'hydratation* des solides augmente, ils peuvent interagir à plus grande distance par attraction capillaire (Gögelein et al. 2010)(Annexe I, 4.2.3 et 5.1.1.3). La teneur en eau favorise le comportement ductile, mais elle réduit la cohésion globale de la matrice, donc finalement la fermeté (5.1.1) du mélange.

La présence d'éléments élancés prolonge et dévie les plans de rupture au sein de la matière et favorisent des comportements ductiles (Sabbà et al. 2021; Poullain et al. 2023), même en contraintes extensives. Les fibres végétales longues comme la paille de blé ou de chanvre, par leur ancrage de part et d'autre des plans de rupture, maintiennent en contact les agrégats de matrices séparés dans des contraintes cisaillantes (Poullain et al. 2023). Cela force la friction et la cohésion et procure des propriétés de *tenacité*. De petites quantités de fibres permettent ainsi souvent d'augmenter la résistance en compression non confinée (Poullain et al. 2023). Mais d'importantes quantités ont un impact négatif sur la résistance, car elles impactent négativement la compacité (Poullain et al. 2023). Relativement à la résistance en compression, la teneur en fibres présente donc un optimum dépendant de la composition du mélange et des contraintes appliquées. L'ordre de grandeur de la teneur en fibres optimale pour des éléments type bauge sèche non confinés semble être celui de la dizaine de $g.kg^{-1}$ (env. 1%). La résistance fraîche est en revanche beaucoup plus impactée par la présence de fibres que la résistance sèche (Flament 2013). Lorsque le mélange est plus fluide, c'est la résistance du réseau de fibres qui gouverne les propriétés mécaniques. Ainsi, l'apport de fibres ne doit pas être considéré que pour son intérêt pour l'optimisation de la résistance sèche, mais également pour son intérêt dans la résistance fraîche au cours des procédés de mise en œuvre.

Finalement, c'est probablement la différence d'intensité entre d'une part la cohésion interne de la matrice et d'autre part celle au niveau des plans de rupture qui gouverne la distribution entre un comportement ductile ou cassant : dans un mélange peu cohésif (p. ex. peu compact), les plans de rupture se distribuent dans toute la matrice, et la résistance à la contrainte ne varie pas brutalement. Cela semble valable pour les mélanges secs « foisonnés » comme pour les mélanges liquides. L'homogénéité de la matrice favorise également les comportements ductiles : un mélange peu homogène présentera des plans de rupture préférentiels qui entraîneront un morcellement plutôt qu'une impression de déplacement fluide.

5.1.4 Exemples de réponses aux contraintes

La Figure 36 présente la réponse d'éléments composés de terre crue secs à une contrainte en compression non confinée. La réaction de rupture brutale des blocs maçonnés (*earth block masonry*), favorisée par la présence d'interfaces mortier-éléments, montre l'influence de l'homogénéité dans la réponse aux contraintes. La présence de fibres, à l'inverse, prolonge le comportement ductile des éléments de bauge (*cob*).

Mais les éléments de bauge finissent toujours par présenter une augmentation de la déformation avec l'intensité de la contrainte, donc une « rupture », en compression non confinée.

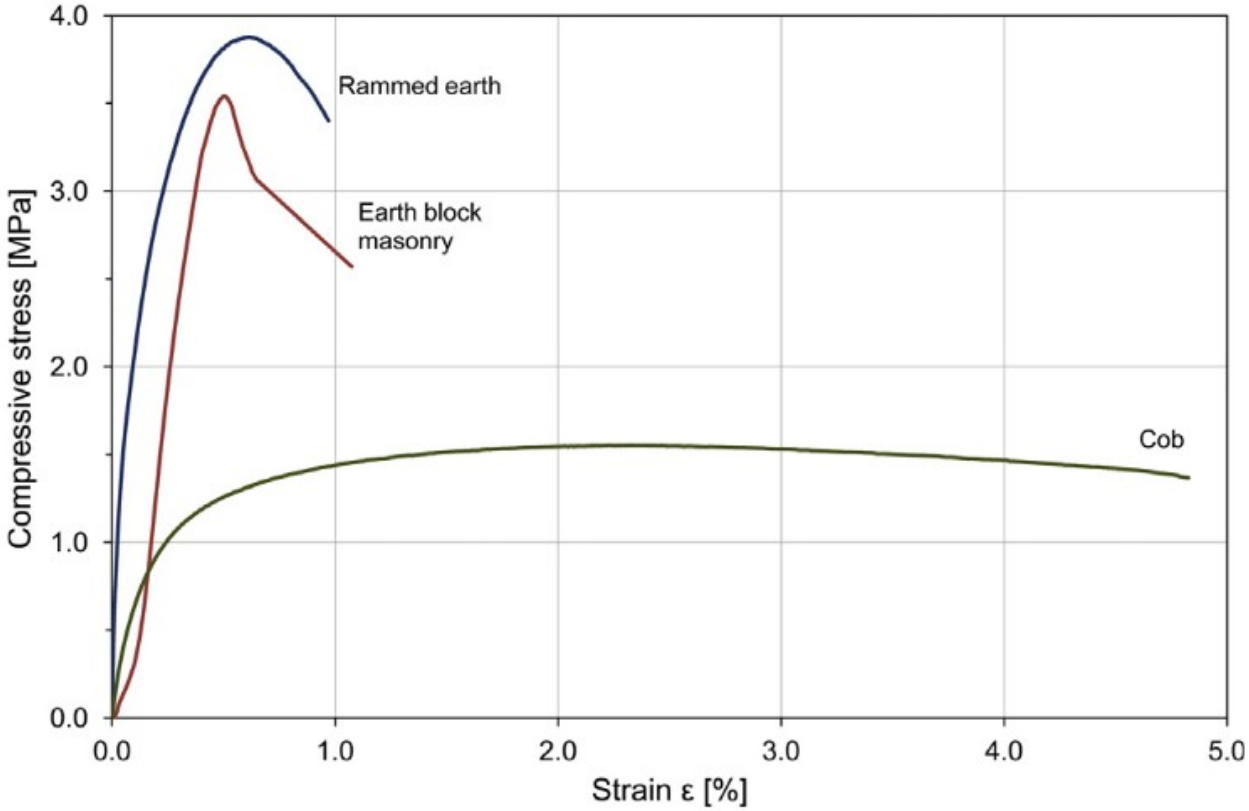


Figure 36 : Courbes types de contrainte-déformation pour des éléments de maçonnerie testés à l'échelle en compression non confinée : maçonnerie d'adobes, pisé et bauge (Miccoli et al. 2014).

En revanche, pour les mélanges de terre à l'état liquide, on ne peut mesurer de rupture car la déformation est relativement continue, les éventuels plans de rupture se referment à mesure que d'autre s'ouvrent. Après une éventuelle déformation élastique, l'augmentation de la contrainte devient purement ductile (Figure 37).

Entre l'« état liquide » et l'« état solide », la réponse aux contraintes est probablement intermédiaire : à mesure que la teneur en eau augmente, le comportement ductile devient dominant. Mais la forme de réponse aux contraintes reste dépendante des conditions de la contrainte (angle, confinement) et de la composition du mélange (teneur en eau, compacité, composition solide).

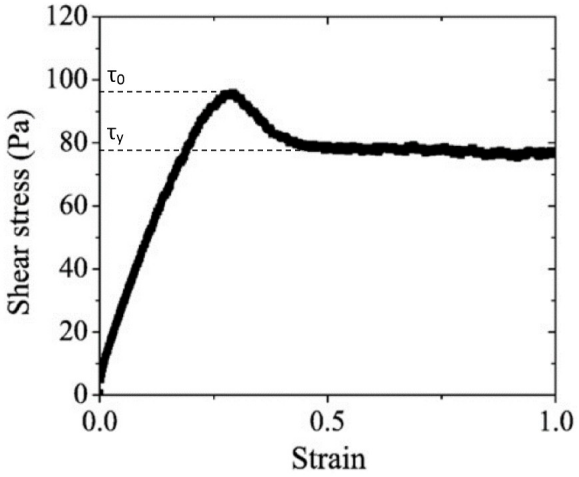


Figure 37: Courbe type contrainte/déformation d'un essai au rhéomètre. t_0 est le seuil de cisaillement, t_y est la résistance en cisaillement une fois le mouvement initié. Celle-ci est inférieure à la résistance au cisaillement mais reste ensuite constante. Vinceslas (2019), d'après Mahaut et al. (2008).

5.2 Friction, cohésion et impact sur la résistance mécanique aux contraintes

5.2.1 Cohésion et friction

Le comportement macroscopique des matrices de terre crue est l'intégration à plus grande échelle du comportement microscopique des éléments entre eux. Pour comprendre les comportements macroscopiques, il est intéressant de détailler les types d'interactions pouvant impacter les matrices granulaires. Deux catégories sont souvent définies : la cohésion et la friction.

La friction entre les éléments solides du sol est une composante importante des comportements mécaniques de la terre, dès lors que ceux-ci sont réalisés en contraintes cisaillantes ou compressives (Brady & Weil 1984). Le long des plans de cisaillement créés par une contrainte, les éléments solides frottent et diffusent l'énergie appliquée. D'autre part, la friction peut imposer une déformation par seuils lors de l'augmentation de la force appliquée: les frottements bloquent les éléments jusqu'à ce que l'intensité du seuil de force soit suffisant pour entamer le déplacement. La résistance à la compression des éléments secs et compactés, mesurée par l'atteinte d'un comportement de rupture, dépend ainsi fortement de la friction interparticulaire, particulièrement dans les sols pauvres en argiles (Brady & Weil 1984). Elle augmente fortement avec la compacité, c'est donc une propriété recherchée dans les techniques compactées (p. ex. pisé, BTC). C'est pourquoi la mécanique des éléments façonnés selon ces techniques bénéficient de l'augmentation de la friction par une forte rugosité des granulats (Smith & Austin 1989; Koutous & Hilali 2019a), et surtout par un empilement granulaire favorable (Annexe I, 5.2.2.4).

La cohésion regroupe l'ensemble des contraintes favorisant l'adhésion des éléments solides réversibles à l'échelle microscopique : la cohésion capillaire ou succion, la cohésion électrostatique, et les forces électromagnétiques comme celles dites de Van der Waals (Jury et al. 1991; Coventry 2004; Meimaroglou & Mouzakis 2024). La dernière catégorie est impactante dans les interactions interfoliaires des argiles (Annexe I, 2.2.4.1.2), mais ce sont les trois autres qui sont les plus significatives dans les interactions cohésives mobilisées dans les procédés de terre crue.

La cohésion capillaire provient de la multiplication des interfaces entre l'eau et l'air entre les grains qui favorise leur agrégation sous l'effet de la tension superficielle. En absence d'eau ou d'air, il n'y a pas de cohésion capillaire (Cuccurullo et al. 2021). La cohésion capillaire entre deux éléments est donc maximisée par un optimum de teneur en eau, entre l'état complètement sec et l'état saturé. Par la somme des interactions de l'ensemble de ses grains, la cohésion capillaire globale d'un mélange est également maximisée par un optimum de saturation. En pratique, en présence d'éléments très fins comme les minéraux argileux, le séchage des éléments n'atteint jamais le stade de la décohésion, ce n'est qu'en appliquant des températures et humidités relatives extrêmes que l'eau fortement adsorbée entre ces éléments s'évapore (Ciancio & Jaquin 2011; Serlet et al. 2016; Cuccurullo et al. 2021). Ainsi, dans les matériaux compactés, la résistance liée à la cohésion capillaire ne fait que croître au cours du séchage et est maximale à l'état « sec » apparent. C'est la puissance de la cohésion capillaire qui permet aux éléments de terre crue secs d'atteindre des résistances considérables une fois à l'équilibre avec l'air ambiant, l'état « sec » (Cuccurullo et al. 2021; Xu et al. 2021).

La cohésion électrostatique intervient entre les charges électroniques des éléments solides et/ou des ions en solution. Les argiles, éléments fortement chargés, peuvent ainsi interagir directement en formant des agrégats ou des matrices plus aléatoires (Sridharan et al. 1988; Bolleni 2019); ou indirectement via le « pontage » ionique que permettent certains ions de la solution comme les ions calcium (Ca^{2+}), en fonction des conditions physico-chimiques de la solution du sol (Brady & Weil 1984; Torrance & Pirnat 1984; Husein Malkawi et al. 1999; Mitchell & Soga 2005; Schroeder 2016; Zeng et al. 2016; Meimaroglou & Mouzakis 2024). Contrairement à la cohésion capillaire, la cohésion électrostatique est présente en milieu saturé en eau. En revanche, elle est également dépendante de la teneur en eau car plus les argiles sont hydratées, plus elles sont éloignées et moins les forces d'interaction, dites de *floculation* en milieu saturé (Nguyen et al. 2018; Bolleni 2019; Vinceslas 2019), sont importantes.

Pour l'ensemble des forces, plus le nombre de contacts entre grains est élevé, plus les forces sont importantes (Scheel et al. 2008). La résistance des matériaux est donc augmentée par : la présence d'éléments fins et élancés (p. ex. les minéraux argileux) qui maximisent la surface spécifique des mélanges ; l'empilement granulaire ; et la compacité.

Enfin, la *cohésion apparente* est parfois définie comme la somme des forces de cohésion et de la cimentation des éléments solides. Elle équivaut à la *résistance en traction* de la terre (Mitchell & Soga 2005; Xu et al. 2021).

La cimentation des mélanges de terre crue est un phénomène complexe, qui résulte de la précipitation d'éléments dissous à l'interface entre les éléments solides (Smith & Austin 1989). Les éléments cimentés sont ainsi cohérent entre eux *(Mitchell & Soga 2005; Meimaroglou & Mouzakis 2024)*. Il est difficile de définir s'il s'agit d'une force cohésive ou d'une variation de la composition solide, particulièrement dans les sols où les éléments cimentés ont des compositions similaires aux ions précipités, comme dans les sols calcaires.

La cimentation peut être minérale ou organique (Mitchell & Soga 2005; Huang et al. 2011; Weil & Brady 2016), et se met en place à plus long terme que les forces de cohésion, par cycles de dissolution-précipitation des ions du sol, ou sous l'influence d'autres phénomènes physico-chimiques ou biologiques (Sun et al. 2022). La présence de cimentation peut également être définie par la réaction des matériaux à la perturbation : un sol présente une cimentation si ses propriétés de cohésion sont inférieures aux propriétés initiales après remaniement de la matrice.

Finalement, les contraintes extensives mobilisent principalement les forces cohésives, souvent même exclusivement ; sauf en présence d'éléments élancés comme des fibres qui « dévient » les plans de

rupture et forcent ainsi l'apparition de contraintes cisaillantes entraînant de la friction. Une fibre « piégée » de part et d'autre d'un plan de rupture entre en friction avec la matrice qui l'entoure. Plus les contraintes sont compactantes, plus la friction prend de l'importance relativement aux composantes cohésives.

5.2.2 Saturation en eau et compacité. États saturés, foisonnés, compactés

L'eau est un paramètre central dans la mécanique des mélanges composés de terre crue. C'est par la variation des propriétés du sol selon ce paramètre que la plupart des procédés de mise en œuvre de terre crue sont rendus possibles : l'ajout d'eau et le séchage permettent de rendre modelable puis de durcir le matériau.

La compacité est un deuxième phénomène qui gouverne les propriétés mécaniques d'un mélange de terre crue. Avec la teneur en eau, c'est sur la compacité que les constructeur.ices peuvent jouer pour faire varier les propriétés de résistance des éléments de terre crue sans adjuvants.

Si l'on parcourt les teneurs en eau d'un état quasi-sec (conditions d'équilibre ambiant) à un état saturé, on peut suggérer :

- une domination des forces de cohésion capillaires à l'état sec, qui décroît jusqu'à devenir nulles à saturation (Coventry 2004; Meimaroglou & Mouzakis 2024).

- une participation des forces électroniques complexe mais significatives à l'état sec (Coventry 2004; Van Damme 2012) pour les sols à composants électrostatiquement chargés, qui deviennent dominantes à saturation et qui sont les seules actives dans les matrices mélangées et saturées (liquides) (Vinceslas 2019).

- une participation plus ou moins conséquente des forces cimentaires selon l'intensité des remaniements préalables et l'intensité de cycles d'hydratation-déshydratation depuis la période de repos.

La Figure 38 représente sur une même figure la résistance mécanique selon la teneur en eau et le passant à 2µm d'échantillons:

- a. et b. de mélanges de terre crue saturés en eau sous forme de mortier (Ji et al. 2023) ou de barbotine (Vinceslas 2019) testés en cisaillement ;

- c. de sols non remaniés (Ekwue 1990) testés en cisaillement ;

- d. d'éléments proctor-compactés à teneur en eau d'équilibre testés en compression non confinée (Fabbri et al. 2022)

A saturation, la résistance en cisaillement est logarithmiquement proportionnelle à la teneur en eau massique (a. et b.). Deux tendances sont observées à partir de la désaturation : les mélanges foisonnés voient leur résistance en cisaillement baisser (c.), tandis que les mélanges compactés voient leur résistance augmenter avec la baisse de la teneur en eau (d.).

Cette représentation n'est possible qu'en acceptant de placer sur un même graphique des essais en compression non confinée, des essais en cisaillement au sein de barbotines mélangées et des essais en cisaillement sur des sols naturels non perturbés, ce qui ne permet pas d'en tirer des conclusions quantitatives. Cependant, elle permet d'esquisser l'impact de la teneur en eau sur les résistances mécaniques pour l'ensemble des teneurs en eau rencontrée dans les procédés de construction en

terre crue : fabrication (mélange, façonnage, séchage) et performances d'usage (mécanique à la teneur en eau d'équilibre).

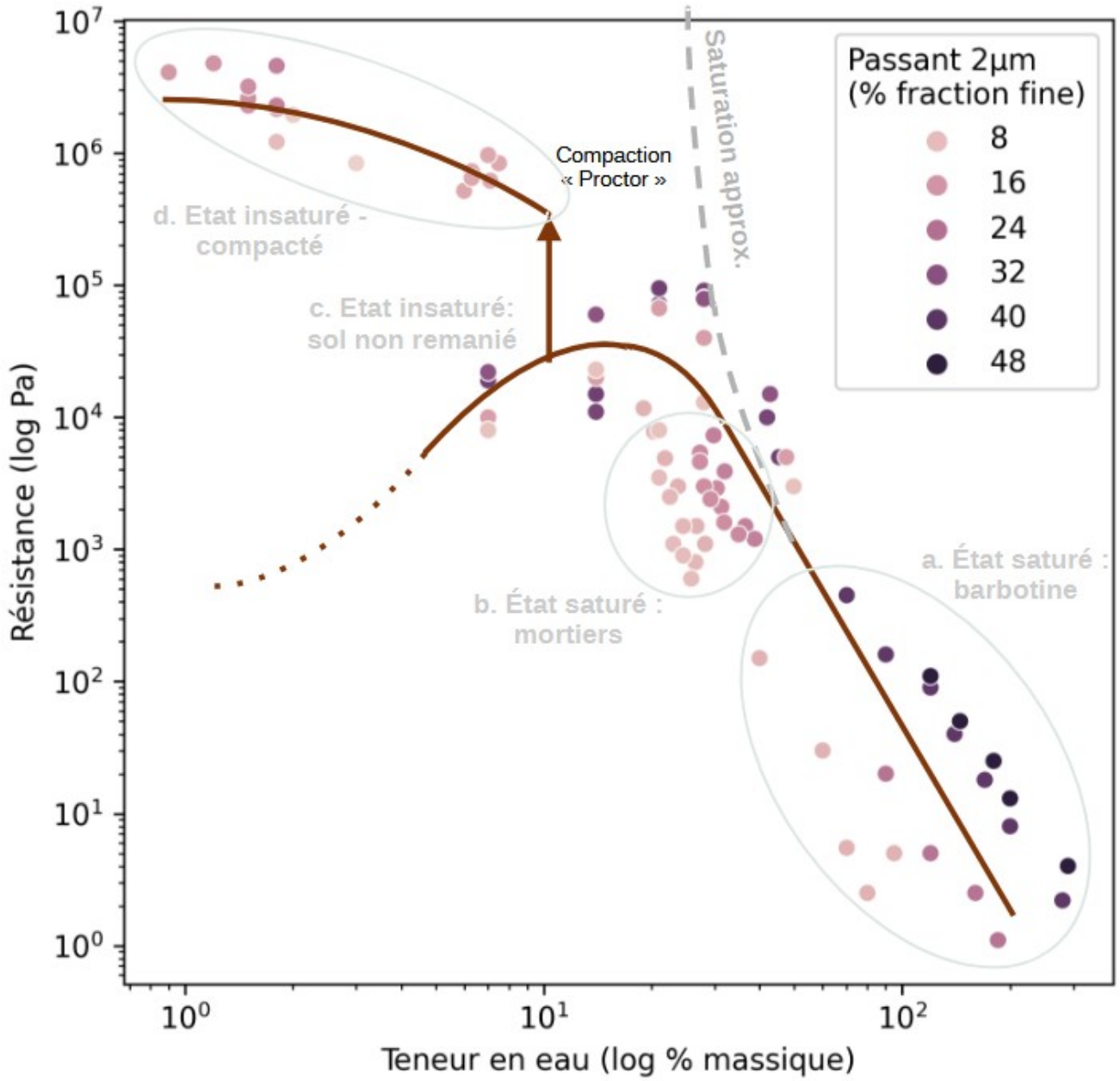


Figure 38 : Evolution des résistances mécaniques en compression et cisaillement d'échantillons de sols naturels selon leur teneur en eau massique. Les données sont issues de Vinceslas 2019 (a.), Ji et al. 2023 (b.), Ekwue 1990 (c.), Fabbri et al. 2022 (d.). Les deux axes sont en échelles log.

Pour une même terre, tant que le mélange est saturé, la variation de la teneur en eau volumique est directement équivalente à celle de la teneur en solides (Figure 39). La résistance décroît avec l'augmentation de teneur en eau, par réduction de la cohésion électrostatique et de la friction entre les éléments (Figure 38a. et b.).

A l'état insaturé en revanche, la compacité et la teneur en eau volumique peuvent évoluer indépendamment. On peut représenter deux chemins-types de désaturation.

Si aucune compaction n'est appliquée au cours de la désaturation et que la matrice est mélangée (c.), la résistance baisse par agrégation/fissuration au sein de la matrice de terre crue (Barnes 2013b): on parle de mélange « foisonné », c'est à dire mélangé sans force compactante.

Si une compaction est appliquée et que dès lors, le matériau n'est plus mélangé (d.), la résistance augmente avec la baisse de teneur en eau par augmentation de la cohésion capillaire.

La désaturation fait bien augmenter les forces cohésives *intergranulaires* dans les deux cas, mais particulièrement dans le cas compact puisque la compacité démultiplie l'effet de la cohésion. Dans le cas « foisonné », il est possible que des forces de cohésion capillaire se déploient au sein des agrégats ; mais la résistance en cisaillement macroscopique résulte essentiellement de la résistance inter-agrégats (Barnes 2013b) et reste donc faible.

Plus la compacité gagnée est forte, plus la courbe de résistance augmentant avec le séchage est élevée. Entre un état foisonnée et hypercompacté, se dessine un éventail de chemins possibles selon le remaniement du matériau au cours de la désaturation.

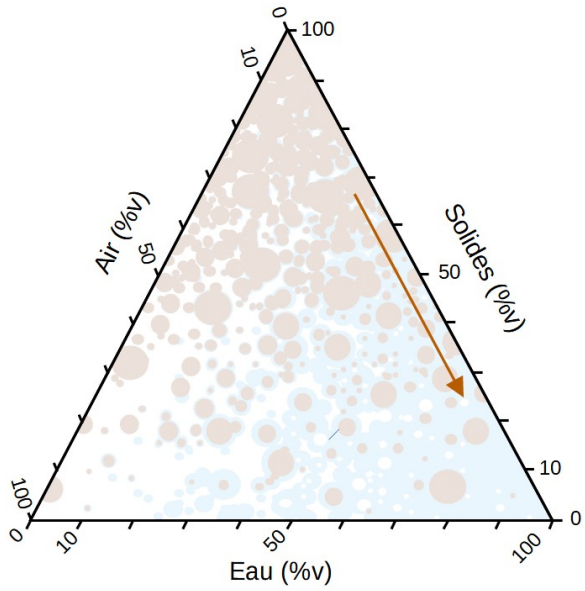


Figure 39 : A saturation, toute augmentation de la teneur en eau équivaut à une réduction de compacité (teneur en solides)

Le passage de l'état saturé à l'état insaturé visibilise l'impact de la saturation, en plus des propriétés de compacité, sur les propriétés mécaniques. La teneur en eau au seuil de désaturation spontané d'un mélange foisonné est donc un tournant dans le comportement d'un mélange composé de terre crue : en deçà, la compacité du mélange gouverne sa résistance.

Par ailleurs, les échantillons de barbotine et de mortiers saturés (Figure 38 b. et a.) montrent une corrélation apparente entre la résistance en cisaillement et le passant à 2µm. La présence d'éléments fins et de minéraux argileux dans cette fraction granulométrique est un facteur important de résistance en cisaillement des barbotines (Vinceslas 2019). La relation est moins explicite pour les autres zones, mais l'intégration de plus de données à une telle représentation pourrait permettre de représenter plus clairement l'impact de la composition sur les résistances des éléments.

Dans cette représentation où les axes sont en valeurs logarithmiques, on voit que la résistance mécanique évolue selon une relation logarithmique avec la teneur en eau dans les mélanges saturés, comme indiqué dans la littérature (Nguyen et al. 2018; Bolleni 2019; Vinceslas 2019). La résistance mécanique compactée semble évoluer également logarithmiquement avec la teneur en eau, mais de manière moins prononcée. Dans tous les cas, s'il est impossible de mesurer les propriétés mécaniques de terres de l'état liquide à l'état d'équilibre avec une même méthode de mesure, c'est essentiellement parce que les échelles de résistances sont considérablement différentes : de quelques Pa pour les barbotines à plusieurs MPa pour les échantillons compactés secs.

Il en va de même pour l'influence de la composition du sol : à même teneur en eau, il peut y avoir plusieurs ordres de grandeur de différence entre les résistances en cisaillement de terres à passant 2µm élevé (40%) et faible (8%). Par ailleurs, plus la teneur en eau augmente, plus cet ordre de grandeur semble s'élargir. C'est probablement l'effet de la représentation en teneurs en eau

massiques : une représentation relative à la saturation devrait permettre de normaliser les courbes de résistances par rapport à l'axe des teneurs en eau.

Trois paramètres sont alors particulièrement influents sur la réponse aux contraintes mécaniques des matrices composées de terre crue : la saturation en eau, la compacité et la composition des solides.

Selon la teneur en eau, les matrices de terre foisonnées réagissent donc selon un schéma relativement semblable, avec un pic de résistance dans ce qu'on appelle couramment l'état plastique. Mais la dynamique résistance/teneur en eau n'est pas exactement la même selon la composition du sol. Plus précisément, elle ne semble pas du même ordre de grandeur. Les sols les plus cohésifs nécessitent des teneurs en eau bien supérieures pour atteindre cet état plastique que des sols grossiers, à faible rétention d'eau. A l'atteinte de cet état, leur résistance en cisaillement est également d'ordres de grandeurs supérieurs, ce qui nécessite des comparaisons en axes logarithmiques (Figure 38).

Il ne suffit donc pas de passer aux teneurs en eau volumiques pour « normaliser » le comportement de terres différentes, c'est à dire pour que celui-ci se « superpose » sur une même représentation. L'évolution de leurs propriétés de résistances avec la teneur en eau est propre à leur composition.

5.2.3 Les états hydriques

L'évolution de la consistance de la terre selon sa teneur en eau a fait émerger les concepts d'« états hydriques ». Chaque état hydrique est sensé représenter un intervalle de teneurs en eau où la *consistance* est plus ou moins homogène, ou varie de manière monotone avec la teneur en eau. A l'inverse, les *limites* des états hydriques sont donc définie par une variation relativement brusque de la consistance selon la teneur en eau.

Les consistances sont à l'origine des ressentis de comportements de la terre au cœur des procédés où elle est manipulée : toucher, modelage, travail du sol, etc. (Brady & Weil 1984). La consistance d'un mélange de terre est donc décrite comme une propriété subjective (Communauté Wikipédia 2023), dépendante de la personne ou de la situation. Dans les outils utilisés pour les formations et les sensibilisations à la construction en terre crue[35], la description des différentes techniques de terre crue s'accompagne souvent de la description de(s) l'état(s) hydrique(s) idéal(aux) pour leur réalisation. Le test de Carazas est un outil pédagogique très utilisé permettant l'appréhension sensible de ces états hydriques (Carazas Aedo 2021), qui sert d'ailleurs de référence dans certaines publications académique (Mateu et al. 2022). Dans l'ordre croissant de teneur en eau des mélanges composés de terre crue, on peut rencontrer successivement les états hydriques suivants, selon les définitions : sec, humide, plastique, visqueux et liquide (Delcroix 1972; Carazas Aedo 2021; CCTC 2024).

Dans la littérature académique, il n'y a pas à notre connaissance de travail de caractérisation intégrant l'ensemble des états hydriques définis par les constructeur.ices dans un même document comparatif. Nous avons cherché à rassembler les informations relatives à la définition des consistances ressenties, à la définition des états hydriques dans les travaux de recherche et à la caractérisation des différentes limites entre les états en laboratoire.

Le Tableau 2 synthétise les descriptions rencontrées. L'analyse a consisté en la recherche de la description des consistances ressenties, et de leur traduction en propriétés physiques des matrices de terre crue (« propriétés correspondantes »). Les propriété de composition solide de la terre, « propriétés intrinsèques », impactant ces propriétés équivalentes de consistance sont rappelées. Sont également rappelées les propriétés dites « de contexte » qui impactent la propriété physique identifiée, non liée à la composition intrinsèque de la terre mais à son conditionnement (compacité,

35 Par exemple https://fr.twiza.org/reference/553/test-de-carazas,-maconnerie-et-enduit-en-terre-crue, ou https://amaco.org/wp-content/uploads/2021/04/20210406_Kit_TestCarazas_web.pdf

organisation de la matrice, taille des éléments, confinement, etc.) ou au type de contrainte appliquée (angle, intensité). Enfin, les méthodes de mesures proposées dans la littérature permettant l'évaluation de la limite sont précisées. Seules sont gardées les méthodes dont la procédure assure une normalisation des propriétés de contexte, ne laissant une variabilité que sur les propriétés « intrinsèques » et la teneur en eau. La limite de retrait au séchage n'a pas été investiguée dans le détail.

Etat hydrique	**« Sec »**	**Humide**	**Plastique-dur**	**Plastique-mou**	**Visqueux**	**Liquide**
Limite inférieure de consistance	-	Présente du retrait au séchage	Ne rompt pas sous contrainte	Pas de fissuration visible sous contrainte	S'affaisse sous son propre poids	S'affaisse fortement sous son propre poids
Propriété correspondante	-	densification au séchage	ductilité	tenacité	résistance en cisaillement	résistance en cisaillement
propriété de composition solide impactante	-	teneur en éléments gonflants (minéraux argileux ; matières organiques)	éléments élancés et/ou cohésifs	éléments élancés et/ou cohésifs	éléments cohésifs	éléments cohésifs
Propriétés de contexte impactantes	-	liberté de retrait, compacité, homogénéité	dimension et/ou confinement de l'élément Angle et intensité de la contrainte	Angle et intensité de la contrainte	dimension de l'élément	dimension de l'élément
Mesure normalisant ces propriétés de contexte	-	?	essais d'Atterberg, dispositif de Barnes (2013), essai de Moreno-Maroto & Alonso-Azcárate (2015)	observation qualitative dans les essais de ductilité ←	fall cone, Torque, essais d'écoulement	fall cone, Torque, essais d'écoulement
Structure des argiles supposée en mélange foisonné		agrégée	Agrégée ?		aléatoire	
Résistance intra agrégats (approx.), résistance compactée	1 MPa	100 kPa	10 kPa		1 kPa	100 Pa
Résistance inter agrégats (approx.), résistance foisonnée	1 kPa	1 kPa				
Collant aux outils	Aucun	Peu	Peu		Forte	moyen
Retrait au séchage	0	+	++		+++	++++
Réponse contrainte compressive confinée « poinçonnement »	Ductile (compaction)		Ductile (Compaction/Déformation)		Ductile (déformation)	
Réponse contrainte cisaillante/compressive non confinée	Cassant		ductile			
Réponse contrainte extensive	Cassant		Cassant		Ductile ?	ductile

Tableau 2 : Consistance des mélanges de terre crue: caractérisation des états hydriques, et propriétés associées.

Les limites de consistance ont fait l'objet de caractérisation, dès le 19e siècle, par Albert Atterberg (O'Kelly et al. 2023). Depuis, de nombreux travaux ont cherché à rendre la méthode initiale de limite de plasticité, jugée trop « opérateur.ice-dépendante », (Accetta 2003; Sharma & Bora 2003) plus reproductible, par la production d'outils (Barnes 2013a) et de nouvelles méthodes de caractérisation (Moreno-Maroto & Alonso-Azcárate 2015). La limite de liquidité a également fait l'objet de nouveaux protocoles de mesure de résistance en cisaillement (Andrade et al. 2011), la méthode de Casagrande étant jugée dépendante de la densité de l'échantillon (Sharma & Bora 2003).

Pour la limite de plasticité cependant, la plupart des méthodes semblent avoir pour objectif de prédire le mieux possible les limites de plasticité d'Atterberg, et non de représenter au mieux la consistance plastique.

Pourtant, les essais d'Atterberg avaient initialement pour objectif l'approximation des *ressentis* de consistance (Accetta 2003). Le protocole initial (dimension du boudin, force appliquée, etc.) a donc probablement été calibré sur le ressenti de ce qu'est un matériau plastique pour Albert Atterberg. Si

on considère que la LP ressentie, c'est à dire l'apparition de la ductilité, qui dépend des conditions de contraintes (taille des éléments, angle et intensité de la contrainte, confinement) (5.1), on peut se demander ce que représente la mesure de LP d'Atterberg, et si elle est vraiment représentative de ce qui est considéré comme « plastique » par les constructeur.ices terre crue.

Par ailleurs, la mesure des LP et LL, si elles mesurent effectivement l'apparition de comportements plastiques ou liquides, ne mesurent pas la résistance atteinte par le matériau foisonné-mélangé dans les contraintes qui lui sont appliquées. Elles permettent seulement d'identifier la zone où le pic de fermeté (5.1.1) apparaît. L'appareil de mesure de fermeté de Barnes permet une mesure directe de fermeté (Barnes 2013a).

Cependant, généralement, les protocoles de mesures de laboratoire n'ont pas d'usage en pratique sur le chantier, c'est-à-dire qu'on ne définit pas la teneur en eau d'un matériau par calcul d'après ces limites. Il n'a pas été nécessaire d'établir des protocoles de mesures normalisés pour que les consistances soient employées dans le langage courant des constructeur.ices. L'apparition d'une terminologie permet d'échanger sur les ressentis, et ce qu'est un état hydrique est probablement un « étalonnage réciproque spontané » entre praticien.nes. Une dynamique qui fait partie de la création d'une culture constructive commune, évolutive et donc adaptable aux contextes rencontrés. On peut alors questionner la nécessité de caractériser et de figer les modalités de mesure de ces variables.

Les limites d'Atterberg, et les autres limites d'états hydriques issues de protocoles de laboratoire, sont ainsi rarement employées en pratique pour définir une teneur en eau exacte d'un matériau, à l'exception de certains protocoles de laboratoire spécialisés ou de travaux d'ingénierie géotechnique. Il semble même que dans la littérature académique, leur utilisation la plus courante se fait dans une certaine abstraction de ce qu'elles sont sensées mesurer : elles sont employées comme facteur de comparaison représentant la « réactivité » d'un sol. On cherche à corréler tel ou tel phénomène aux limites d'Atterberg, afin de pouvoir prédire le phénomène directement par la mesure de ces limites. Pour Accetta (2003), l'usage courant qui en est fait pour la construction en terre crue est ainsi « transgressif, voir même abusif » par rapport aux vocations initiales de ces tests.

A l'inverse, la définition de l'état hydrique d'un mélange sur chantier reste liée au ressenti de consistance. Elle ne vise pas a caractériser la terre du point de vue d'une classification, ou encore dans le but de connaître sa composition exacte, mais plutôt à caractériser sa réaction à de futurs emplois directement en tant que matériau de construction, c'est une approche phénoménologique (2.1).

Les états hydriques ne sont donc pas parfaitement maîtrisés dans la littérature académique, et encore moins dans le champ académique de la construction en terre crue. Ils semblent pourtant être des références intéressantes pour l'étude de la variation des propriétés de matériaux dans les procédés de mise en œuvre. Leur bonne définition apparaît donc indispensable pour la compréhension des choix techniques, mais il est difficile d'envisager qu'elle soit basée sur des mesures physiques sans risquer de s'éloigner de leur signification courante, sensible et évolutive.

5.2.4 Résistance mécanique finale : la recherche de compacité

Les trois facteurs que nous avons identifié dans la littérature comme gouvernant les résistances mécaniques d'un élément composé de terre crue sont la saturation en eau, indiquant l'état hydrique de la terre ; la composition solide du mélange, indiquant l'intensité de sa résistance plastique et/ou compactée et l'étendue de l'état plastique; et la compacité, pour les teneurs en eau inférieures à la saturation.

A l'état sec (d'équilibre), l'influence de la compacité est maximale. D'autre part, si l'on considère que les chantiers de construction en terre crue ne disposent que d'une seule terre et doivent composer avec

ses propriétés, et que la teneur en eau des éléments secs (à l'équilibre) ne peut être choisie, alors la seule variable restante permettant de faire varier la résistance est la compacité. Maximiser la compacité maximise la résistance. Ou plutôt, atteindre une résistance suffisante nécessite une compacité minimale.

5.2.4.1 Recherche de compacité et moindre effort : optimums de compaction

L'application de forces compressives sur un mélange de terre crue non confiné, ou dont le confinement est perméable à l'eau ou l'air, engendre une augmentation de la compacité globale du mélange. C'est par l'application de contraintes compressives plus ou moins conséquentes que les constructeur.ices terre crue font atteindre au matériau la compacité suffisante.

Dans un milieu insaturé, le gain de compacité se fait principalement par évacuation ou compression de l'air de la porosité, remplacé par les solides et l'eau (Figure 40a.). Lorsque le mélange est à saturation, l'eau étant incompressible, tout gain de compacité doit se faire par son évacuation du mélange. Ainsi, un mélange saturé dans un confinement imperméable à l'eau ne pourra pas être compacté (Kouakou & Morel 2009), tandis que si le confinement est perméable, le gain de compacité par évacuation de l'eau est appelé *consolidation (Mitchell & Soga 2005)*, ou parfois *hypercompaction* (Bruno et al. 2016; Cuccurullo et al. 2021).

La force qui doit être imposée à une matrice de terre crue pour une unité de compacité gagnée (d'eau ou d'air évacués) peut être approximée par une résistance à une contrainte de compression au cœur de la matrice. Elle dépend ainsi principalement des propriétés de composition de la terre, de sa saturation en eau, et de sa compacité. Un mélange de terre plus cohésif demandera plus d'énergie de compaction pour atteindre une même compacité (Venkatarama Reddy & Prasanna Kumar 2010). Un procédé de compaction nécessitera une force croissante par unité de compacité gagnée à mesure que celle-ci augmente : il y a rétroaction de la compacité sur la facilité de compaction (Figure 40a.).

Sur les chantiers, si l'on considère le type de terre comme invariable car on cherche à employer une terre à disposition, et que la compacité est la variable objectif, c'est la teneur en eau qui est optimisée au cours du procédé afin d'atteindre une compacité désirée dans un moindre effort : on déplace le « chemin de compaction » pour le faire passer par des teneurs en eau où le gain de compacité par unité d'effort est plus grand.

Dans la littérature, l'effort de compaction est souvent considéré comme constant, et l'optimum de teneur en eau est défini par la variation de la compacité à effort constant. Par exemple, l'optimum Proctor est la teneur en eau à laquelle la compacité d'un mélange est maximale lorsque compacté via la méthode de compaction Proctor, consistant à employer un outil appliquant un damage de force et d'énergie standardisés. Ce point de vue ne doit pas faire oublier une variable objectif qui peut être importante en pratique sur les chantiers : l'économie d'effort, qui bénéficie de la réduction de la force et l'énergie de compaction lorsque cela est possible.

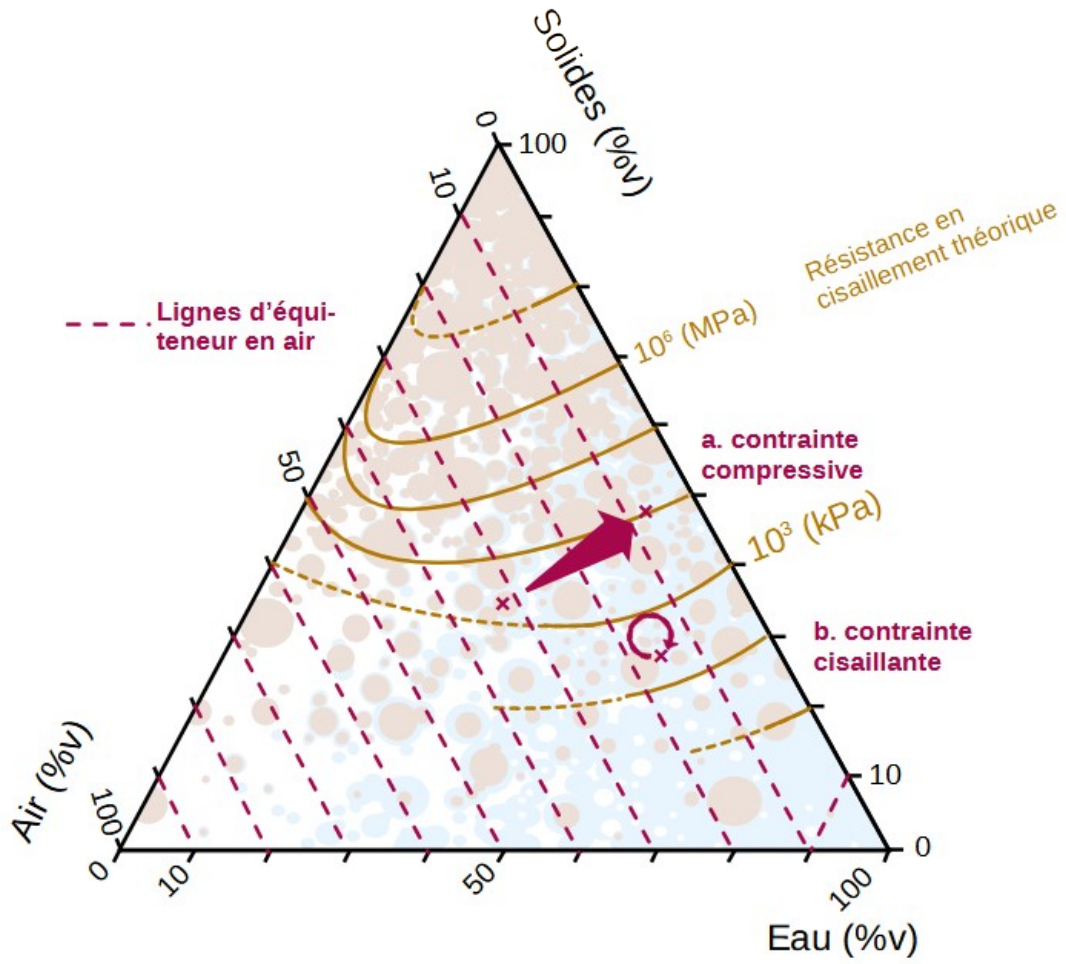


Figure 40: Impact du type de contrainte sur la composition volumique. La largeur des flèches indique la résistance en cisaillement au cours de la variation de composition volumique. Pour une contrainte compressive l'augmentation de la compacité induit une augmentation progressive de la résistance, tandis qu'une contrainte purement cisaillante n'induit pas de variation de composition volumique et la résistance est constante au cours de la contrainte. Notons qu'une contrainte compressive rapproche le mélange de la saturation.

Si l'on admet le point de vue de l'optimisation de la compacité pour contrainte de compaction constante, l'optimum de compacité atteinte est entouré de deux zones de moindres compacité, dont la compaction est limitée (Figure 41):

- côté moins hydraté, par la cohésion capillaire croissante des éléments ;

-côté plus hydraté par la saturation de la porosité qui rend le mélange progressivement incompressible (Kouakou & Morel 2009).

Pour une même terre, lorsque l'énergie et/ou la force de compaction augmentent, la compacité atteinte à la teneur en eau optimale est plus importante. Puisque la compacité a un effet rétroactif sur la compaction, pour atteindre de très hautes compacités il faut mobiliser une énergie considérable (Bruno et al. 2016) (Figure 42). Le gain de compacité par unité d'énergie de compaction est ainsi bien plus « rentable » pour les compactions faibles.

A mesure que la compacité augmente, la saturation en eau de la porosité est plus importante pour une même teneur en eau massique. Ce qui fait qu'on observe une baisse de la valeur de l'optimum de teneur en eau *massique* (Bui 2008; Bruno et al. 2016; Xu et al. 2021) (Figure 41).

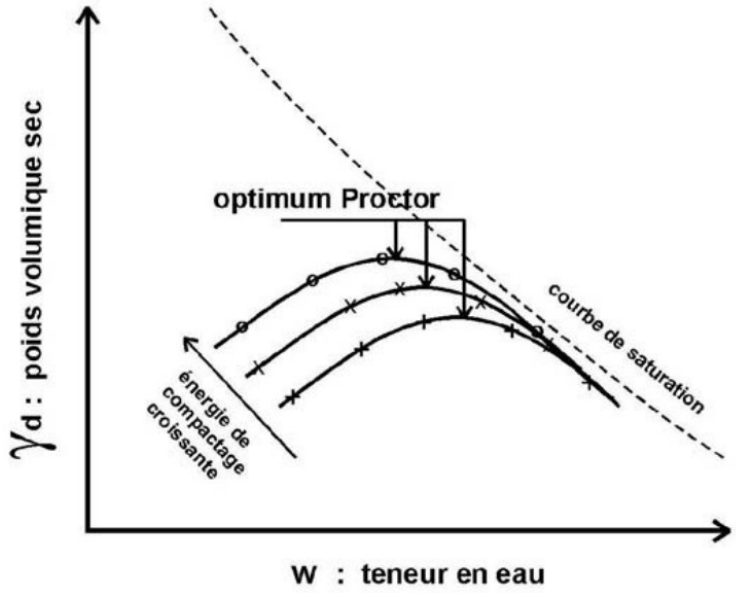


Figure 41: Optimum de compacité type Proctor en fonction de l'énergie appliquée au mélange (Bui et al. 2009). A droite, la compaction est limitée par la saturation et l'incompressibilité de l'eau. A gauche, elle est limitée par la fermeté du mélange, mais un ajout d'énergie permet d'augmenter la compacité atteinte.

Mais la compacité maximale atteinte, quelle que soit l'énergie appliquée, est toujours à la même *saturation en eau* (Xu et al. 2021)(Figure 42): c'est un équilibre entre la « lubrification » de la matrice, permettant la compaction, et la saturation de la porosité par l'eau qui absorbe l'énergie et empêche la compaction.

La force peut être appliquée de manière *statique* ou *dynamique*. Une contrainte statique est une force appliquée de manière constante, dont l'énergie appliquée dépend directement du déplacement de l'outil compactant (Zhemchuzhnikov et al. 2015). C'est le cas des éléments comprimés dans des presses. Une contrainte dynamique est une force appliquée par à-coups. L'énergie transmise dépend du nombre de coups appliqués, qui induit l'avancement de la compaction. C'est le cas des compactions par damage. On ne peut donc pas comparer deux procédés de compaction seulement par la force appliquée, l'énergie doit être précisée (Zhemchuzhnikov et al. 2015; Xu et al. 2021).

Par ailleurs, le procédé d'application de la force, c'est à dire la technique de compaction, a une efficacité énergétique variable. Toute l'énergie dissipée au cours du procédé compactant n'est pas convertie en volume déformé. On a vu que le comportement de la plupart des mélanges composés de terre crue est entamé par une contrainte élastique avant d'être plastique : lors d'une compaction dynamique, on peut supposer que l'énergie utilisée pour la déformation plastique est perdue par les vibrations dans l'élément compacté ou dans l'outil, évacuées au cours des réponses élastiques. Lorsque le mélange approche de la compacité d'équilibre, la plupart de l'énergie de compaction est dissipée dans les vibrations, et très peu est réellement utile à la compaction. Dans les techniques-type de pisé, ces vibrations produisent un son caractéristique, qui est un des indicateurs sensoriels des artisan.es (Goizauskas 2019): plus le son est puissant et homogène entre chaque coups, plus on approche de la compacité d'équilibre.

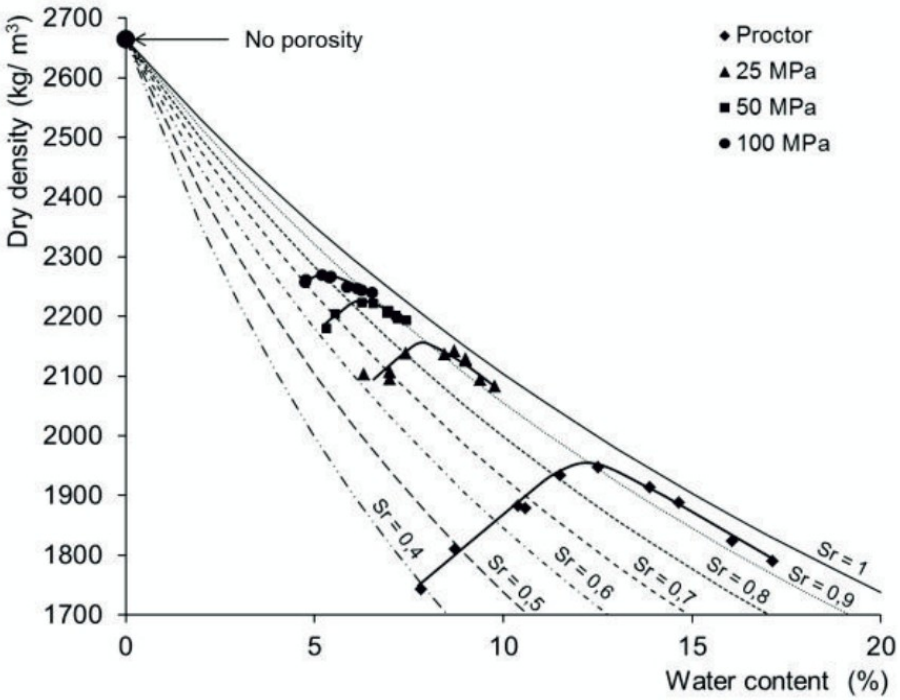


Figure 42 : courbes d'optimums de compaction obtenues pour un essai proctor et des essais de compaction statique à 25, 50 et 100 MPa (Bruno et al. 2016). Pour les compactions statiques, l'énergie de compaction n'est pas précisée, mais il est indiqué que l'essai est arrêté après un temps de consolidation (compaction par évacuation de l'eau). On peut supposer que l'énergie est donc très importante, au moins proportionnelle à l'augmentation de force.

5.2.4.2 Le retrait au séchage comme facteur de densification

L'application active de contraintes compactantes est une manière de faire gagner en compacité des mélanges composés de terre crue. Mais les matériaux fins et argileux présents dans les mélanges composés de terre crue favorisent également le gain de compacité par retrait spontané au séchage (Annexe I, 5.2.2.5). Ce phénomène est rarement considéré *positivement* dans les études relatives à la mécanique des matériaux composés de terre crue, plutôt présenté comme problématique pour des raisons esthétiques ou mécaniques. Pourtant, il ne semble pas négligeable dans les gains de compacité qu'il peut permettre. Par ailleurs, l'impact mécanique négatif n'a pas été clairement démontré à ce jour ; au contraire, sur des échantillons d'adobes ou de mortiers, le retrait au séchage s'est montré systématiquement favorable à la résistance mécanique en compression (Kouakou & Morel 2009; Meimaroglou & Mouzakis 2024), et même favorable dans certains cas en flexion (Meimaroglou & Mouzakis 2024).

Les conditions de séchage d'un élément composé de terre crue impactent le retrait subi par la matrice (Meimaroglou & Mouzakis 2024). On dit que le retrait est *libre* lorsque l'élément sèche sans contrainte mécanique à la réduction de ses dimensions. Si les conditions freinent le retrait, celui-ci est *contraint*.

Un élément au retrait *libre* laisse libre cours aux procédés de retrait élémentaires microscopique de se répercuter directement sur les dimensions de l'élément par la traction réalisée par succion capillaire : c'est le retrait *dimensionnel* (Laurence 2001). Par exemple, de petits éléments comme des briques de terre crue sur des supports peu adhérents peuvent réduire librement au séchage dans les trois dimensions.

Un élément *contraint en traction* dans une ou plusieurs dimensions ne pourra pas répercuter les variations volumiques locales dans les dimensions de l'élément. Par exemple, un mur de terre crue issu d'une technique-type* mise en œuvre *in situ* (Contexte, 2.3) présentera un retrait longitudinal contraint en traction : sa solidarité avec le sol, ou d'autres éléments de structure, empêchent un retrait dans la longueur. Un autre exemple est celui des mortiers et enduits, appliqués sur un support retenant le glissement de rétractation, comme dans le cas de la terre allégée projetée sur un support (Vinceslas 2019). Contraint peut également vouloir dire *favorisé*, si l'élément sèche en contrainte compressive, par exemple dans le cas du retrait se faisant dans la hauteur d'un mur : les éléments du bas du mur voient la contrainte de retrait favorisée dans cette dimension.

Lorsque la cohésion induite par le retrait élémentaire est forte, alors c'est un ensemble d'agrégations locales qui aura lieu, avec l'apparition d'un réseau de macroporosité entre les agrégats, se propageant selon les zones les moins cohésives de la matrice : c'est la *fissuration*.

Il est rare que des éléments puissent présenter un retrait libre dans toutes les dimensions, ou qu'ils soient contraints de manière homogène entre les dimensions. Les conditions de retrait parfaitement libre en présence de forces de gravité ne peuvent en effet être obtenues que par appui sur un support non adhésif, ou par la réalisation de petits éléments sur lesquels les contraintes de friction sur le support par gravité seront négligeables. L'impact de la dimension des éléments est donc décisif. Marfaing et al. (2000) suggèrent que la finesse de briques de terre crue favorise un séchage sans fissuration.

A l'inverse, même les murs massifs présentent un retrait relativement libre dans la largeur et parfois dans la hauteur, tant qu'ils ne « noient » pas une structure interne empêchant le retrait. De plus, si une dimension est contrainte, on suppose que le retrait peut en partie se reporter dans les autres dimensions. On pourra prendre pour exemple le cas des mottes de terre maçonnées en *opus spicatum*, dont le retrait volumique de la longueur du mur est reporté dans sa hauteur au cours du séchage (Annexe I, 5.2.2.7).

Ainsi, le retrait au séchage est très probablement bénéfique pour les petits éléments au retrait libre. Il est incertain sur les éléments massifs (Bui 2008), mais on peut penser que cette composante de gain de compacité est importante pour les techniques-type de bauge, aux teneurs en eau favorisant un retrait significatif.

Lorsque le retrait est libre et le matériau *tenace**, le retrait dimensionnel est maximisé et le gain de compacité est maximal. Dans les autres cas, le rapport entre le retrait dimensionnel et la création de porosité dans la matrice, ainsi que son agrégation en macrofissuration dépend de nombreux facteurs : organisation du *squelette granulaire** (compacité, empilement potentiel), forme des éléments (élancement, rugosité), vitesse de séchage relative entre l'intérieur et la périphérie, etc.

Dans l'obtention d'une compacité adéquate, le retrait entre ainsi comme facteur supplémentaire de recherche d'optimum de compacité pour un moindre effort. Dans les représentations classiques de recherche d'optimum de compacité, à énergie de compaction égale, l'optimum de compacité apparaît décalé vers des saturations plus importantes si l'on considère la compacité *après séchage* plutôt que celle immédiatement après compaction (Kouakou & Morel 2009; Bruno et al. 2016). Sur la Figure 43, des échantillons compactés à forte teneur en eau semblent presque aussi denses après séchage, peut-être plus denses, que les échantillons à l'optimum de compaction. On regrette cependant de ne pas pouvoir identifier précisément les échantillons sur la figure, mais une observation attentive permet cette supposition : on voit un groupement d'échantillons autour du maximum de densité sèche pour chaque force, qui correspond probablement à l'ensemble des échantillons de la pente « saturée » de la

courbe d'optimum de densité. Ainsi, plus la teneur en eau de façonnage est élevée, plus la compacité augmentera par retrait au séchage.

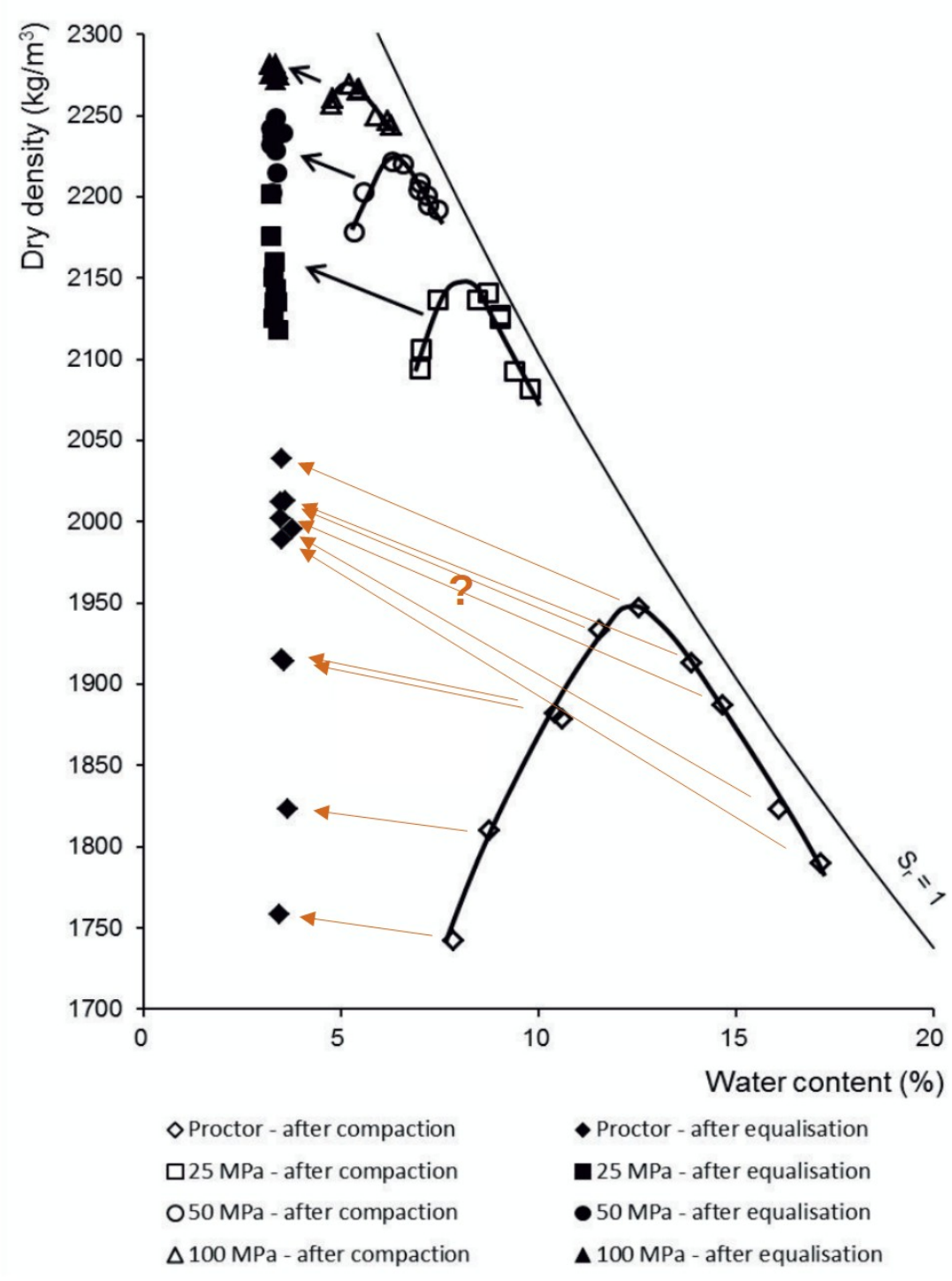


Figure 43 : densité et teneur en eau fraîche et sèche d'échantillons de terre crue compactés à différentes forces en variant les teneurs en eau de modelage. Adapté de (Bruno et al. 2016): pour la compaction Proctor, les flèches marron clair suggèrent la correspondance entre échantillons humides et secs, non fournie par les auteur.ices.

En pratique sur les chantiers, il est difficile de conclure sur la causalité du choix technique par rapport à ce phénomène. On peut suggérer que le retrait autorise les constructeur.ices à passer par des états hydriques plus *avancés* pour les terres les plus cohésives, ce qui permet d'atténuer l'effort supplémentaire qu'imposent les terres cohésives dans leur manipulation par rapport à des terres plus « légères », pour un même état hydrique (Smith & Austin 1989).

5.2.5 Composition des solides

Pour un même état de saturation et une même compacité, les mélanges composés de plus d'éléments fins et cohésifs comme les minéraux argileux présentent de plus grandes résistances mécaniques (Hall & Djerbib 2004; Champiré et al. 2016).

C'est ainsi que les résistances mécaniques en compression d'éléments composés de terre crue secs et compactés sont en général plus conséquentes pour les mélanges présentant des surfaces spécifiques ou des Capacités d'Échange Cationique importantes (Meimaroglou & Mouzakis 2024).

A l'inverse, lorsque la teneur en éléments fins et cohésifs est faible, seule la friction permettra d'apporter de la résistance au mélange (Weil & Brady 2016). Cela explique que les techniques impliquant la compaction des éléments soient privilégiées pour les terres peu cohésives.

De bonnes corrélations peuvent alors être obtenues entre la résistance en compression non confinée de mortiers composés de terre crue à l'état sec et le produit de la CEC par la compacité (Meimaroglou & Mouzakis 2024). Plus le mélange est électroniquement actif et compact, plus les forces de cohésion et de friction sont conséquentes.

Plusieurs auteur.ices suggèrent que de fortes teneurs en éléments argileux réduiraient la résistance en compression des éléments de terre crue par le retrait au séchage et donc la fissuration qui pourrait apparaître (Gomes et al. 2014; Fabbri et al. 2022).

On suppose que la fissuration préformerait des plans de rupture qui favoriseraient la propagation des plans de ruptures provoqués par les contraintes. Il est vrai que certains éléments composés d'argiles très actives fissurent considérablement au séchage ce qui les rend très fragiles. Par exemple, Ansaa-Asare et al. (2023) n'ont pu tester en compression des échantillons de bauge et d'adobes non fibrés à cause du retrait ayant complètement fissuré les échantillons : le passant à 2µm de 40 % (en granulométrie complète) en est probablement la cause.

Cependant, la fissuration liée au retrait est dépendante de la liberté de retrait des éléments dans les trois dimensions. Pour des éléments de petite taille au retrait libre, on peut penser que le retrait serait favorable à la densification plutôt qu'à la fissuration : dans ces cas, les mélanges très argileux permettraient à la fois d'atteindre de fortes densités sans fissurer et d'apporter de la cohésion par liaisons argileuses, permettant par ces deux actions d'atteindre des résistances en compression conséquentes, comme observé par Kouakou & Morel (2009) et Meimaroglou et Mouzakis (2024). Ces derniers obtiennent sur des échantillons de mortiers testés en compression, des résistances croissantes avec la teneur en argiles, et particulièrement avec la teneur en argiles dites gonflantes (smectites), sans observer de décroissance pour de fortes teneurs en argiles. Au contraire, les résistances sont considérables pour les mélanges les plus argileux, contredisant la supposition de faible résistance liée à la potentielle fissuration. La conjonction de fortes cohésions et d'absence de fissuration est probablement ce qui explique que des sols très argileux soient parfois indiqués comme favorables à l'emploi de techniques d'éléments préfabriqués s'il s'agit d'optimiser les résistances mécaniques (Smith & Austin 1989).

En revanche, pour des éléments de grandes dimensions dont le retrait est contraint dans une ou plusieurs dimensions, comme pour des murs monolithiques type bauge ou pisé, il est difficile de savoir si l'impact des argiles sur la résistance est positif, par augmentation de la cohésion dans la matrice, ou négatif, par la fissuration liée au retrait non libre (5.2.4.2). Peu d'essais sur des éléments composés de terre crue sont réalisés sur des échantillons de ces échelles, il est donc difficile de conclure quant à l'impact du retrait sur la mécanique des éléments de terre crue massifs séchés.

A l'état saturé, les paramètres dominants dans la résistance en cisaillement des suspensions de terre crue sont la teneur en minéraux argileux, la nature des argiles et la teneur en éléments solides fins (Sridharan et al. 1988; Serlet et al. 2016; Nguyen et al. 2018; Bolleni 2019; Meimaroglou & Mouzakis 2019; Vinceslas 2019; Vinceslas et al. 2020) qui peut être approximée par le passant granulométrique à 50µm (Coventry 2004; Vinceslas 2019).

Il est clair que le diagramme volumique (Figure 31) ne permet pas de superposer des terres de composition différentes. Il normalise la densité propre, mais elle est bien moins impactante que la composition granulaire et minéralogique. Utiliser cette représentation supposerait d'employer un diagramme par terre.

5.2.6 Homogénéité des matrices de terre crue : un angle mort préjudiciable pour l'étude des choix techniques ?

Dans les procédés de construction en terre crue, la rupture des macroagrégats et des microagrégats argileux est souhaitée afin de favoriser la distribution des composants dans une matrice cohésive. D'autre part, à l'étape de mélange, des éléments peuvent également être intégrés. Dans les deux cas, les procédés d'homogénéisation ont pour objectif principal d'obtenir une homogénéité au moins macroscopique des composants du mélange: solides ou teneur en eau.

Mais la notion d'homogénéité semble relativement peu considérée dans l'étude des procédés de construction en terre crue. Souvent, les propriétés évaluées le sont après homogénéisation « extrême » des échantillons, par exemple par mélange de la terre et de l'eau dans une machine à faible puis très grande vitesse (p. ex. (Lagouin et al. 2021; Ansaa-Asare et al. 2023; Meimaroglou & Mouzakis 2024)), voir réduits préalablement en poudre (Lagouin et al. 2021). Ces intensités de mélange sont probablement plus intenses que celles réalisées sur les chantiers et on peut se questionner quant à l'impact sur la représentativité des échantillons testés par rapport aux matériaux mis en œuvre dans les procédés réels. Wolfskill et al. (1970) suggéraient ainsi qu'il faut considérer avec précautions les « blocs d'essais » préalable à la construction d'un bâtiment, car pour leur réalisation il est « aisé de réaliser un bon travail de mélange » tandis qu'en pratique « les ouvrier.es manipuleraient des quantités bien plus importantes de terre et le mélange ne serait pas aussi bon ». Des artisan.es contemporaines sont également préoccupées par la différence entre les protocoles de façonnage des échantillons sur chantier et en laboratoire (« constructeur.ices », dans).

Pourtant, les propriétés d'homogénéité doivent être centrales dans les procédés de mise en œuvre et probablement dans les propriétés finales des matériaux, car la plupart des techniques-types de construction en terre crue comportent une étape d'homogénéisation, et pour certaines elle apparaît comme demandant un travail* conséquent relativement aux autres étapes du procédé, comme pour la bauge, les adobes ou les torchis. Les études micromorphologiques d'éléments de terre crue permettent de qualifier l'homogénéité des matrices au sein des éléments finis. Les homogénéités des enduits et adobes sont plus importantes que celle observée sur la bauge (Mateu et al. 2022) pourtant toutes trois mélangées par *pétrissage* (*kneading*), c'est à dire par poinçonnement au pied humain ou animal, donc une contrainte compressive favorisant la rupture des agrégats au sein de déformations

ductiles (5.1.2). Pour Mateu et al. (2022), il s'agit d'un indicateur de la l'intensité de travail appliquée dans la préparation du matériau.

L'analyse micromorphologique d'éléments de pisé réalisée par Hamard et al. (Hamard, Cammas, et al. 2016) montre encore moins de traces d'homogénéisation, avec des agrégats initiaux du sol apparents et peu déformés. Le mélange à pisé est en effet peu mélangé. Il est « frassé » (Marfaing et al. 2000) à la pelle et non piétiné, car aux faibles teneurs en eau des procédés-types de pisé, un procédé poinçonnant densifierait la matière sur place sans l'homogénéiser. Le « frassage » ne rompt pas les agrégats les plus cohésifs.

Des recherches ont montré l'augmentation de la cohésion de mélanges de terre crue avec la dispersion chimique des argiles (Meimaroglou & Mouzakis 2019). Ji et al. (2023) montrent l'augmentation de la résistance en cisaillement des mortiers de terre au cours du pompage dans les procédés robotisés d'impression 3D, ce qui témoigne de l'influence du remaniement sur l'homogénéité et finalement sur la cohésion.

Il se dit dans les formations à la construction en terre crue que la dispersion des argiles permet un maillage de la matière et ainsi une continuité de la cohésion. Pour Barnes (2013), la propagation des plans de rupture se fait le long des zones de fragilité, qui sont les hétérogénéités de compacité entre les agrégats. Maniatidis et Walker (2003:67) considèrent aussi l'homogénéité comme une variable importante de la résistance mécanique des éléments de pisé.

Peu d'informations semble disponible sur la variation de l'homogénéité des mélanges de terre crue *au cours des procédés de mise en œuvre.* Quelques études de pédologie agronome s'intéressent à la variation de la distribution de la porosité des sols naturels insaturés selon les contraintes de travail du sol qui leurs sont imposées (Brady & Weil 1984; Nimmo & Park 2004; Oualmakran et al. 2016). Un arpentage plus intensif de la littérature géotechnique, agronomique et de sciences des matériaux (bétons de ciment) pourrait répondre à nos questionnements à ce sujet.

En l'absence d'autres informations, on peut considérer que les procédés d'homogénéisation sur les chantiers organisent progressivement le mélange vers un état d' « homogénéité stable ». La structure de la matrice atteinte n'est pas la même selon les conditions de contraintes d'homogénéisation (poinçonnement, malaxage, « frassage ») et de composition du mélange. Par exemple, un mélange argileux homogénéisé par pétrissage du mélange au pied dans des conditions proches de la saturation peut conduire à la rupture des macroagrégats voir des microagrégats argileux et à leur dispersion dans une matrice : lorsque la déformation est ductile, les agrégats sont déformés puis rompus (Nimmo & Park 2004; Oualmakran et al. 2016) et les constituants solides comme les feuillets argileux sont mélangés dans la matrice vers un état plus aléatoire. Des contraintes plus cisaillantes ou extensives, comme un « frassage » à la pelle, appliquée à un mélange moins saturé, provoquera spontanément l'apparition d' agrégats, et d'une porosité inter-agrégats (Nimmo & Park 2004). L'état vers lequel tend le mélange n'est donc pas le même selon sa composition (ici, la saturation en eau) et les conditions des contraintes.

Le mélange se rapproche ainsi progressivement d'une homogénéité, ou au moins d'une « hétérogénéité stable » par l'application de contraintes similaires répétées, que l'on peut supposer de manière asymptotique. Le temps ou l'intensité nécessaire à approcher significativement cette hétérogénéité stable dépend également des propriétés du mélange et des contraintes appliquées. Par exemple, plus les mélanges sont fins et argileux, plus la cohésion est forte, et plus une teneur en eau importante doit être appliquée pour que les agrégats puissent être rompus au cours du mélange par pétrissage pour la construction en brique crues (Smith & Austin 1989).

Dans l'atteinte d'une résistance mécanique suffisante, on peut ainsi intégrer l'homogénéité dans le compromis de choix de teneur en eau de compaction : de plus fortes teneurs en eau facilitent le mélange, donc apportent plus d'homogénéité et donc plus de résistance pour un même effort de mélange. Puisque la teneur en eau en fin de mélange est a priori celle de la mise en œuvre, l'intégration de l'étape de mélange fait ainsi varier le compromis de teneur en eau dont on a discuté pour la compaction (5.2.4.2), comme pour l'étape de séchage permettant potentiellement une compaction par retrait dimensionnel.

On peut également voir dans la non intégration des conditions d'homogénéité dans les laboratoires une limite à l'approche « performancielle » des choix techniques (Chapitre 1, 2.4). Au regard de la complexité de la prédiction des propriétés de la terre, tester directement des échantillons des matériaux terre crue semble être une approche plus réaliste s'il s'agit d'évaluer ses performances *d'usage*. Mais il est indispensable que les essais se fassent sur des échantillons mélangés et mis en œuvre dans dans les conditions du chantier pour éviter des biais liés à l'homogénéité variable entre le laboratoire et le terrain.

Le diagramme volumique (Figure 31) ne permet pas de représenter l'homogénéité de la matrice. Ainsi, dans une contrainte d'homogénéisation à compacité et teneur en eau constante, la position du mélange ne change pas sur le diagramme (Figure 40b.). Or, selon les conditions de composition et de mélange, la fermeté (5.1.1) varie en même temps que l'homogénéité : l'homogénéisation d'une teneur en eau ajoutée réduit la fermeté, l'homogénéisation des agrégats argileux favorise leur dispersion ce qui augmente la cohésion. Ainsi, la proposition d'un diagramme ternaire volumique et d'abaques de fermeté correspondantes n'est possible qu'en considérant une homogénéité constante. Malgré tout, la fermeté ne varie pas fortement au cours des mélanges si la compacité, la teneur en eau et la composition solide ne varient pas. Les deux premiers cas sont visibles sur le diagramme ; le troisième cas a été discuté (5.2.5) : le diagramme n'est pas le même pour deux terres différentes, ce qui comprend l'amendement d'une terre.

5.3 Exemple pour la bauge : contraintes et variation des propriétés d'un mélange de terre crue.

Afin d'illustrer les impacts théoriques réciproques entre *réponse aux contraintes* et *composition* des mélanges de terre crue, nous explorons ici les variations possibles de l'état d'un mélange de terre au cours d'un procédé de mise en œuvre type bauge. On considère une mise en œuvre dite « traditionnelle* », c'est à dire ici non mécanisée. On peut regrouper les procédés et gestes impliquées dans ce procédé-type* en 5 étapes (Contexte, 2.3.2.2 et 3) :

- extraction: la terre est extraite du sol naturel, à l'aide d'outils manuels (selon les propriétés du sol : pelles, pioches, houes). Elle est transportée et versée à proximité de la zone de mélange.

- formulation et homogénéisation: des composants (eau, fibres) sont ajoutés et le mélange est homogénéisé par piétinement poinçonnant. Souvent, l'eau est ajoutée et en partie homogénéisée avant l'ajout des fibres et leur intégration par mélange.

- façonnage: des éléments transportables (caillebotis) sont façonnés à partir du mélange. Leur cohérence interne dépend de la méthode de transport jusqu'au mur. Ici, on considère des caillebotis lancés à l'aide d'une fourche. Ils sont ensuite posés et plus ou moins piétinés dans la levée en cours.

- rectification: en l'absence de coffrage, le mur peut être rectifié par tranchage et/ou battage. Cette étape n'est pas considérée ici.

- séchage: à mesure de l'évaporation de l'eau, la levée réalisée sèche et durcit.

Dans l'exemple théorique d'évolution de l'état du mélange au cours de ces étapes (Figure 44), on considère une terre de composition théorique relativement équilibrée, à dominante limoneuse ; un type de terre assez représentatif de ce qui est fréquemment employé dans les territoires traditionnels de mise en œuvre de la bauge en Bretagne et en Normandie.

Détaillons désormais chacune de ces étapes ainsi que les enjeux de choix techniques en relation avec les propriétés du mélange.

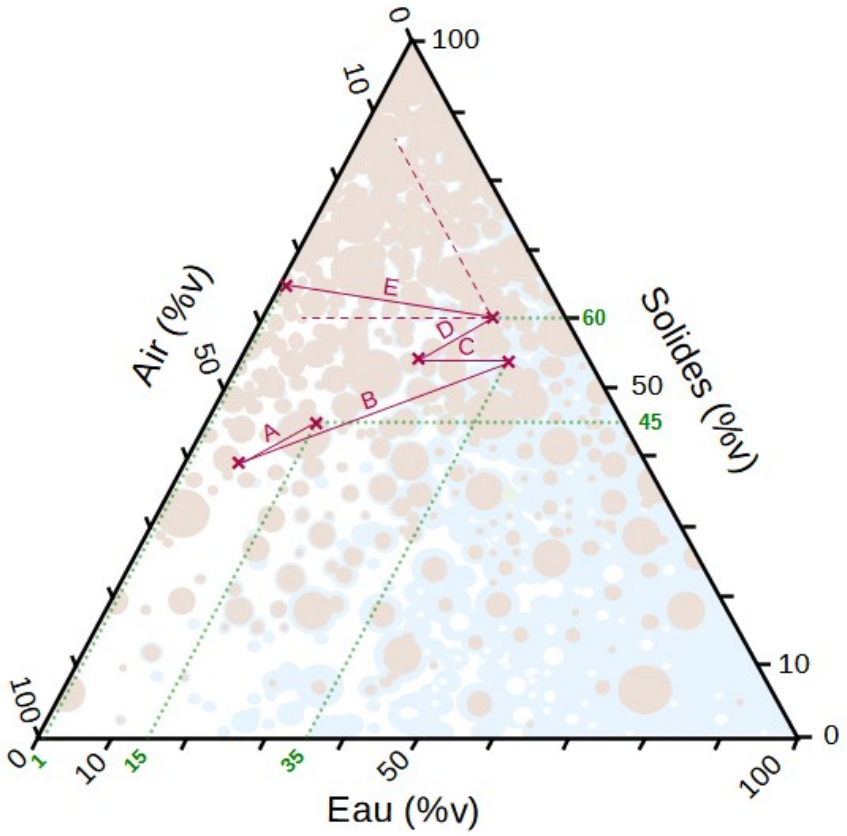


Figure 44 : Représentation théorique de la variation de composition volumique d'un mélange de terre crue au cours d'un procédé type bauge. A : extraction, B : ajout d'eau et homogénéisation, C : ajout de fibres et homogénéisation, D : façonnage, E ; séchage.

5.3.1 Extraction (A)

Un sol agricole naturel faiblement organique a une porosité généralement comprise entre 40 et 70 % (Robinson et al. 2022). Pour le sol extrait considéré dans l'exemple, on considérera une porosité d'environ 55 %, soit une compacité de 45 % (Figure 44). On considère également une saturation en eau d'environ 15 %, réaliste pour un sol limoneux ressuyé.

Au cours de l'extraction manuelle, les agrégats sont rompus, directement par l'action d'extraction ou indirectement au cours des transports et dépôts de la terre extraite. La petite taille des outils manuels entraîne une rupture de la plupart des agrégats supérieurs au centimètre. L'homogénéité de l'organisation des solides croît ainsi dès l'étape d'extraction.

Il y a par ailleurs une certaine augmentation de la teneur en air car de la porosité est créée entre ces agrégats : la terre est « frassée ». Le rapport solides/eau ne change pas, l'air qui pénètre dans le mélange réduit autant la compacité que la saturation volumique (Figure 44, A).

5.3.2 Formulation et homogénéisation : ajout d'eau (B)

L'ajout d'eau est progressif dans un mélange piétiné afin d'éviter le débordement de l'eau ajoutée. Le piétinement du mélange étalé au sol est réalisé de telle sorte à poinçonner la matière, ce qui apporte à la fois de l'homogénéité et de la compacité. Plus la teneur en eau augmente, plus le mélange est fluide et plus le geste de mélange est aisé.

Si l'augmentation de la saturation et de la compacité fait approcher l'état saturé, alors la compacité peut être plafonnée et le poinçonnement n'apporte plus que de l'homogénéité. Mais pour les terres limoneuses faiblement cohésives comme suggéré pour cet exemple, le matériau n'est pas souvent porté à saturation, car les constructeur.ices cherchent à garder une fermeté (5.1.1) suffisante pour la pose en levées ; par ailleurs, une homogénéité parfaite n'est pas toujours nécessaire. On considère ici que la saturation *volumique* en eau atteint 35 %, ce qui est cohérent avec des suggestions de teneurs en eau *massiques* de 20 à 30 % des mélanges de bauge proposées dans la littérature (Fabbri et al. 2022).

Notons qu'à l'échelle de l'ensemble du mélange, la saturation en eau varie en réalité de manière discontinue, par paliers, et la compacité n'augmente pas linéairement selon l'effort de mélange mais probablement plus fortement au début. Sur la Figure 44, le segment B résume le chemin entre le début et la fin de l'étape de mélange de l'eau et ne représente pas ces variations discontinues internes à l'étape.

5.3.3 Formulation et homogénéisation : ajout de fibres (C)

L'ajout des fibres n'est pas toujours indispensable : l'ajout d'eau peut être calibré pour atteindre une fermeté satisfaisante pour supporter la hauteur de levée. Cependant, l'ajout de paille a deux principaux intérêts qui font qu'il est presque systématique pour les techniques-type de bauge :

- les fibres longues permettent une amélioration de la structure du matériau au cours du séchage (tenacité au cours du retrait) et à l'usage (réponses mécaniques ductiles, léger avantage thermique) ;

- les fibres raffermissant le mélange, celui-ci peut passer temporairement par un état hydrique (5.2.3) plus saturé ce qui facilite son homogénéisation, tout en obtenant au final la fermeté nécessaire pour la hauteur de levée désirée. Comme le suggèrent les artisan.es, l'ajout de fibres permet de « pousser l'état hydrique » («Dugelay» 2022a).

Les fibres végétales sont des solides souvent creux, donc peu denses. Il est reconnu que l'ajout de fibres a la plupart du temps l'effet de réduire la densité du mélange et du matériau final (5.1.3). Cependant, l'impact sur la compacité est plus incertain. C'est pourquoi la variation que nous considérons sur cet exemple se lit à compacité égale (Figure 44, C). Malgré cela, l'ajout de solides secs comme les fibres fait baisser la saturation en eau générale du mélange (déplacement horizontal vers la gauche).

A chaque étape d'ajout de composants (eau ou fibres), l'homogénéité vis-a-vis de la répartition des éléments ajoutés au cours de l'étape est d'abord faible et va en s'améliorant. Mais au cours des mélanges successifs, l'homogénéité des composés déjà présents est également continuellement améliorée. Ainsi, au cours de l'homogénéisation de la distribution des fibres, la saturation continue

d'être mieux répartie, et les agrégats argileux continuent d'être rompus et répandus entre les agrégats.

5.3.4 Façonnage (D)

Une fois l'homogénéité souhaitée atteinte, le mélange est transporté pour être mis en œuvre au mur. Dans le cas d'un mélange de bauge relativement ferme, des éléments préformés peuvent être transportés et posés dans la levée en cours. Ils sont alors appareillés de manière plus ou moins organisée dans la levée. Une technique de préformation de mottes est le tranchage du mélange (préalablement piétiné) directement au sol et son prélèvement/transport à l'aide d'une fourche. Cette méthode maintient la compacité atteinte par piétinement. Si les mottes sont passées de mains en mains, on peut supposer qu'elle gagnent encore en compacité à chaque manipulation. La variation d'homogénéité est probablement négligeable.

Lorsque la motte est posée dans la levée, une force est appliquée pour la fusionner aux éléments précédents, par un piétinement plus ou moins conséquent. La compacité interne de la motte peut ainsi légèrement augmenter. Mais l'effort participe surtout à réduire les espaces entre les mottes, donc en quelque sorte à améliorer l'homogénéité et la densité du mélange à l'échelle du mur.

5.3.5 Séchage (E)

Au cours du séchage d'une levée de bauge, des phénomènes de retrait ont lieu au cœur du mélange. A l'échelle du mur, une partie de ce retrait peut être transmis dans un retrait dimensionnel (5.2.4.2), tandis qu'une autre partie contribue à l'augmentation des dimensions de la porosité interne au matériau. La tenacité du mélange, notamment augmentée par la présence de fibres (5.1.3), permet à la fois 1) de favoriser le retrait dimensionnel plutôt que dans la porosité et 2) de forcer le retrait non dimensionnel à se répartir dans la microporosité, ce qui évite l'apparition de macroporosité (fissures). La présence de levées sus-jacentes favorise un retrait dimensionnel vertical.

D'un point de vue composition, en l'absence de retrait dimensionnel, l'évaporation de l'eau pourrait être considérée comme un simple remplacement de l'eau par de l'air à l'échelle de l'élément, donc à compacité égale (ligne pointillée inférieure). Un retrait dimensionnel pur où l'évaporation de l'eau induirait une compaction parfaite de la matière montrerait une tendance à teneur en air égale (ligne pointillée supérieure). En réalité, l'évolution est une combinaison de ces deux phénomènes (Figure 44, E). La majeure partie de l'eau évaporée laisse place à de la porosité, mais l'effet de retrait au séchage n'est pas négligeable sur la compacité finale (5.2.4.2).

Deux composantes d'homogénéité peuvent être considérées. L'évaporation agit par la périphérie du mur, ce qui induit un différentiel de saturation entre le cœur et la surface des éléments. Cette différence croît puis s'estompe progressivement. Si l'on considère que le mélange posé est dans un état relativement aléatoire, la création de porosité engendrée par le retrait ne peut que créer de l'hétérogénéité de distribution des solides. L'échelle de ces hétérogénéités est influencée par la présence de liants (fibres ou autre liants organiques) (voir Annexe I, 5.2.1.2.4).

5.3.6 Analyse : quelles variables suivre pour l'analyse des procédés de terre crue ?

La représentation de composition volumique permet de suivre tout au long d'un procédé de mise en œuvre deux des quatre familles de paramètres clef identifiés pour les mélanges de terre crue : la compacité et la saturation. Le procédé-type* de la bauge traditionnelle montre une évolution non linéaire de la composition de phases volumiques du mélange. Notamment, un « détour » par un état

hydrique plus saturé est volontairement opéré afin de permettre une homogénéisation par poinçonnement et un modelage plus aisé du mélange. Ce type de représentation pourrait être employé pour expliciter les phases de mise en œuvre de la terre au cours des différentes techniques-types de terre crue. L'évolution présentée ici est théorique et devra être confrontée à des mesures *in situ*.

Un troisième paramètre clef a été suivi à l'écrit : l'homogénéité. Invisible sur le diagramme ternaire volumique, nous n'avons pas finalisé de représentation théorique qui soit satisfaisante pour décrire les procédés de construction en terre crue. D'une part, l'homogénéité doit être considérée dans une approche multi-échelles ; et d'autre part, elle n'évolue pas simultanément pour ses différentes composantes : organisation globale des solides (agrégation), répartition de certains solides (fibres), saturation en eau, etc. Les unités adéquates pour décrire l'homogénéité sont également incertaines.

Il est pourtant indispensable de bien décrire l'état et la variation de ces trois composantes afin de pouvoir comprendre l'impact de la quatrième, à savoir la composition solide du mélange, sur les propriétés de performance des procédés (aisance de mise en œuvre, propriétés d'usage, etc.). Un approfondissement de la notion d'homogénéité sera indispensable pour aller plus loin dans la compréhension des compromis en jeu dans les procédés de construction en terre crue.

6 Ouvrabilité : intégrer les propriétés des mélanges au sein des gestes et des procédés

> *Ouvrabilité* : Propriété d'un matériau (bois, plâtre, mortier, béton) à être travaillé.
>
> « On peut appeler ouvrabilité la propriété que possèdent les bois de se laisser plus ou moins facilement travailler d'une manière générale; car les bois durs sont évidemment plus faciles à scier et à râper que les tendres […] » (*Bulletin Technologique*, Société des Anciens Élèves des Écoles Nationales d'Arts et Métiers, 1886)
>
> *fr.wiktionary.org*

Le terme *ouvrabilité* (*workability*) est souvent employé pour désigner un optimum de propriétés du sol ou d'un mélange de terre relativement à une technique[36]. Cet optimum prend en compte de multiples propriétés propres à chaque technique. Ainsi, il n'existe pas *une* ouvrabilité pour une terre, mais *des* ouvrabilités variables selon l'usage qui en est fait. Comme les états hydriques, l'ouvrabilité est un *ressenti* d'aisance de travail de la matière.

L'ouvrabilité est mobilisée dans la plupart des disciplines de science des matériaux, et notamment pour le travail de la terre :

- en géotechnique selon « la facilité avec laquelle le sol peut être placé et compacté comme matériau de remblai » (Barnes 2013b),

- en agronomie, comme comportement idéal pour l'émiettement du sol au labour (Nimmo & Park 2004; Barnes 2013b; Weil & Brady 2016) ou comme résistance optimale au tassement pour la circulation d'engins sur une parcelle ;

- dans l'industrie céramique, c'est la faisabilité de l'extrusion des argiles qui est décrite comme ouvrabilité.

36 Au sens général, pas forcément une technique de terre crue. Voir technique* (Lexique)

Dans les procédés de construction en terre crue, la compactabilité est très étudiée ; bien que l'approche classique soit dans l'optimisation de la résistance pour un effort donné alors qu'en pratique elle est peut-être dans l'optimisation de l'effort pour atteindre une résistance donnée (5.2.4.1). Les autres étapes de transformation de la matière semble avoir reçu moins d'intérêt de la part de la recherche académique. Au détour d'un protocole expérimental, il y est parfois fait allusion : par exemple, Meimaroglou & Mouzakis (2019) indiquent implicitement que de teneurs en eau élevées favorisent l'ouvrabilité des mortiers. Enfin, dans les recherches récentes sur les techniques de construction robotisées (Pinel et al. 2017; Ji et al. 2023), une terminologie d'ouvrabilité est employée pour la description de la faisabilité des étapes robotisées : la « pompabilité » (pumpability) est la possibilité de déplacer le matériau par pompage, l'« extrudabilité » (extrudability) la possibilité d'extruder le matériau ; la « constructibilité » (buildability) est la hauteur d'empilement permise à l'état frais*. Mais la faisabilité de certaines étapes ne semble jamais mentionnée : homogénéisation dans différentes méthodes de mélange ou de broyage, tamisage, façonnage à faible compaction (type bauge), ou encore extraction de la terre.

Dans la littérature technique, le terme ouvrabilité est employé, mais principalement dans les étapes de façonnage: pose des mortiers (Klein 2011) ou modelage de la bauge.

6.1 Plusieurs variables dans un geste, plusieurs gestes dans un procédé

L'ouvrabilité est une « faisabilité », un potentiel dans l'action : compactabilité, labourabilité, extrusibilité. C'est en général une « optimisation multivariée » : il s'agit d'un compromis entre différentes propriétés du mélange, chacune en interaction avec les autres dans le développement de la propriété d'ouvrabilité.

Pour une étape, un geste, une transformation active de la matière, on peut chercher à décomposer les variables gouvernant l'ouvrabilité pour comprendre ces optimums. On l'a fait pour la compactabilité : c'est un optimum entre la fluidité du matériau, qui réduit la fermeté (5.1.1), et de la perte d'énergie par absorption élastique liée à la saturation en eau, qui empêche la compaction.

Passer à l'échelle du geste nécessite cependant de sortir des propriétés de la matrice seule. Dans la compaction, l'énergie reçue par le mélange depuis l'outil n'est pas équivalente à l'énergie effectivement compactante, car des pertes par vibration ont lieu. En fonction des modalités de compaction, par exemple statique/dynamique, l'optimum n'est pas le même pour un même effort fourni dans le geste de compaction.

Plus encore, l'énergie appliquée peut être une énergie métabolique* (du corps humain) ou une énergie externe* ; une énergie appliquée directement dans le geste ou une énergie grise incorporée dans la fabrication de l'outil ou sa préparation, par exemple dans la pose de coffrage. Ces différentes formes et catégories d'énergies et leur importances dans les procédés sont intégrées dans des dynamiques plus complexes qui façonnent les choix techniques. Privilégier l'énergie corporelle ou maximiser la productivité en intégrant de l'énergie non métabolique ? Utiliser du capital* à disposition, sous forme d'outils, ou employer des techniques nécessitant peu de préparation ? Ces choix dépendent des contextes et non des propriétés des mélanges de terre crue, mais impactent pourtant les optimums d'ouvrabilité. Ainsi, un mélange de bauge piétiné par un cheval peut être plus ferme qu'un mélange au pied humain.

Par ailleurs, un procédé de transformation est composé de plusieurs gestes, dont chacun a ses propres optimums d'ouvrabilité. Dès lors, si l'on considère l'ensemble du procédé de transformation-usage de la matière, les ouvrabilités de chaque étape se cumulent dans une « somme d'effort global ».

Mais il ne s'agit pas d'une simple « addition » des quantité de travail à l'optimum pour chaque étape, car c'est le même mélange qui traverse le procédé. Chaque étape conditionne les étapes précédentes. Par exemple, on a vu que si l'on intègre le retrait au séchage à l'optimum de compaction d'un élément, celui-ci est déplacé vers de plus fortes teneurs en eau (5.2.4.2). On a également suggéré que si l'on intégrait la facilité d'homogénéisation du mélange et le gain de résistance qu'elle permet, cet optimum pourrait se déplacer vers de plus fortes teneurs en eau (5.2.6). On a pris en compte les variables d'énergie de compaction, d'énergie de mélange, et de résistance mécanique finale. Comment se déplacerait cet optimum si l'on intégrait les étapes d'extraction, de préparation de la terre, le temps de séchage, les propriétés hygrothermiques et esthétiques ? Une fois que l'on intègre l'ouvrabilité à l'échelle du procédé complet, celle-ci devient une conjugaison complexe des optimums de chaque étape.

Cette complexité est éprouvée par Goizauskas sur des chantiers artisanaux (2019, 69) :

> « le « bon » mélange n'est pas qu'une affaire de proportions de matière. La pratique nous met rapidement face aux enjeux d'efficacité technique relatifs à « la mise en œuvre et au temps de mise en œuvre ». En effet, il nous faut penser conjointement les procédés de fabrication et de pose du mélange pour qu'ils ne soient ni trop fatigants, ni trop longs. »

La conjugaison de l'ensemble des étapes peut également être illustrée par les descriptions de mise en œuvre du Guide des Bonnes Pratiques de la bauge :

> « La terre est mise en œuvre à l'état plastique avec de grandes variations à l'intérieur de cet état. Plus la teneur en eau est importante (plastique mou, voire visqueux), plus le mélange est facile à réaliser, mais moins il est possible de réaliser des levées de hauteur importantes et plus le temps de séchage est long. En outre, il y a plus de tassement et de retrait ce qui entraîne éventuellement de la fissuration et une matière plus poreuse après séchage et donc moins résistante. A l'inverse, lorsque la teneur en eau est faible (plastique ferme, voire humide), la bonne cohésion entre les éléments est plus difficile à assurer. » (CCTC 2018:12)

Pour la seule variable de teneur en eau, y sont considérées : la facilité de mélange, la hauteur des levées et le temps de séchage gouvernant l'étendue temporelle du chantier, le retrait au séchage et la cohésion entre les « mottes » de terre mises en œuvre. L'intégration de la teneur en fibres et de la « teneur en argiles » du matériau dans l'ensemble des étapes du procédé y est finalement résumée dans un tableau général (Figure 45). Ce n'est qu'en considérant l'ensemble des étapes et l'ensemble des paramètres de composition de la terre que l'on peut espérer comprendre ce qui fait le choix d'un procédé de construction adéquat d'un point de vue ouvrabilité.

L'intégration de l'ensemble des étapes de travail de la matière dans la compréhension des interactions entre propriétés de la terre et choix technique est rarement considéré de manière explicite dans la littérature académique. Il est surprenant de constater que l'importance des compromis multi-étapes ne semble explicitée que dans l'étude des procédés de mise en œuvre expérimentaux high-tech (p. ex. impression 3D : (Pinel et al. 2017; Ji et al. 2023)).

	Augmentation de la teneur en eau*	Ajout de fibre	Augmentation de la teneur en argiles* de la terre
Facilité de mélange	Facilite le mélange	Complique le mélange surtout pour certains modes de malaxage	Les argiles* rendent le mélange plus difficile à réaliser
Plasticité* / Malléabilité	Fluidifie la matière	Durcit le mélange	La teneur en argile* permet de conserver la malléabilité sur une plage de teneur en eau* plus large.
Hauteur des levées	Réduit la hauteur possible des levées car la matière est plus lourde et plus fluide	Permet de monter plus haut car les fibres retiennent la matière	La teneur en argiles* permet de monter plus haut car elles assurent une meilleure cohésion* des composants de la terre
Affaissement	Plus important	Moins important	Moins important dans le cas d'une forte teneur en argile*
Temps de séchage	Plus long	Variable suivant les fibres utilisées	Les argiles* augmentent le temps de séchage car elles nécessitent plus d'eau pour sa mise en œuvre
Retrait*	Augmente le retrait* et par conséquent la fissuration.	Diminue la fissuration	Les argiles* augmentent le retrait* car elles nécessitent plus d'eau pour leur mise en œuvre
Densité*	Diminue la densité*	Diminue la densité*	Neutre, dépend surtout de la répartition granulaire
Cohésion*	Augmente la cohésion* finale en permettant lors du malaxage de délier les argiles* et un meilleur enrobage des grains et des fibres, mais en excès la diminue en créant des vides et des fissures de retrait*	Augmente la résistance à la traction* mais trop de fibres fragmente la matière et diminue la résistance à la compression*	Les argiles* assurent la cohésion* de la matière et l'augmentent tant qu'elles ne créent pas de retrait* excessif
Résistance à l'eau		Augmente la résistance à l'arrosage	Les argiles* améliorent la résistance à l'eau

Figure 45 : impacts de la teneur en eau, en fibres et de la teneur en argiles de la terre à disposition sur l'ouvrabilité des étapes des procédés-types de bauge (CCTC 2018:14).

6.2 Plusieurs procédés dans un ouvrage ?

Au-delà des gestes, l'ouvrabilité des matériaux et la réussite des procédés s'intègre dans un contexte socio-technique et environnemental, qui dépassent le cadre de la mécanique directe de transformation de la matière. Par exemple, en reprenant le cas du tassement du sol lors de la circulation d'engins agricoles : s'il s'agit de ne pas compacter, autant atteindre le moment de l'année où le sol est complètement sec ; mais cette variable est à inclure dans un contexte de production agronomique où attendre l'été n'est peut-être pas une option. D'autres variables sont à prendre en compte : le bénéfice sur la production d'intervenir au plus vite sur le champ ; l'impact à long terme du tassement ; les autres contraintes et avantages de l'emploi d'une machine (coûts énergétiques et de

travail), etc. L'optimum d' « ouvrabilité contextualisée » intègre donc des variables de contexte, propre à chaque technique intégrée dans un système sociétal* plus global, et dont les limites ne sont fixées que par les intérêts des individus recherchant l'optimum. Pour Goizauskas (2019), on peut déjà considérer l'horizon de l'ensemble de l'organisation du chantier dans l'optimisation des choix techniques :

> « L'optimisation d'un mélange terre-fibre semble indissociable de l'optimisation de l'organisation générale du chantier. Le mélange et l'organisation s'adaptent mutuellement aux renouvellements des conditions de travail. Il s'agit donc bien d'optimiser tout un collectif terres-fibres-outils-humains, ce qui donne un caractère éminemment sociotechnique à l'espace du chantier » (Goizauskas, 2019, p. 71)

Dès lors, l'intégration de nouvelles variables peut être infinie si l'on cherche à comprendre tous les phénomènes et leurs interactions. Il s'agirait d'une véritable Analyse de Cycle de Vie, qui aurait pour originalité de prendre en compte le temps de travail et d'autres facteurs « sociaux » en plus des considérations environnementales classiques, ce qui la rend d'autant plus dépendante du contexte spécifique du chantier. L'intégration holistique de ce qui peut gouverner les choix techniques au-delà des propriétés des mélanges apporte une complexité qui laisse peu de place à des prédictions de ce qu'est une technique convenable selon les propriétés d'une terre dans des modèles mécanistes. Expliquer l'impact des propriétés intrinsèques d'une terre à disposition sur le choix d'une technique de construction en terre crue nécessite donc de comprendre des optimisations multivariées pour chaque geste, multi-gestes pour chaque procédé, et dépendantes du contexte du chantier.

Ces dernières observations vont dans le sens de notre première hypothèse (Chapitre 1, 4), à savoir que la considération unique de propriété d'usage du matériau final (résistance mécanique, *etc.*) ne peut décrire la diversité des facteurs de choix techniques. Les *propriétés cibles**, c'est à dire les variables de réussite d'un choix technique, sont multiples et interdépendantes.

Par ailleurs, la deuxième hypothèse est désormais démontrée : les *propriétés de prédiction** qui pourraient être envisagées pour approximer les propriétés cibles sont plus complexes que des propriétés de composition classiques comme la granulométrie ou la composition minéralogique, et surtout, dépendent du contexte du chantier.

Pourtant, en pratique, les artisan.es s'orientent vers certains procédés plutôt que d'autres, et ne se reposent pas sur des abaques ou modèles numériques. En effet, la compréhension de l'interaction des propriétés de la terre avec les choix technique se fait par « transmission de savoir-faire de la part des pairs sur chantier » (CCTC 2023:16), et que « l'acquisition des compétences en matière de caractérisation de la terre » fait appel à « un apprentissage expérientiel du matériau, qui se construit sur la durée. » (CCTC 2023:16). C'est donc plutôt par l'enquête de terrain que l'on peut comprendre les liens effectifs entre terre et choix techniques au cœur des enjeux sociétaux particuliers des chantiers. Par exemple, par l'observation des compromis sur les chantiers et par leur explication par les constructeur.ices, ou par des traitements statistiques sur les choix effectivement réalisés face aux propriétés de la terre à disposition. Ce chapitre peut alors devenir un support d'analyse pour les résultats de telles approches sociologiques, où l'on cherchera à extraire l'influence matérielle des propriétés de la terre sur les phénomènes sociaux observés. Surtout, l'observation des phénomènes réels est indispensable pour éclairer notre troisième hypothèse (Chapitre 1, 4) en identifiant l'importance relative des différentes *propriétés cibles* dans les choix techniques, et notamment l'importance des propriétés de la terre comme déterminisme matériel sur les phénomènes sociaux.

7 Conclusion du Chapitre 2

Il est difficile de passer des propriétés intrinsèques aux propriétés mécaniques des mélanges par des estimations calculées. La compréhension des phénomènes mécaniques des sols selon leur composition est approximative, et la plupart des études évaluent des corrélations simples entre phénomènes sans parvenir à des modélisations. Les sols sont des milieux infiniment complexes qui ne se laisseront pas modéliser aisément. Surtout, l'étude de la mécanique des sols est morcelée entre les disciplines (rhéologie, géotechnique, pédologie agronome, etc.). Chaque discipline opère sur des plages limitées de teneurs en eau, ce qui complique l'émergence et l'utilisation de modèles d'interactions entre propriétés des sols valides sur l'ensemble des états hydriques. Il est ainsi impossible de décrire quantitativement les phénomènes de manière continue dans l'ensemble des dimensions que les mélanges de terre crue traversent dans la diversité des procédés de mise en œuvre : états hydriques, compacités, compositions, homogénéités.

Une piste d'amélioration de cette compréhension serait premièrement un partage des données de recherche plus fluide afin de changer d'échelle dans la compréhension des phénomènes et de les intégrer dans des schémas continus de teneur en eau, compacités, homogénéités, résistances, comme pour l'ébauche proposée en Figure 38. Pour cela, une homogénéisation serait nécessaire entre les méthodes de mesure et les terminologies employées. Dans cette thèse, nous avons notamment cherché à homogénéiser la terminologie relative aux fractions granulométriques et aux états hydriques.

Malgré l'impossibilité de modélisations mécanistes, on a pu cependant saisir les principales tendances des liens terre-mécanique par le récit :

- la réponse aux contraintes imposées aux mélanges de terre crue est la résultante macroscopique d'interactions microscopiques dans le matériau, cohésives ou frottantes ;

- la réponse à une contrainte dépend fortement de la contrainte elle-même : extensive ou compressive, confinée ou non ;

- les propriétés gouvernant la variation de réponse à une contrainte donnée sont la composition solide du matériau initial, mais également sa teneur en eau, sa compacité, et son homogénéité. On peut décomposer chacune de ces 4 propriétés par l'influence de chacune sur la friction et les cohésions.

Dans la compréhension des propriétés de la terre, nous pensons qu'il pourrait être judicieux de conceptualiser les mélanges de terre crue en termes volumiques plutôt que massiques, comme c'est le cas dans les travaux de mécanique des sols: compacité plutôt que densité afin d'éviter l'impact de la densité propre des matériaux ; saturation plutôt que teneur en eau massique pour normaliser les réponses relativement aux plages de consistance des mélanges de terre ou « états hydriques ». L'emploi d'outils comme le diagramme ternaire volumique permettrait une représentation des variations de compacité et saturation en eau de la porosité dans les procédés de construction en terre crue. Cependant, elle ne résoudrait pas l'impact de la composition des terres et de son homogénéité sur les propriétés des mélanges.

La compréhension des impacts de l'homogénéité de la terre est à nos yeux un angle mort de la recherche sur la construction en terre crue. L'essentiel des essais se fait à « homogénéité parfaite », ce qui est peu représentatif des conditions sur site. Il faut donc dépasser la caractérisation classique « teneur en eau + densité » et passer à une analyse systématique de « saturation + compacité + homogénéité » pour analyser les états d'une terre unique. Décrire ces trois variables est également indispensable s'il s'agit d'analyser l'impact des propriétés de composition de différents mélanges de terre (p. ex. composition minéralogique) sur des propriétés d'usage ou de mise en œuvre. En absence

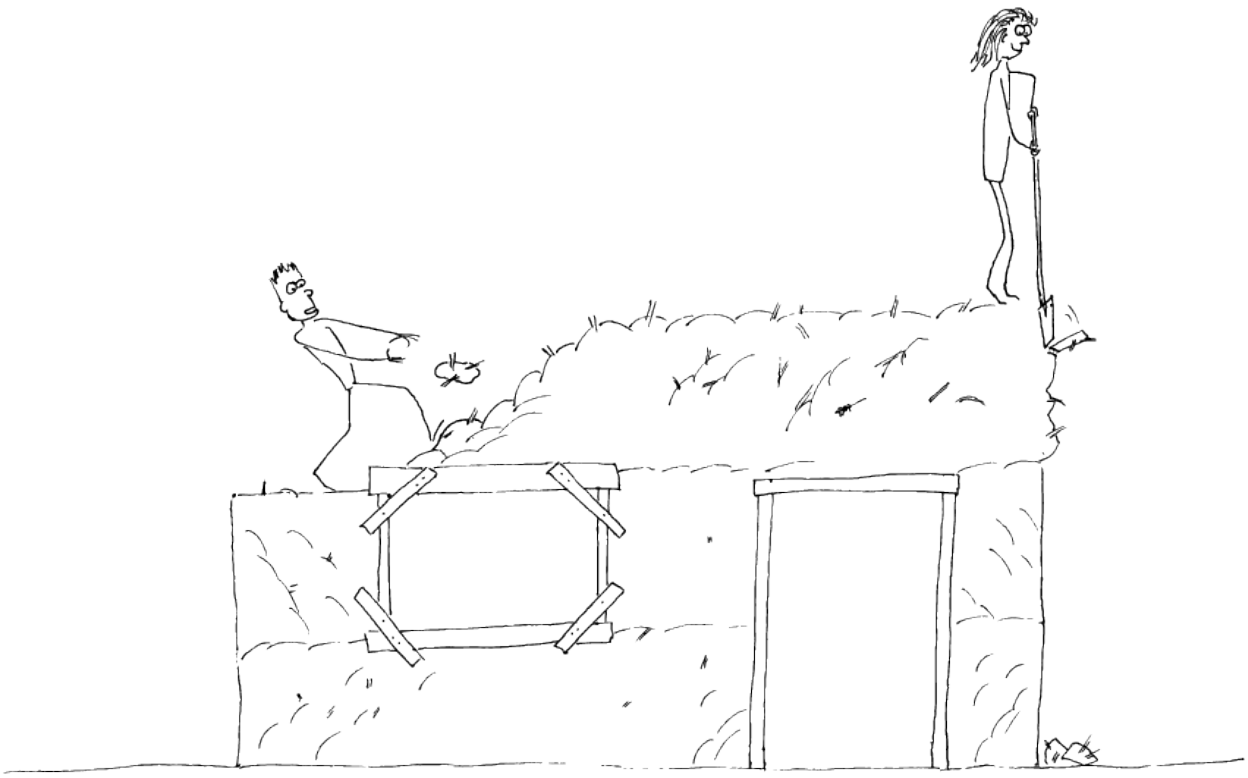
de considération pour une de ces variables, trop de biais peuvent se présenter dans les schémas expérimentaux. Par exemple, là où les auteur.ices pensent ne faire varier qu'un paramètre de composition, l'homogénéité ou la compacité pourraient varier de manière invisible. C'est là une considération importante dans l'établissement d'une « approche performancielle » présentée au chapitre précédent : il est indispensable que les essais se fassent sur des échantillons mélangés et mis en œuvre dans les conditions du chantier pour éviter des biais liés à cette propriété. Une association du diagramme volumique (saturation et compacité) avec des diagrammes d'état décrivant par ailleurs l'homogénéité et des propriétés de composition pourrait permettre de décrire rapidement et de manière détaillée l'état de matrices de terre crue. La description de l'homogénéité, multiscalaire et multivariée, nécessite d'être mieux explorée pour proposer des méthodes de description graphique. La composition chimique et morphologique des éléments du sol est également à creuser, tant les paramètres d'intérêt sont nombreux.

Dans une recherche de moindre effort, chaque geste de transformation de la matière peut être facilité en optimisant les propriétés du mélange. Pour chaque étape, cette conjonction d'un ensemble optimisé de propriétés du mélange peut être appelé l'ouvrabilité. L'ouvrabilité peut être perçue à différentes échelles : geste, mise en œuvre, cycle de vie. A l'échelle du geste, la pratique permet d'identifier les variables clef : pour homogénéiser la terre, plus il y a d'eau, plus c'est efficace. Au passage du geste au procédé de mise en œuvre multi-gestes, les optimums de propriétés du mélange se conjuguent sur l'ensemble du procédé : plus d'eau facilite l'homogénéisation, mais limite le gain de compacité. Enfin, si l'on considère l'ensemble du cycle de vie de l'élément construit, l'ouvrabilité devient une optimisation de système complexe multivarié.

Dans la description des procédés de construction en terre crue, la littérature académique se concentre la plupart du temps sur l'optimisation des propriétés d'usage, et notamment la mécanique finale des éléments. Dans l'exploration des procédés et de l'ouvrabilité, et notamment lorsqu'on considère l'ensemble du cycle de vie et de ses enjeux, il apparaît que le besoin de résistance mécanique à l'usage n'est qu'un facteur secondaire dans le choix technique. Une observation qui va dans le sens de la première hypothèse proposée pour ce travail de thèse (Chapitre 1, 4): les *propriétés cibles* retenues dans les travaux académiques traitant de la construction en terre crue ne sont pas les mêmes que celles recherchées en pratique par les constructeur.ices.

La complexité du matériau terre, la diversité des procédés artisanaux et la diversité des objectifs des projets de construction en terre rendent difficile voire impossible la modélisation mécaniste des interactions mélanges de terre / travail de mise en œuvre / propriétés d'usage, validant notre seconde hypothèse (Chapitre 1, 4). Alors, si des recherches sont poursuivies dans le but d'aider à la décision dans des choix de techniques de construction en terre crue, les analyses de laboratoire ne seront pas suffisantes. Une observation des phénomènes réels sera indispensable, car seuls les choix techniques réalisés *in situ* peuvent potentiellement intégrer l'ensemble des enjeux du cycle de vie du matériau terre et leur articulation au cœur des procédés de mise en œuvre.

Chapitre 3A : Bâti historique et facteurs environnementaux – méthode



Résumé :

La complexité des phénomènes reliant la composition de la terre à la réalisation d'un choix de technique de construction en terre pertinent ne permet pas de modéliser ce choix de manière « mécaniste ». Cependant, on admet généralement que dans l'ensemble certaines propriétés des terres sont favorables à l'emploi de certaines techniques. Ainsi, il est possible que les bâtiments historiques construits en terre crue montrent des corrélations entre ces propriétés de la terre et les techniques de construction en terre crue choisies. Dans ce chapitre, une méthode permettant l'évaluation de ces corrélations est décrite et analysée. Elle consiste en un croisement spatial de bases de données, décrivant d'une part des bâtiments en terre géolocalisés et d'autre part les sols sous-jacents à ces bâtiments.

La mise en place de la méthode suppose de bien comprendre les influences potentielles de l'environnement sur les choix des techniques de construction historiques. On s'appuiera alors sur l'expérience de l'application de méthodes semblables dans le champ académique*, ainsi que sur une analyse bibliographique des phénomènes sociétaux* qui ont pu conduire au déploiement d'une technique de construction sur un territoire.

Le choix des données mobilisées est également un facteur influant sur la qualité des résultats. Plusieurs possibilités sont envisagées et décrites, tant pour les données pédologiques que les données décrivant le patrimoine. Les différentes sources de données ainsi que les transformations qui leurs sont appliquées pour l'analyse sont explicitées. Leurs performances seront ensuite comparées dans le

chapitre 3B. Enfin, la méthode de croisement de données est décrite. L'ensemble des algorithmes du flux de traitement de données sont disponibles en accès libre (Verron-Guillemot 2025).

1 Introduction

La communauté académique s'est jusqu'alors principalement attachée à évaluer la *convenance des terres*, c'est à dire l'adéquation de différentes terres à une technique donnée, par l'évaluation des propriétés d'usage des matériaux façonnés, et particulièrement de ses performances mécaniques (Chapitre 2). Pourtant, les témoignages et les documents techniques des artisan.es* de la filière terre crue montrent que c'est essentiellement le choix de la technique qui varie en fonction de la terre à disposition, donc qu'il s'agit d'une question de *convenance des techniques* (Chapitre 1, 4). Dans ce choix, les *performances de mise en œuvre* sont en interaction avec les *propriétés d'usage* dans le choix technique* (2.2). Les propriétés des ressources* disponibles, et a priori des sols alentours, doivent donc jouer sur les propriétés constructives de la matière aux étapes primordiales de son cycle de vie : facilité d'accès, de préparation et de mise en œuvre (Hamard, Cammas, et al. 2016).

L'information concernant les savoir-faire constructifs des différentes techniques de construction en terre crue qui a survécu jusqu'à nos jours est dérivée de rares témoignages de constructeur.ices qui les ont pratiquées eux-mêmes ou en ont été témoins directs. En effet, la construction en terre crue est tombée en désuétude en France à partir du 20e siècle pour disparaître presque complètement après la seconde guerre mondiale, entraînant avec elle l'ensemble des savoir-faire vernaculaires*, rarement décrits dans les textes à l'époque (Hamard, Cammas, et al. 2016). Ces témoignages, ainsi que la redécouverte des savoir-faire par l'observation du patrimoine et expérimentations d'artisan.es passionné.es, décrits comme l' « avant-garde consacrée » par Villain (2020), ne représentent qu'un maigre échantillon de la diversité des savoir-faire constructifs de mise en œuvre de la terre crue qui existent et ont existé. Dans le sillage de ces premiers travaux d'étude du patrimoine bâti en terre crue, de plus en plus nombreux, ce chapitre a pour objectif d'éclaircir les choix techniques opérés dans la construction vernaculaire avant la massification de l'emploi des matériaux industriels* dans le secteur de la construction, en étudiant le patrimoine vernaculaire bâti en terre crue à l'aide de traitements statistiques spatialisés.

Étudier le patrimoine vernaculaire pré-industriel* plutôt que le bâti contemporain présente plusieurs avantages non négligeables. Dans la plupart des cas, il a été édifié dans un contexte de rationalité paysanne*, avec une disponibilité de ressource énergétiques et matérielles bien moins importantes que les édifices construits en contexte industriel.

On peut considérer que les techniques vernaculaires pré-industrielles, fruit de plusieurs siècles d'adaptation empirique* aux conditions locales (Bui 2008; Gomes et al. 2014; Hamard 2017; Mileto et al. 2019; Fabbri et al. 2022), étaient alors au plus proche d'un optimum technique, environnemental et social (Hueto-Escobar et al. 2022). Les techniques employées ont donc passé les tests d'*ouvrabilité holistique* (Chapitre 2, 6) dans ces contextes économiques, ce qui les rend particulièrement intéressantes dans l'optique de les réemployer dans notre contexte de désescalade énergétique et matérielle. D'autre part, tous ces bâtiments ont perduré jusqu'au XXIe siècle : c'est une vraie démonstration de performance d'usage et de durabilité en conditions réelles (Hamard et al. 2018).

L'analyse des matériaux composant les bâtiments vernaculaires intéresse donc les chercheur.euses et passionné.es qui investiguent les choix techniques des constructeur.ices du passé. Les techniques choisies peuvent notamment être considérées comme parmi les plus adaptées aux terres disponibles, dans une préoccupation d'économie de moyens. L'analyse des relations entre *propriétés de la terre employée pour bâtir* et *choix technique* pourrait donc permettre de déceler des préférence de techniques-type selon les types de terres disponibles.

Il est communément admis que la présence de patrimoine bâti en une technique de terre crue renseigne sur les potentiels des sols alentours pour cette technique (Hamard 2017; CCTC 2018; Goizauskas 2020; Fabbri et al. 2022). L'hypothèse est alors que les sols sous-jacents sont les sols employés dans les éléments bâtis, et que les constructeur.ices se seraient adapté.es à cette ressource immédiatement disponible. La présence de sols techniquement employables serait donc une condition nécessaire à l'occurrence de patrimoine bâti en une technique de terre crue sur un territoire. Cependant, il ne s'agirait pas d'une condition suffisante (Goizauskas 2020; Fabbri et al. 2022), car le déploiement d'une technique de construction est la « conjonction de nombreux critères socio-historiques et environnementaux » (Goizauskas 2020). L'absence de patrimoine n'est donc pas considérée comme étant une absence de convenance des sols locaux (CCTC 2018).

L'observation de quelques bâtiments et des matériaux qui les composent n'est, dès lors, pas gage de compréhension immédiate des choix techniques. On suppose que le *contexte constructif** apporterait potentiellement beaucoup de variabilité aux procédés et aux objectifs des chantiers pour déceler une corrélation sur quelques échantillons. Ainsi, étudier l'influence des propriétés de la terre sur le choix d'une technique de construction en terre crue par l'analyse d'échantillons de matériaux issus du patrimoine nécessiterait des quantités considérables d'échantillons pour observer de bonnes corrélations. Or, un seul échantillon nécessite un travail de laboratoire conséquent qui s'ajoute à un travail d'analyse de la technique sur le terrain et d'extraction de l'échantillon, rarement possible, sauf à l'occasion d'une destruction de bâtiment, de création d'ouvertures ou bien de prélèvement dans une ruine.

Une méthode d'analyse spatiale par système d'information géographique (SIG) initialement proposée par Ford (2002) permet de croiser des bases de données environnementales spatialisées avec des données spatialisées décrivant le patrimoine bâti vernaculaire. Cette méthode, appliquée au croisement de bases de données pédologiques avec des données décrivant le patrimoine bâti en terre crue, permet de réaliser des traitements statistiques sur un grand nombre d'échantillons.

Cette méthode présente l'avantage de s'appuyer sur les bases de données pédologiques et patrimoniales existantes et de nécessiter potentiellement peu d'échantillonnage de terrain. L'analyse de bases de données comprenant plusieurs centaines d'échantillons pourrait permettre de dépasser l'aléa apporté par la variabilité des « nombreux critères socio-historiques et environnementaux » autres que les propriétés de la terre, et laisser entrevoir l'influence globale des sols locaux sur les choix techniques.

Le travail réalisé dans les chapitres 3A et 3B a pour objectif d'éclairer nos deuxième et troisième hypothèses (Chapitre 1, 4) : comment les propriétés des terres à disposition influencent-elles les choix techniques (hypothèse 2), et avec quelle intensité relativement aux autres propriétés du contexte constructif (hypothèse 3) ?

2 Historique académique de la méthode

Plusieurs équipes de recherches ont employé des méthodes impliquant le croisement de données spatialisées de description du patrimoine bâti en terre avec des données environnementales : pédologie ou géologie, hydrologie, météorologie ou encore densité de population actuelle. Une analyse des travaux réalisés est proposée ici, dans le but d'inscrire nos travaux dans leur continuité.

Nous ne traiterons ici que des études ayant mobilisé un nombre conséquent de bâtiments dans des bases de données patrimoniales, ayant donc une portée statistique. En effet, plusieurs études (Harries et al. 1996; Pagliolico et al. 2010) dont certaines ont été évoquées au Chapitre 1 (1.1) analysent la composition et/ou le contexte environnemental de bâtiments vernaculaires, mais généralement sur

un nombre limité d'échantillons : de ce fait, leur représentativité est limitée, et elles ne seront pas détaillées dans ce chapitre.

2.1 Royaume-Uni : Ford et al. (1999, 2002, 2005)

La première étude est celle réalisée dans le cadre de la thèse de Ford (2002), ayant également donné lieu à quelques publications sur le sujet (1999, 2005). Ces travaux ont pour objectif de comprendre les facteurs influant la distribution du patrimoine bâti en bauge au Royaume-Uni. Dans les années 2000, l'emploi de Systèmes d'Information Géographique (SIG) numériques est encore peu développé. Un autre objectif de l'étude est alors d'évaluer la pertinence de ce type d'outil pour la compréhension des choix urbanistiques et architecturaux historiques. L'échelle de l'étude est celle d'un « parish », unité administrative anglaise qui équivaudrait à une commune française. Sur cette commune, les auteur.ices ont analysé chaque bâtiment de la base de données « English Heritage » en vérifiant/complétant les données par des recherches bibliographiques. 78 % des bâtiments de la base de données sur la zone sont identifiés comme composés de bauge (Ford et al., 1999, p. 5).

Les bâtiments géolocalisés sont ensuite projetées sur différentes couches de données environnementales, incluant la topographie, le réseau hydrique et le substrat géologique (Figure 46).

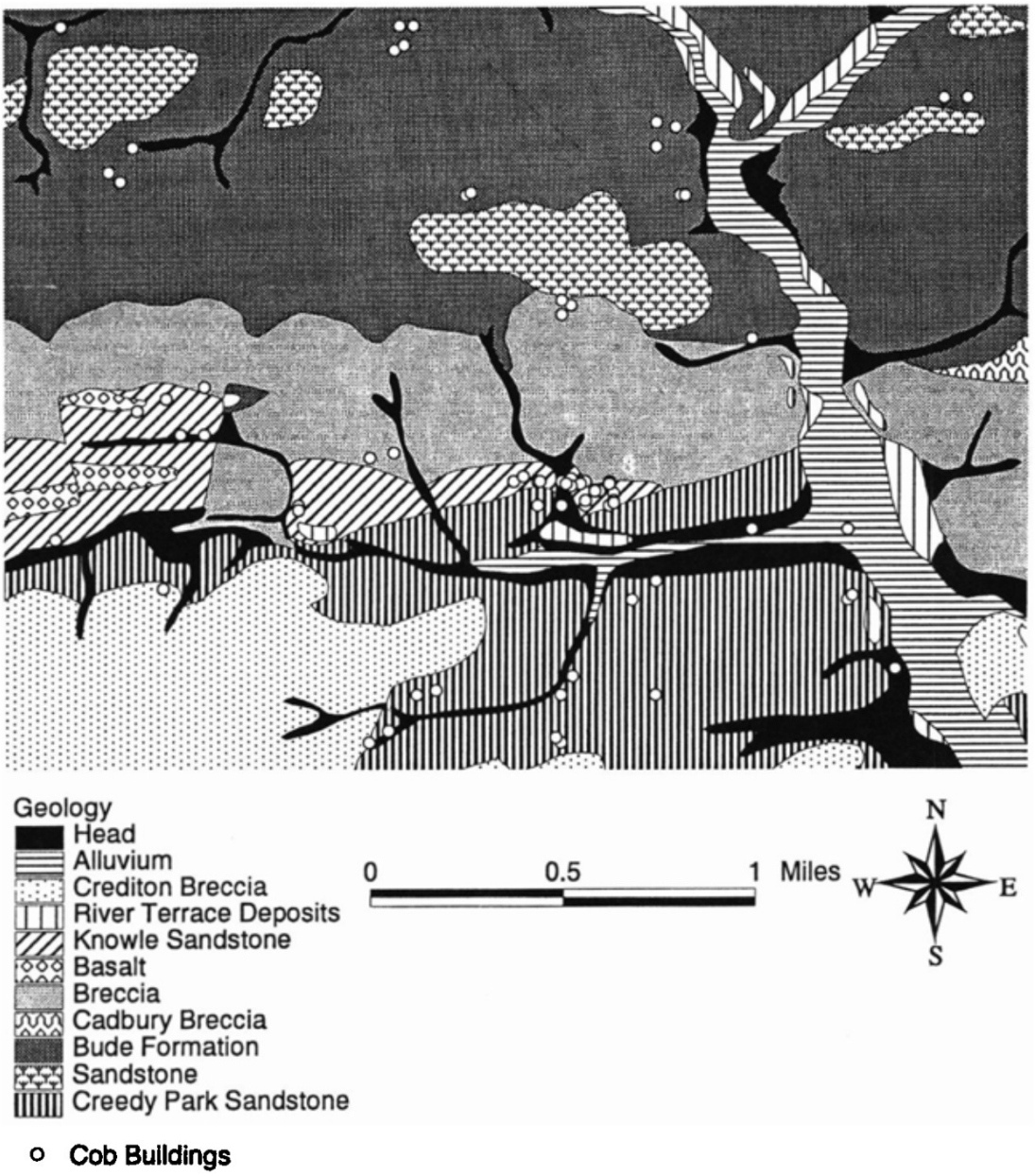


Figure 46 : Position géographique de bâtiments en bauge superposée aux cartes géologiques pour une commune du Royaume-Uni (localisation exacte non précisée) (Ford et al. 1999:10).

De cette superposition, la comparaison est réalisée par traitement spatial numérique, permettant d'agréger dans une seule base de données des données relatives au bâtiment et à son environnement.

L'étude rapporte « l'existence d'associations entre l'orientation des bâtiments, leur situation relative aux sources d'eau potable, la présence d'autres sites archéologiques et la forme des parcelles agricoles. », sans expliciter clairement ces relations.

Les auteur.ices observent « l'existence d'une relation entre les bâtiments les plus anciens (pré-1600) et le substrat géologique de la zone ». Les matériaux paraissant les plus favorables à l'emploi de la bauge dans la zone d'étude seraient le « head », qui correspond à un dépôt sédimentaire de solifluxion, et les dépôts alluvionnaires locaux. Ces qualifications ne nous renseignent pas beaucoup sur les

caractéristiques du sol développé sur ces matériaux. On note cependant que ce sont des matériaux sédimentaires, qui dans un contexte de plaine incluent probablement des fraction importantes d'éléments fins.

Il est intéressant de remarquer l'importance de la datation des bâtiments dans les résultats, qui laisse penser que les bâtiments les plus anciens sont mieux corrélés à la nature du sol que les bâtiments plus récents. En effet, l'étude a pu également démontrer l'existence de « plusieurs couches successives d'occupation » de la zone. Cela pourrait être expliqué par une arrivée progressive de moyens de transport, induisant une décorrélation progressive du lieu d'implantation et de la terre employée. Cependant, ces observations pourraient également s'expliquer par une *installation préférentielle* des populations, préférant s'installer dans ces zones dans un premier temps pour la proximité à ces ressources (pour l'agriculture et/ou pour la construction). Dans un second temps, l'espace de plus en plus occupé n'aurait laissé aux nouvelles implantations d'autre choix que de s'installer plus loin, donc à plus grande distance de ces sols favorables, réduisant la qualité de la corrélation… On voit qu'il y a différentes possibilités d'interprétation de ces observations sans données supplémentaires éclairant le *contexte constructif*.

Cette étude a permis de poser les bases de la méthode de croisement de données patrimoniales et environnementales et atteste de son potentiel pratique. Ford souligne que la méthode d'analyse de l'occurrence de bâtiments en terre crue relativement à des variables environnementales permet notamment la prédiction de l'occurrence spatiale de bâtiments en terre crue, ce qui peut faciliter l'inventaire du patrimoine bâti.

De nombreuses covariables du contexte constructif, anthropiques comme environnementales, semblent avoir été prises en comptes et intégrées pour être comparées parallèlement. Peu de détails sont cependant donnés sur les résultats des croisements de données.

Malgré tout, les données employées ne permettent pas d'expliciter clairement l'origine des relations entre le sol et le choix technique, et des sols statistiquement corrélés à l'occurrence de bauge peuvent l'être par d'autres biais que leur potentiel *technique*. Le biais *d'installation préférentielle* est probablement significatif: les bâtiments en bauge sont-ils installés préférentiellement à proximité des alluvions parce que ce matériau est favorable à la construction, ou via d'autres voies de préférence, comme le potentiel agricole de ces sols ? Pour cela, il aurait fallu comparer avec la distribution du patrimoine bâti historique non composé de bauge sur la zone d'étude (cf. 5). Les auteur.ices ne précisent pas si cette évaluation a été réalisée, cependant, la base de données English Heritage employée pourrait contenir ces données. La même suggestion peut être faite pour les corrélations observées avec les autres variables environnementales (par exemple, la proximité au réseau hydrique) : l'installation préférentielle à proximité du réseau hydrique pour des raisons de subsistance quotidienne explique probablement plus la densité bâtie que le besoin en eau au sein des procédés de construction. D'autres variables non considérées pourraient également entrer en jeu. Par exemple, l'occurrence des bâtiments en bauge sur ces sols sédimentaires pourrait être un gage de qualité du matériau pour la construction en terre crue, mais également un manque de convenance des ressources locales pour la construction en d'autres matériaux, comme le bois ou la pierre. La terre n'est pas choisie indépendamment des autres possibilités constructives : il s'agit d'un choix *relatif* aux autres techniques et matériaux de construction.

La densité de bâtiments construits en terre crue relativement aux variables environnementales, ici la composition du sol et la proximité au réseau hydrique, n'est pas impactée uniquement par l'impact de ces variables sur le potentiel *technique* des techniques de terre crue, mais également par l'installation préférentielle des populations liée à la subsistance de manière générale, ainsi qu'au potentiel des autres techniques constructives de la région.

2.2 Péninsule Ibérique : Mileto, Hueto-Escobar et al. (2019, 2022)

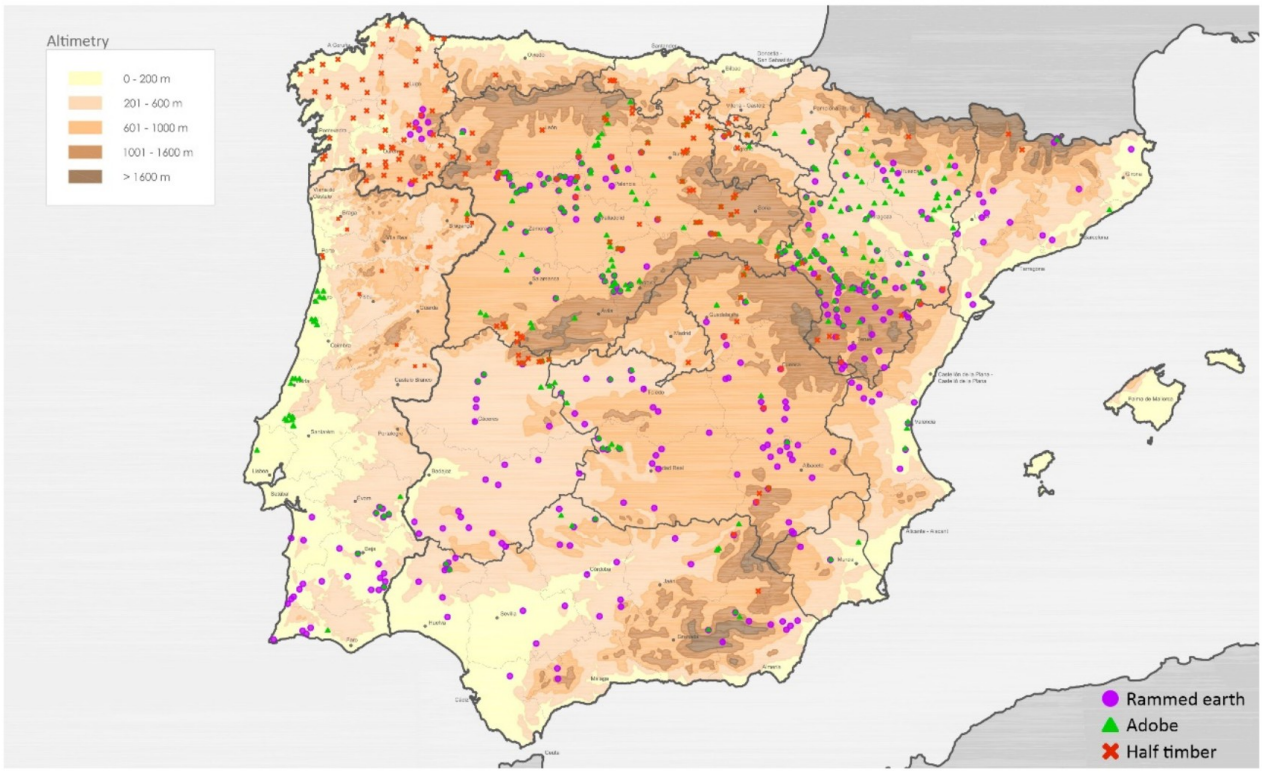


Figure 47 : Distribution de patrimoine bâti en pisé (rammed earth), adobe, et pan de bois garni de torchis ou d'adobe (half timber) inventorié sur la péninsule Ibérique et superposés à une ***carte topographique*** *(Mileto et al. 2019).*

La première étude de Mileto et al. (2019) analyse les corrélations entre l'occurrence de techniques de construction en terre crue (pisé, adobes, pan de bois garni de torchis ou d'adobes, appelé « pan de bois » par la suite) et des variables environnementales géographiques, climatiques et géologiques : l'altitude (Figure 47), la proximité au réseau hydrique et le couvert forestier (Figure 48), la température, les précipitations annuelles (Figure 49), l'ensoleillement, la sismicité, la densité de population, et enfin, la « lithologie », soit une variable indiquant la typologie de minéraux les plus présents dans le sol (« silicates », « calcaires », « argiles ») (Figure 50).

L'échantillon est composé de 618 bâtiments « relevés au cours de plusieurs campagnes de collecte », dont les méthodes d'échantillonnage ne sont pas précisées, sur la zone de la Péninsule Ibérique. Pour chacune des variables, les auteur.ices proposent une représentation cartographique comparant la distribution des bâtiments de chaque technique avec la variable étudiée, et calculent des pourcentages de répartition des bâtiments dans des classes de ces variables.

De nombreuses conclusions sont tirées de ces résultats. Cependant, la validité de celles-ci est discutable car, comme évoqué pour l'étude de Ford et al., de simples pourcentages de distribution des bâtiments ne sont pas suffisants pour attester de l'influence des propriétés sur les choix techniques. En effet, pour une variable divisée en plusieurs classes (par exemple, des classes de pluviométrie annuelle), un pourcentage de bâtiments supérieur dans une classe peut tout à fait ne rien avoir à voir avec le choix préférentiel d'une technique de terre crue relativement à une autre technique. Il peut s'agir, entre autres :

- d'un biais d'échantillonnage : la méthode d'échantillonnage n'est pas connue. Peut-être que plus de collectes de données ont été réalisées dans des zones où cette classe est la plus représentée ;

- du biais d'*installation préférentielle* ;

- d'un aléa statistique : les auteur.ices ne proposent pas de validation statistique de leurs données.

Par exemple, les auteur.ices indiquent que les bâtiments composés de terre crue sont souvent situés à proximité du réseau hydrique, comme remarqué par Ford et al., mais en l'absence d'information sur la distribution de l'ensemble des bâtiments (en terre ou non), on ne peut savoir si l'installation des bâtiments en terre est *relativement* plus fréquente à proximité du réseau hydrique.

Le faible pourcentage de bâtiments en pisé dans les zones de fortes précipitation (Figure 49) est indiqué comme la conséquence de l'influence des précipitations sur la durabilité du pisé. Pourtant, il est difficile de conclure sur cette corrélation. Premièrement, parce qu'ici encore il n'y a pas d'informations sur la distribution relative du reste du patrimoine, entre autres biais et aléas non considérés. Ensuite, parce que les constructions en adobes sont, elles, présentes en pourcentages conséquents dans des zones où la pluviométrie est forte et qu'à ce jour, il n'y a pas de différence significative attestée entre la durabilité des adobes et du pisé pour l'emploi d'une même terre. D'autres raisons pourraient être évoquées si le pisé était effectivement moins présent dans les zones à fortes précipitations annuelles : la teneur en eau du sol trop importante pendant l'année empêcherait la mise en œuvre du pisé qui nécessite une teneur en eau moyenne à faible, par exemple. Enfin, les auteur.ices indiquent que la corrélation avec une pluviométrie encore plus forte pour le pan de bois est liée à l'altitude. Peut-être est-ce la même raison pour les autres techniques ?

On manque ici d'information sur les intercorrélations entre les variables environnementales employées, alors que les auteur.ices les estiment conséquentes (Mileto et al. 2019).

Les auteur.ices observent une corrélation entre le gradient d'ensoleillement et les techniques : le pisé serait plus adapté aux régions plus ensoleillées que l'adobe, l'adobe que le pan de bois. Ils l'expliquent par l'épaisseur des murs, généralement respectivement décroissants pour les techniques citées, qui permet une inertie thermique améliorée. Sans prendre en compte, encore une fois, la corrélation avec l'altitude ou la température, on ne peut vraiment conclure sur ce lien de causalité. Plus loin, on trouve une affirmation sensée aller dans le sens de la première : les murs plus fins faciliteraient la transmission de la chaleur solaire à l'intérieur des bâtiments en hiver, car les bâtiments en pan de bois sont situés dans des zones plus froides. Cependant, des murs fins sont également moins isolants et ont une moindre inertie, ce qui n'est pas forcément un gage d'efficacité thermique pour les régions plus froides…

Dans l'étude de la distribution du patrimoine, il convient alors de rappeler qu'une *corrélation* n'est pas forcément une relation de *causalité*. Parfois, d'autres variables se cachent derrière la corrélation observée. Finalement, on peut souvent interpréter les corrélations par de nombreuses hypothèses, et en l'absence d'autres observations concordantes il est généralement difficile de conclure sur la ou les vraies causalités.

Les conclusions inspirées par la distribution absolue des bâtiments en terre selon les variables étudiées sont donc difficiles à valider, par la présence de biais et l'absence d'informations sur les intercorrélations des variables étudiées. Cependant, les conclusions inspirées par les distributions *relatives* des techniques de construction en terre *entre elles* ont peut-être plus de valeur : on peut faire l'hypothèse que les biais *d'échantillonnage* et d'*installation préférentielle* jouent similairement sur les différentes techniques, car l'échantillonnage a été probablement réalisé de la même manière dans les

deux zones, et l'installation préférentielle est la même dans une même zone d'étude comprenant plusieurs techniques. Restent cependant, l'aléa statistique, ainsi que les inter-corrélations cachées.

Dans la publication de (Mileto et al. 2019), les résultats sont donnés en fréquence de chaque technique sur chaque zone lithologique, ce qui ne permet pas de les comparer directement car elles n'ont pas le même nombre d'échantillons. Si l'on néglige les biais d'échantillonnage explicités précédemment, on peut cependant mieux observer les tendances en recalculant pour chaque lithologie la fréquence des bâtiments en fraction relative entre une technique et les autres (Tableau 3). Ainsi, la distribution relative est plus lisible.

Voici quelques exemples de conclusions données par Mileto et al. , qui considèrent des distributions *relatives* :

- le pan de bois semble plus présent en altitude que les autres techniques. Les auteur.ices suggèrent que cela serait dû à la plus grande présence de forêt.

- On observe une proximité croissante au réseau hydrique pour les techniques suivantes : pan de bois < adobes < pisé. Avant de tirer des conclusions relatives au besoin en eau pour la mise en œuvre des techniques, on doit considérer les inter-corrélations environnementales. Par exemple, la corrélation entre altitude et densité du réseau hydrique : c'est à basse altitude que se trouvent les réseaux de rivières et fleuves considérées sur la carte à l'échelle de la péninsule, tandis que les ruisseaux et sources n'ont pas été pris en compte. C'est peut-être donc la même relation à l'altitude évoquée précédemment qui serait à considérer ici.

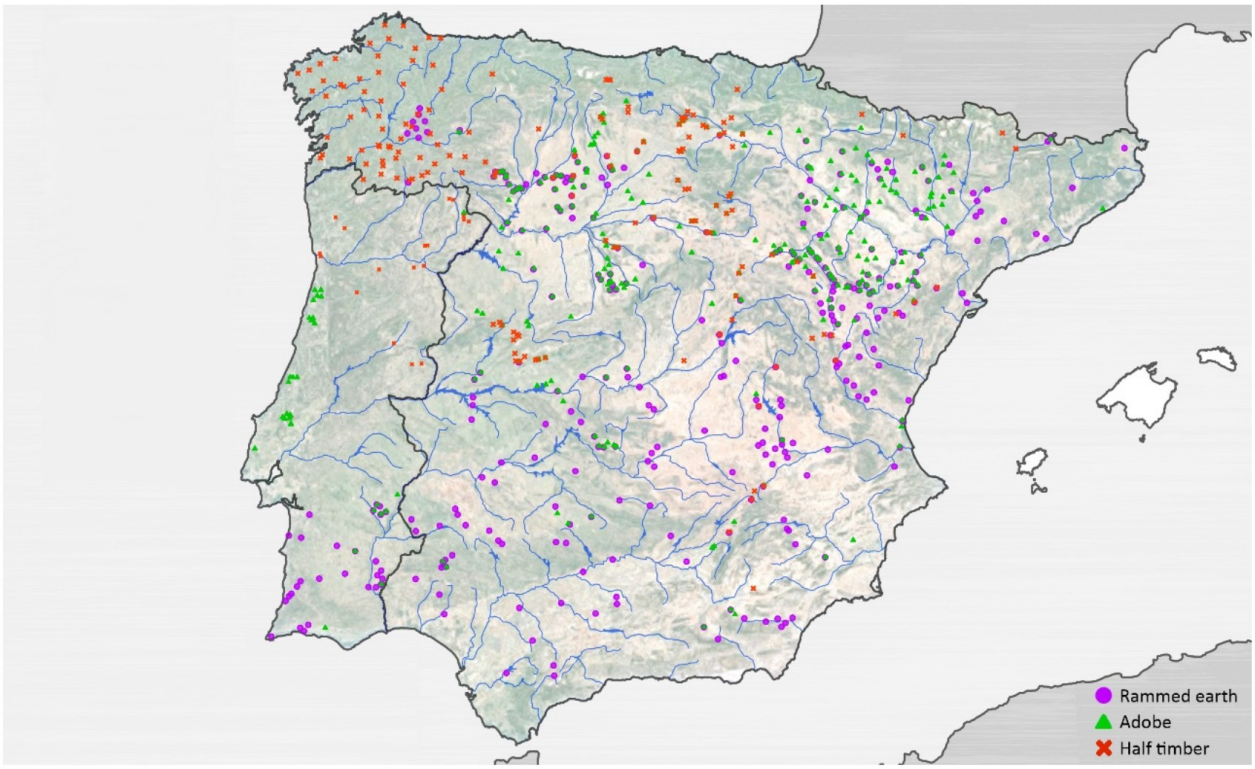


Figure 48 : Distribution du patrimoine bâti en pisé (rammed earth), adobe, et pan de bois garni de torchis ou d'adobe (half timber) inventorié sur la péninsule Ibérique et superposés à une carte du ***couvert forestier contemporain*** *et du* ***réseau hydrographique principal*** *(Mileto et al. 2019).*

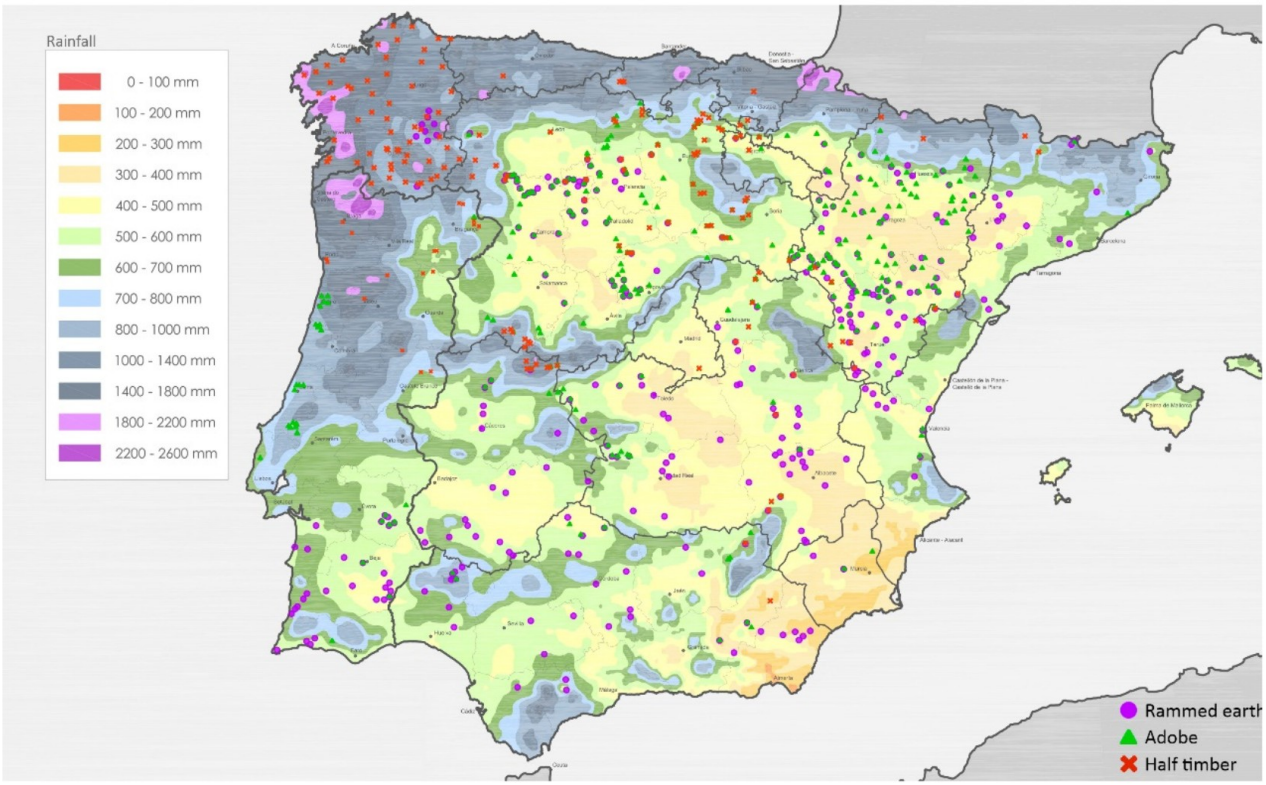


Figure 49 : Distribution du patrimoine bâti en pisé (rammed earth), adobe, et pan de bois garni de torchis ou d'adobe (half timber) inventorié sur la péninsule Ibérique et superposés à une carte représentant la ***pluviométrie annuelle*** *contemporaine (Mileto et al. 2019).*

- La présence des techniques de construction en terre crue est la plus importante pour les sols argileux, et plus faible pour les sols limoneux (Figure 50, Tableau 3). Pour le pan de bois garni de terre, la présence de bâti augmente dans les sols plus grossiers (Tableau 3). C'est l'inverse pour l'adobe et le pisé, mais la progression est plus marquée pour l'adobe.

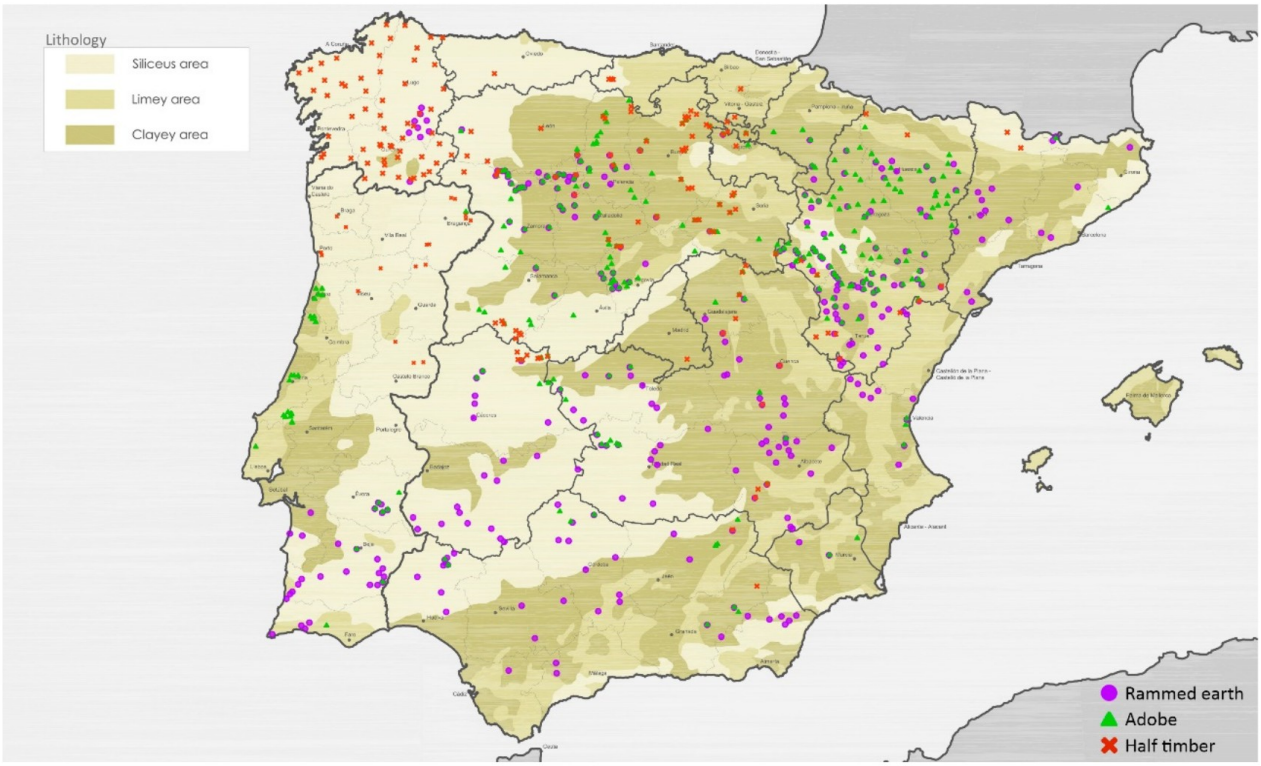


Figure 9 Lithology and vernacular earthen techniques. Source: Own elaboration based on Solé et al

*Figure 50: Distribution du patrimoine bâti en pisé (rammed earth), adobe, et pan de bois garni de torchis ou d'adobe (half timber) inventorié sur la péninsule Ibérique et superposés à une carte représentant la **lithologie du sol** (Mileto et al. 2019).*

Lithologie	Pisé		Adobe		Pan de bois		Toutes techniques terre crue	
Siliceux	92	43.0%	61	28.5%	101	47.2%	214	0,35
Limoneux	57	53.8%	46	43.4%	25	23.6%	106	0,17
Argileux	174	58.4%	186	62.4%	52	17.4%	298	0,48
Total	323	40.7%	293	36.9%	178	22.4%	794	1

Tableau 3 : Résultat du croisement spatial entre la localisation des bâtiments en terre crue et la lithologie sous-jacente aux bâtiments. Adapté de (Mileto et al. 2019) : les pourcentage sont exprimés en fraction relative d'une technique par rapport aux autres pour une même lithologie. Lecture : « Sur les sols argileux, 58.4% des bâtiments sont construits en pisé. »

La densité de population (contemporaine) et les zones de sismicité, choisies entre autres dans l'objectif de déceler un impact sur la destruction du patrimoine au cours du temps, n'apportent pas de résultats significatifs relativement au choix technique à l'étude des pourcentages. Plus de données et une meilleure analyse seraient peut-être nécessaires pour détecter ces variations.

C'est à la lecture de la conclusion que s'explicite l'importance de considérer l'ensemble des biais évoqués dans ce chapitre. Deux affirmations de cette conclusion dépassent largement les constats potentiels de l'étude :

> « Comme observé dans les cartographies de la section précédente, les bâtiments en terre ne sont pas rencontrés sur l'ensemble du territoire, ainsi ces techniques ne sont probablement pas des solutions optimales dans les zones où elles n'ont pas été employées traditionnellement. » (Mileto et al. 2019)

Cela nous évoque les études de « convenance des terres » présentées au Chapitre 1 (1.3) aux conclusions radicales malgré de faibles nombres d'échantillons.

L'absence de preuve n'est pas une preuve : l'absence de patrimoine dans une plage de valeurs d'une propriété observée n'est pas synonyme de non convenance de cette plage de valeurs. Que cette propriété soit la distribution géographique, le type de sol, ou d'autres paramètres environnementaux, il peut simplement s'agir d'une raison propre à l'organisation sociétale de l'époque : disponibilité d'autres matériaux, désirabilité de la technique, connaissance de la technique, etc. ; et non forcément à une raison technique.

Enfin, on relève également que les auteur.ices sont également favorable à la « modification des terres » lorsqu'elles ne sont pas adéquates pour construire :

> « De plus, tous les types de terres ne sont pas convenables pour construire et de fortes modifications pourraient être nécessaire pour les employer. Si la terre est employée, il est nécessaire de prendre en compte des facteurs comme la pluviométrie, qui affecte directement la durabilité, afin de disposer des protections appropriées. » (Mileto et al. 2019:17)

Le fait que des terres ne soient adéquates pour aucune technique de construction n'est pas certain ; et leur modification, hors de matières locales, naturelles et peu transformées peut rapidement devenir contre-productive (Contexte, 1.4). De plus, si la terre n'est pas convenable, il est peut-être plus adéquat de construire en d'autres matériaux locaux que de la modifier et de la surprotéger.

Si une telle étude permet de faire des observations factuelles de distribution du patrimoine et d'esquisser quelques liens de causalité, l'ensemble des biais évoqués, ainsi que la faible validité statistique des résultats, ne permet pas de réaliser de conseils prescriptifs. Utiliser de tels résultats pour valider des suggestions, qui sont parfois des idées reçues, comme le besoin de modifier la terre plutôt que d'adapter la technique, ou la fragilité du matériau face aux précipitations, dépasse largement le cadre de l'observation. Dans le pire des cas, cela pourrait nuire à la perception du matériau et nourrir des préjugés déjà bien trop ancrés dans les imaginaires et qui freinent le retour aux matériaux naturels dans le secteur de la construction (Contexte, 2.1).

La deuxième étude de cette équipe de recherche concerne plus spécifiquement les bâtiments à pan de bois en Espagne (Hueto-Escobar et al. 2022). Un nombre conséquent d'échantillons (1160 murs sur 916 édifices) a été collecté, ainsi qu'une analyse intensive de l'architecture permettant un classement typologique détaillé des techniques de pan de bois, garnis de terre ou non.

Le travail de collecte et d'analyse architectural est considérable, mais malheureusement, la méthode d'analyse est très similaire à la première étude, tant au niveau des variables environnementales utilisées que de l'analyse des résultats. Ainsi, ici aussi, les conclusions relatives à l'influence de l'environnement des choix techniques sont peu robustes.

Une répartition des matériaux de remplissage de pan de bois selon la lithologie sous-jacente est proposée. Ici également, nous adaptons les résultats lithologiques pour ne considérer que des proportions *relatives* entre techniques et non des distributions absolues de chacune (Tableau 4). Pour le remplissage de terre autoporteuse, il n'est pas précisé s'il le remplissage est réalisé en briques de

terres moulées type adobe ou en terre façonnée *in situ* type bauge, mais il semble que l'essentiel soit composé d'adobes. Pour les remplissages dits « terre et bois », on suppose qu'il s'agit de torchis appliqué sur une structure bois.

Grâce à la représentation *relative* des résultats, on observe que la fraction de pan de bois garni de terre autoporteuse augmente lorsque la lithologie s'affine, tandis que l'inverse est observé pour le torchis. Hueto-Escobar et al. (2022) expliquent ce phénomène par la meilleure convenance des terres argileuses pour la fabrication des adobes. Cette conclusion, fragile dans l'observation initiale d'occurrence directe des bâtiments, nous semble plus robuste lorsque représentée en fractions *relatives*.

Lithologie	**Pierre**		**Brique cuite**		**Terre crue autoporteuse (bauge, adobe)**		**Torchis**		**Bois**		Total
Siliceux	73	16.8%	67	15.4%	184	42.3%	67	15.4%	44	10.1%	435
Limoneux	62	15.5%	98	24.5%	211	52.8%	21	5.3%	8	2.0%	400
Argileux	36	11.1%	43	13.2%	239	73.5%	5	1.5%	2	0.6%	325
Total	171	14.7%	208	17.9%	634	54.7%	93	8.0%	54	4.7%	1160

Tableau 4 : Résultat du croisement spatial entre la technique de remplissage des pans de bois et la lithologie sous-jacente. Adapté de (Hueto-Escobar et al. 2022): les pourcentage sont exprimés en fraction relative d'une technique par rapport aux autres pour une même lithologie. Lecture : « Sur les sols argileux, 73.5 % des pans de bois sont garnis de terre crue autoporteuse. ».

Comme pour l'étude de Mileto et al., Hueto-Escobar et al. observent une plus grande occurrence des techniques de pan de bois garnis de terre crue que comblés par d'autres matériaux à proximité du réseau de rivières. Recalculer des tables en valeurs relatives validerait peut-être cette observation. Mais concernant son interprétation, même remarque que précédemment : comment savoir s'il s'agit d'une influence de la lithologie directement sur le choix technique, ou indirectement par corrélation avec une autre variable ?

En guise de conclusion, nous mettons en avant quelques points concernant ces deux travaux :

- ils ont fait l'objet d'un travail de collecte et de croisement de données conséquent, avec beaucoup de potentiel ;

- le potentiel est malheureusement peu exploité pour l'instant. L'analyse manque notamment de validation statistique et de profondeur dans la lecture des résultats, avec une maigre prise en compte des biais de la méthode. Entre autres biais, la lecture par pourcentage de distribution direct est inadaptée, mais peut vite être clarifiée par un calcul de proportions relatives. En effet, que déduire du fait que 91.9 % des bâtiments en pisé soient dans les zones à pluviométrie faible (300-700mm) ? Savoir que 20 % de l'ensemble du bâti en zone pluvieuse est en pisé, tandis qu'il serait de 40 % en zone sèche serait déjà plus clair. Mais l'interprétation resterait difficile, car restent les biais d'échantillonnage et les corrélations indirectes… qui doivent être considérées avant d'indiquer que cela confirme la vulnérabilité du pisé à la pluviométrie, comme suggéré par les auteur.ices.

- certaines données pourraient donc être ré-analysées pour obtenir des résultats significatifs. Notamment, nous soulevons l'intérêt de l'analyse architecturale des édifices en pan de bois (typologie et dimensions d'enduits, de débords de toit, de soubassements) avec le croisement de données

climatiques, qui pourrait fortement intéresser les recherches sur les stratégies architecturales d'optimisation de la durabilité des bâtiments composés de terre crue.

- Il peut y avoir une variation de distribution relative des « sous-techniques » d'une même technique-type* relativement aux variables environnementales, ici les techniques de pan de bois. Il est donc intéressant, lorsque l'information est disponible, de discerner ces variabilités internes aux techniques-types dans l'analyse.

- enfin, en ce qui concerne la relation avec les variables pédologiques, une cartographie plus précise des sols, ou au moins une carte géologique, pourrait apporter significativement plus de nuances dans la relation entre sol et choix technique.

2.3 France : Hamard et al. (2017, 2018)

L'étude publiée dans la thèse de Hamard (2017) puis publiée en tant qu'article de revue (Hamard et al. 2018) consiste en un croisement de données patrimoniales géolocalisées avec une base de données pédologiques. Les données patrimoniales sont issues de la base de données du Service du Patrimoine de Bretagne (ces données seront aussi utilisées dans cette étude, voir 5) et comprennent à la fois des bâtiments composés de terre crue ainsi que d'autre matériaux (« timber, stone, earth, fired bricks » (Hamard 2017:48)). Le matériau de construction et la datation du bâtiment sont notamment renseignés pour chaque bâtiment (avec plus ou moins de certitude, voir 5.3.2.2). Le choix de cette base de données est intéressant de par la quantité de données, mais aussi parce que la présence d'informations concernant la distribution des autres bâtiments pré-industriels non bâtis en terre permet d'étudier un choix *relatif* de techniques entre elles là où la quantité absolue de bâtiments en terre n'est pas une information significative. La densité bâtie globale dans l'espace et dans le temps est donc connue, permettant de dépasser le biais *d'installation préférentielle* des populations qui a pu influencer les résultats de Ford et al. et Mileto et al..

Les données pédologiques utilisées sont issues du Référentiel Régional Pédologique de Bretagne (Lemercier et al. 2015). Étant composées d'Unités Cartographiques de Sol (UCS, ou SMU - Soil Map Units), la représentation cartographique ne donne pas directement les valeurs des propriétés pédologiques (voir 4.2.1). Un traitement statistique est alors nécessaire pour croiser données pédologiques et données de patrimoine, et permet l'établissement de « classes de pourcentage de densité relative bâtie en bauge », représentées en vert sur la Figure 52.

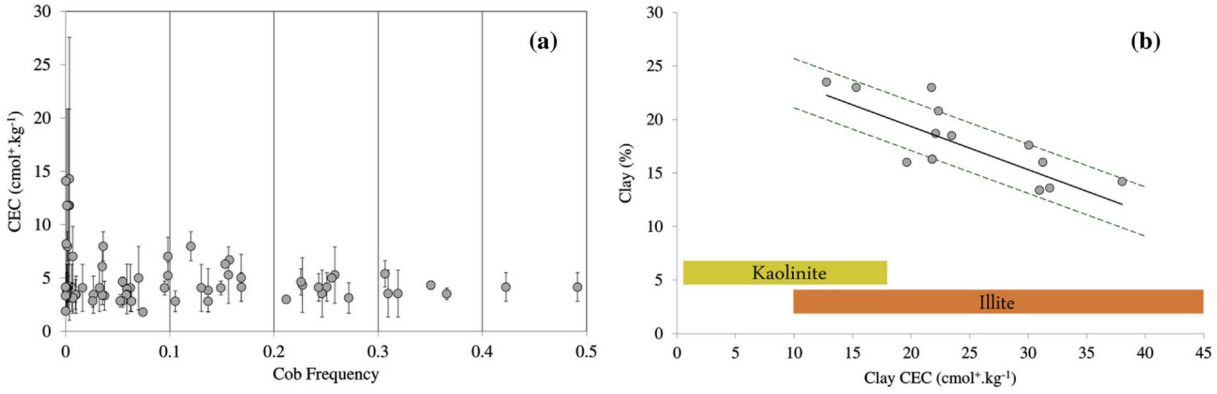


Figure 51 : CEC des sols selon la densité bâtie en bauge (a) et relation entre le passant à 2µm et l'indicateur d'« activité » des argiles (CEC/P2µm, voir Annexe I, 2.2.4.3) (b) (Hamard et al. 2018).

La densité relative de bâtiments en terre crue croît progressivement avec la teneur en limons (Figure 52), jusqu'à la limite de teneur en limon des sols de la zone, formant comme un axe de densité croissante. Il semble également que cet axe suit une pente de teneur en argile légèrement décroissante. De plus, la CEC des sols où l'on trouve des bâtiments composés de terre crue est relativement constante et converge vers une valeur d'environ 5 cmol+.kg^{-1} (Figure 51a.). La CEC représenterait l'activité totale des argiles du sol : quels que soient les sols employés, aux passants à 2µm faibles ou importants, leur activité argileuse serait semblable. Cela indiquerait que l'activité argileuse serait un optimum recherché par les constructeur.ices vernaculaires (Hamard 2017). Hamard observe l'évolution de l'activité des argiles (CEC/P2µm) selon le passant argileux (P2µm) (Figure 51b.). La décroissance de l'activité lorsque le passant 2µm augmente est interprétée comme un changement de minéralogie des argiles : plus le passant est faible, plus les minéraux sont actifs, gardant une CEC constante favorable à l'emploi de la bauge. Cependant, on peut également considérer que la CEC est constante pour une autre raison, et que la décroissance de CEC/P2µ avec l'augmentation de P2µm est une simple corrélation mathématique puisque la CEC est constante dans tous les cas. Ainsi, d'autres explications peuvent expliquer la constance de la CEC. Il peut s'agir d'un artefact de la zone d'étude, et une observation cartographique pourrait permettre de le vérifier. Mais il pourrait également s'agir de l'influence des limons : le passant limoneux peut contribuer faiblement mais significativement à la CEC (Annexe I, 2.2.4.3). Ainsi, sur les classes de densités représentées sur le triangle des textures (Figure 52), lorsque la teneur en limons augmente fortement, la teneur en passant argileux baisse légèrement, ce qui conduirait à une CEC constante favorable au déploiement de la bauge. Cela reste en accord avec la conclusion initiale : les sols favorables à la bauge seraient ceux ayant une « activité cohésive » optimale (Hamard 2017).

Aller vers une explication du choix technique de ce type permet d'imaginer que la cohésion du matériau finale est permise par un équilibre de surfaces spécifiques, représentées par la CEC. La tendance de décroissance faible du passant argileux pour une forte augmentation du passant limoneux évoque une « ligne d'iso-surface » des éléments du sol : les argiles granulométriques développant une surface plus importante que les limons, une faible baisse de la teneur en argile équivaut à une forte hausse de celle des limons. Une telle proposition est indépendante de la composition minéralogique de la fraction argileuse : dans tous les cas, des éléments de petite taille déploient plus de surface spécifique.

Les résultats sont comparés aux recommandations de limites de

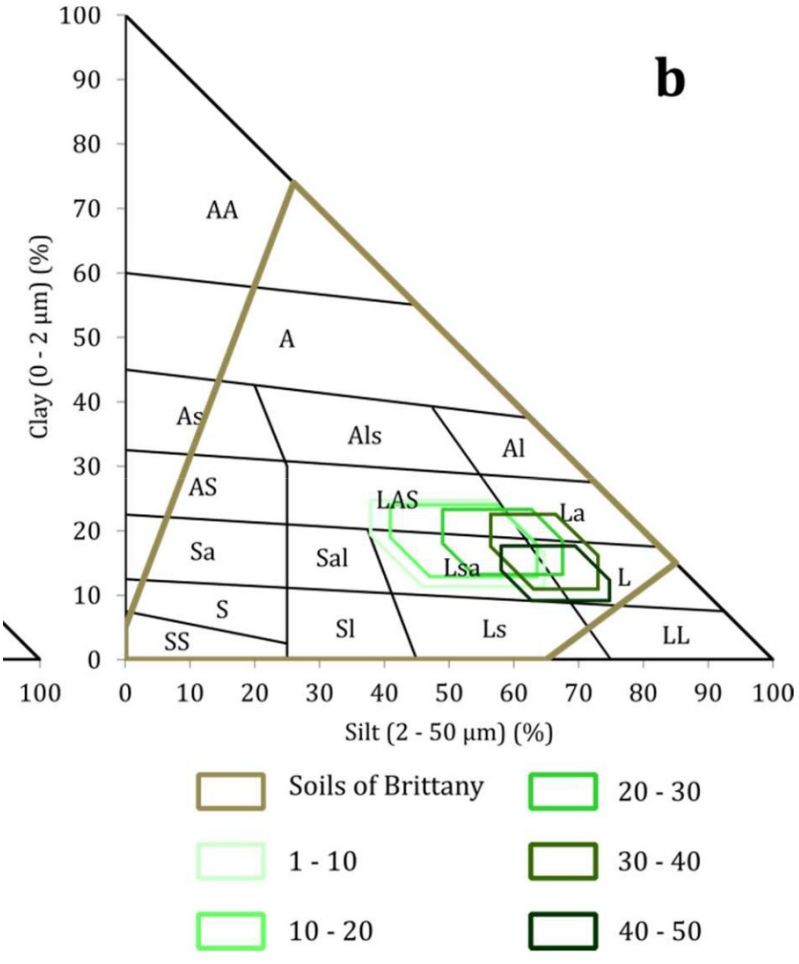


Figure 52 : Texture des sols employés pour la construction en bauge dans des bâtiments Vernaculaires en Bretagne (dégradé vert par densité bâtie en bauge relativement à la densité de bâtiments Vernaculaires) (Hamard 2017).*

textures issus de la littérature (Figure 53). Ceux-ci placent les zones de convenance à des granulométries bien plus argilo-sableuses que les résultats obtenus (Hamard 2017). Cependant, nous pouvons remarquer que ces zones semblent se trouver dans la prolongation d'un éventuel axe d'iso-surface évoqué précédemment : la teneur en limon fortement réduite est compensée par une légère hausse de la teneur en argile.

Les résultats comparés à l'analyse d'échantillons de bauge prélevés sur des bâtiments vernaculaires dans d'autres pays sont eux, plus proches de ceux obtenus dans l'étude Figure 53. Les bâtiments Allemands pourraient être interprétés comme prolongeant l'axe d'iso-surface proposé. Tandis que les échantillons de bâtiments du Devon (Royaume-Uni), qui ont été spécifiquement analysés car ils présentaient des pathologies potentiellement liée à leur composition, sont situés dans les mêmes intervalles de ratio limon/sable, mais avec moins de teneur en argile. Dans la prolongation du raisonnement précédent, cette zone pourrait correspondre à une limite basse de l'axe d'iso-surface : la surface développée par les grains du sol serait trop faible pour assurer une cohésion suffisante. Cependant, ces données extérieures à l'étude sont sujettes aux biais évoqués dans les analyses précédentes, et notamment, la densité *relative* aux autres bâtiments non composés de terre n'est pas connue.

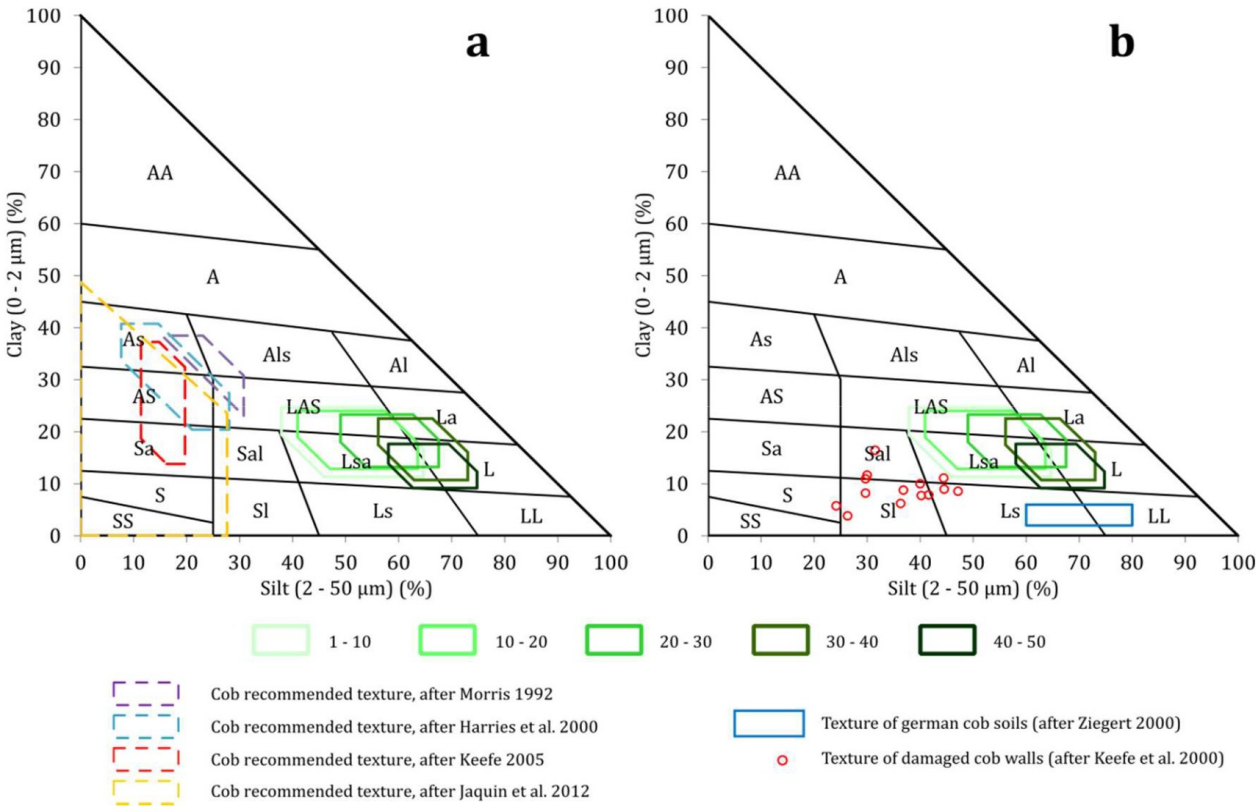


Figure 53 : (également représentée en Figure 52). Texture des sols employés pour la construction en bauge dans des bâtiments vernaculaires en Bretagne (dégradé vert par densité bâtie en bauge relativement à la densité de bâtiments vernaculaires) (Hamard et al. 2018). A gauche, comparée à 4 seuils de référence (tirets discontinus). A droite, comparée à celle de bâtiments observés en Allemagne (bleu continu) et à des bâtiments endommagés au Royaume-Uni (points rouges).

Dans le chapitre précédent, nous avons observé que l'impact des propriétés des terres sur la mise en œuvre était également significative : les constructeur.ices des siècles passés ne s'intéressaient probablement pas qu'à la résistance mécanique, mais également (et peut être principalement) à l'aisance de mise en œuvre de la matière. Au regard de ces considérations pour la mise en oeuvre, nous pouvons interpréter les résultats de Hamard et al. :

- à l'extrémité limoneuse de l'axe repéré, la mise en œuvre serait facilitée par une fermeté (5.1.1) du mélange moins importante et une teneur en eau nécessaire plus faible (Chapitre 2 6).

- à l'extrémité sablo-argileuse, la résistance mécanique est peut-être améliorée par une forte cohésion des argiles, mais la mise en œuvre aurait pu être laborieuse par l'augmentation de la fermeté du mélange plastique, la teneur en eau nécessaire plus forte et donc l'homogénéisation nécessaire plus intense. Nous ne savons pas sur quels critères ont été établies ces recommandations, mais s'il s'agit d'essais mécaniques en laboratoires, il est probable que l'aisance de mise en œuvre n'était pas considérée (Chapitre 1, 3.1). De plus, le mélange nécessiterait plus de fibres pour amortir le retrait non-libre de la bauge (Chapitre 2, 5.2.4.2), technique massive, alors que dans le laboratoire les échantillons bénéficient de retraits libres liés à leur petite taille.

Ces hypothèses pourraient expliquer les résultats obtenus dans l'étude de Hamard et al. (2018) : optimiser la résistance mécanique en laboratoire sans regarder la mise en œuvre conduit à des recommandations restreintes aux sols argilo-sableux ; tandis que si la performance mécanique recherchée n'est pas très élevée (murs larges, bâtiments de plain-pied), optimiser la mise en œuvre pour réduire l'efficacité de travail* induirait un emploi privilégié de matériaux plus limoneux, comme observés dans l'étude de Hamard (2017).

Ces suggestions nécessiteraient cependant d'enquêter sur l'origine des seuils proposés, qui ne sont rarement précisées dans leurs sources originales.

Lorsque l'on observe la distribution des résultats de convenance non agrégés (Figure 54), des densités nulles sont relevées en Bretagne pour les zones granulométriques correspondant aux bâtiments observés au Royaume Uni et en Allemagne (encadré bleu). En effet, même si les terres étaient convenables dans ces zones, l'établissement de bâtiments en terre peut ne pas avoir été réalisée pour d'autres raisons que les propriétés de la terre. Par exemple, la technique de la bauge pourrait simplement ne pas être connue dans les zones où ces terres sont représentées. On voit ici un autre biais d'analyse, relatif à l'aire d'étude concernée. L'extraction des données pédologiques a été réalisée sur l'ensemble de la Bretagne, incluant des territoires situés jusqu'à 200km de zones où l'on trouve effectivement des bâtiment composé de bauge (Finistère, ouest du Morbihan). Dans ces zones lointaines, les sols pourraient être convenables à la construction en bauge, mais la culture constructive ne se serait pas développée par méconnaissance des techniques de construction en terre crue. Ce biais que l'on appellera *zone de connaissance* peut donc induire des « faux négatifs » : des intervalles de valeurs des paramètres étudiés (ici la granulométrie) où la densité relative décroît alors que les sols sont potentiellement adaptés.

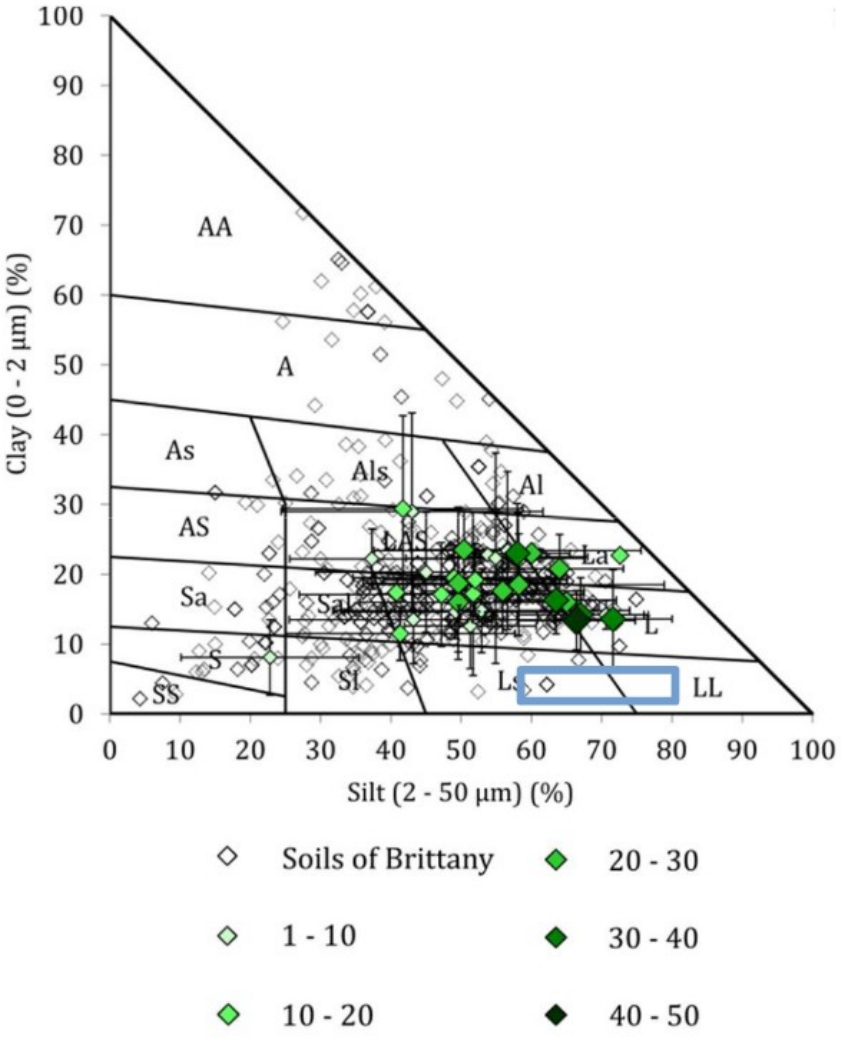


Figure 54 : densité relative bâtie en bauge pour chacune des unités pédologiques étudiées, selon leur texture moyenne. La zone correspondant à la composition granulométrique de bâtiments de bauge Allemands (voir Figure 53) est encadrée en bleu. D'après Hamard (2017).

2.4 Analyse : quelles précautions pour l'analyse de croisements spatiaux de données patrimoniales ?

Croiser des données environnementales avec des données patrimoniales spatialisées comporte un vrai potentiel de compréhension des choix techniques vernaculaires. Les études présentées cherchent notamment à corréler l'occurrence des bâtiments vernaculaires composés de chacune des techniques de construction en terre avec des variables décrivant les propriétés des sols locaux.

Cependant, le choix des données et les méthodes d'analyses doit être fait en connaissance des aléas et des biais potentiels afin d'éviter de mauvaises interprétations des corrélations. Dans certains des travaux analysés, les conclusions tirées des observations de résultats sont trop peu questionnées et finissement par alimenter, sans certitudes, des préconceptions sur les choix techniques. L'approfondissement des analyses des résultats de croisements permettrait probablement de produire des résultats plus représentatifs et plus robustes.

Forts de ces précédents, nous chercherons à éviter certains des biais d'interprétations identifiés en 1) situant notre analyse avec une analyse bibliographique des contextes constructifs concernés (3) et 2) considérant les biais inhérents à la méthode de collecte, traitement, croisement des données et représentation des résultats (4 - 7).

3 Théorie : choix technique et propriétés pédologiques en période pré-industrielle

Croiser des données environnementales avec des données patrimoniales a un potentiel intéressant dans l'étude des choix techniques préindustriels. A partir des observations que nous avons réalisé sur les études croisant le patrimoine bâti en terre et des données environnementales, dont des données pédologiques, nous avons remarqué la complexité d'interpréter d'éventuelles corrélations. En effet, de nombreux autres facteurs impactent l'occurrence de bâtiments en terre crue dans l'espace et selon des variables environnementales. Nous proposons ici une étude théorique des facteurs ayant pu impacter les choix techniques en contextes pré-industriel ou à l'émergence du contexte industriel en france hexagonale*, ainsi que l'intensité des biais et aléas qu'ils peuvent apporter dans l'analyse des relations entre sols et choix des techniques de construction.

3.1 Objectifs

Nous avons vu que les propriétés de composition physico-chimiques de la terre influencent la facilité de mise en œuvre à plusieurs étapes du cycle de vie des procédés terre crue (Chapitre 2, 6). L'objectif du présent travail est d'employer la méthode de croisement de données environnementales/patrimoniales en employant des données décrivant précisément diverses propriétés pédologiques afin de révéler l'influence des propriétés de la terre à disposition sur la technique de construction en terre choisie par les constructeur.ices des bâtiments vernaculaires pré-industriels. C'est l'influence qui relève de la *facilité de mise en œuvre* dans les procédés qui nous intéresse ici, or nous avons vu avec les exemples de travaux de recherches employant cette méthode que ce n'est pas le seul facteur qui gouverne le choix technique, et que certains peuvent présenter des corrélations indirectes avec les variables pédologiques.

Notamment, puisque l'on rencontre généralement une grande diversité de techniques possibles sur un même territoire, la relation entre le choix d'une technique de construction en terre crue et les propriétés pédologiques n'est pas qu'une aisance technique pour construire en terre mais plutôt un *choix préférentiel* d'une technique de terre par rapport à une autre technique de construction, composée de terre crue ou non.

Aussi, l'aisance de mise en œuvre des différentes possibilités techniques se conjuguent à un ensemble de constructions sociales valorisant ou dévalorisant l'emploi des techniques de construction, au sein d'espaces-temps sociaux complexes et variés, que l'on appellera le contexte constructif. La société* et son environnement matériel influencent donc directement ou indirectement les relations entre la terre à disposition et l'occurrence d'une technique de construction en terre crue. Quelques exemples relevés par Gohel (1976) :« [...] les matériaux de construction sont la résultante de phénomènes complexes qui prennent en compte non seulement la nature du sous-sol mais aussi l'infrastructure des transports, les habitudes de construction, les qualifications socio-professionnelles. » (Louis-Michel Gohel 1976).

Il convient donc de considérer l'ensemble des possibilités techniques et des influences des *contextes constructifs* sur les *choix préférentiels* si l'on veut comprendre la part d'influence que l'on peut effectivement attribuer à la relation *terre - facilité de mise en œuvre* pour chacune des techniques de construction en terre crue.

Visibiliser la diversité des contextes constructifs permet de se prémunir d'une vision dite *déterministe* entre les propriétés du sol et les choix techniques. Nous supposons que l'environnement matériel influence le choix des techniques de constructions pré-industrielles, ce qui est une forme de « déterminisme technologique » comme le suggère Villain (2020, p. 76). Cependant, il précise que « l'existence sociale d'une technique (matériau, matériel, énergie, etc.) » n'advient pas uniquement par la « force intrinsèque relevant de ses propriétés techniques », comme nous avons pu l'observer au Chapitre 2 (6.2). On ne se limitera pas alors à la simple analyse des qualités techniques des techniques de construction ou de la disponibilité des matériaux, mais on ouvrira les possibilités d'influence à toutes les composantes des cultures constructives qui nous ont semblé significatives. Enfin, si cette liste de paramètres et leur catégorisation permettra de faciliter l'analyse des résultats du traitement de données et leur mise en perspective dans un contexte constructif plus large, elle est forcément non exhaustive et possiblement maladroite car elle touche à des champs de recherche qui dépassent notre expertise.

Dans ce travail, nous ne traiterons que des contextes qui concernent les données patrimoniales de cette étude, c'est à dire des contextes pré-industriels jusqu'au début du 20^{e} siècle.

Un schéma résumant les interactions entre les paramètres décrits est proposé en Figure 55.

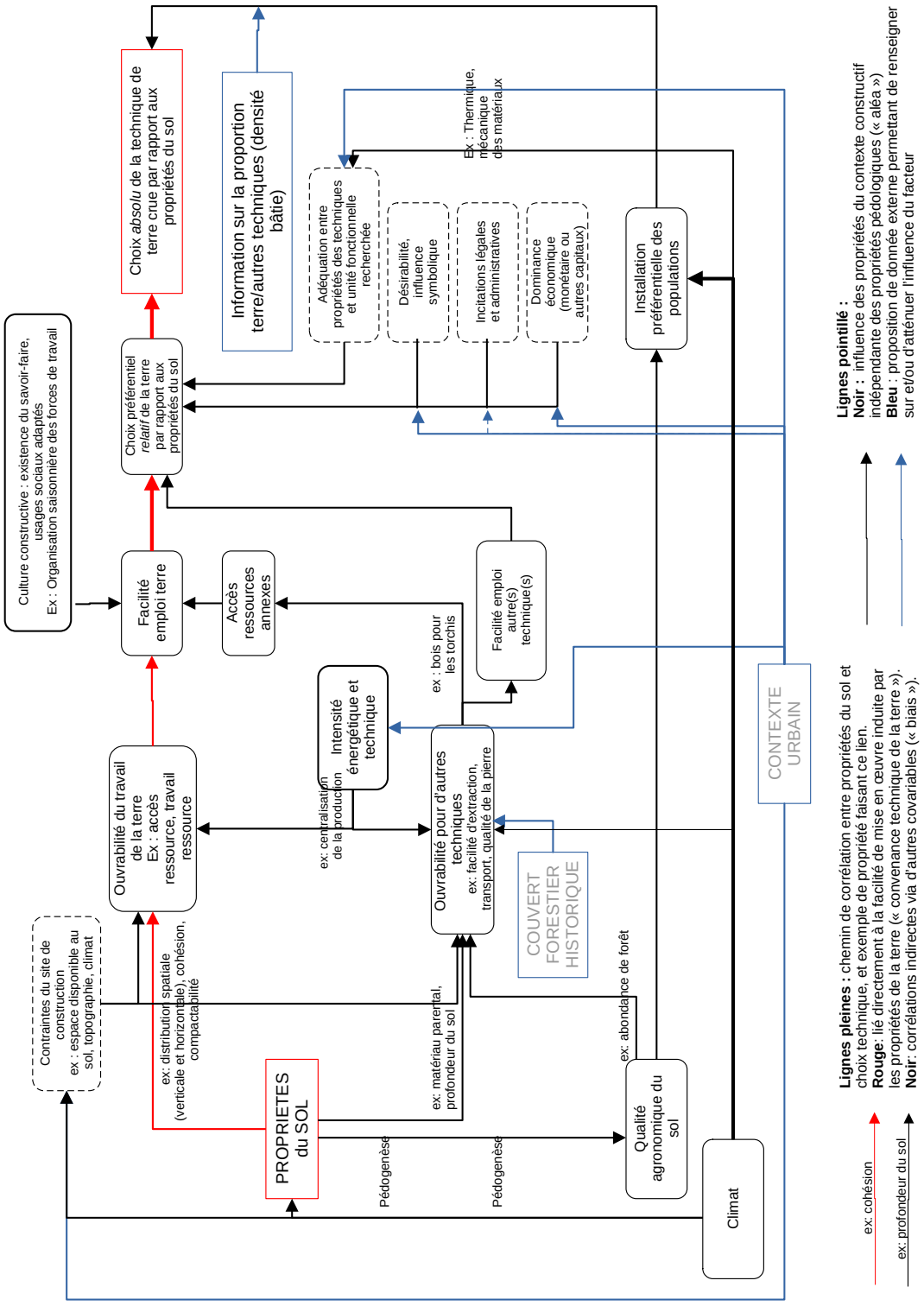


Figure 55: Facteurs de corrélation entre propriétés du sol et occurrence de techniques de construction en terre crue, et facteurs externes d'influence sur le choix technique. Propositions de covariables permettant d'appréhender certaines des influences du contexte constructif. Par exemple, la densité bâtie permet d'éliminer le biais lié à l'installation préférentielle des populations.

3.2 Aléas, biais et propriétés du contexte constructif

L'analyse des études précédentes visibilise quelques éléments permettant de traduire les influences des éléments du *contexte constructif* en termes statistiques.

Premièrement, nous distinguerons les *aléas* des *biais* qui n'ont pas le même impact sur les résultats d'analyse et leur interprétation.

L'aléa est une « dispersion des résultats » dans une observation de corrélation entre deux phénomènes. Dans l'observation de la corrélation entre l'occurrence d'une technique-type de terre crue et une propriété environnementale, si la propriété ne gouverne pas *totalement* le choix technique, alors les choix technique n'y seront pas directement proportionnels et les résultats seront dispersés. La variabilité que l'on catégorise dans l'aléa n'est pas corrélée à la propriété elle-même : finalement, sur de grandes quantités d'échantillons, la corrélation n'est pas modifiée. Réduire l'influence de l'aléa sur les corrélations passe soit par l'augmentation du nombre d'échantillons, soit dans sa réduction en identifiant la variable source de l'aléa ce qui permet de le soustraire aux données (normalisation) ou au moins de l'expliquer. Sur de grosses bases de données, l'aléa est peu problématique : il est « moyenné » sur l'ensemble des échantillons.

Un biais est une variation de la corrélation observée, indépendante de la taille de l'échantillon, qui n'est pas expliqué par le lien de causalité que l'on cherche à explorer. Dans le cas de l'explication des liens entre *propriétés de la terre* et l'*occurrence des bâtiments en terre* par l'ouvrabilité* de la terre, un biais est une variable qui est corrélée à ces deux propriétés et qui modifie la relation de corrélation que l'on peut observer: par exemple, la qualité agronomique du sol influence l'occurrence de bâtiments (en terre ou non) sans être liée à l'ouvrabilité du matériau terre. Un autre exemple est la teneur en éléments grossiers, qui peut-être influant positivement ou négativement la facilité de mise en œuvre de certaines techniques-types, mais qui est également corrélé avec l'accès à la pierre pour construire (3.4), ce qui perturbera la corrélation observée. Saisir ce qui appartient à la causalité recherchée et à d'autres biais ne peut se faire qu'en connaissance du contexte de mise en œuvre des techniques et des enjeux associés, pour les identifier, condition nécessaire pour pouvoir envisager d'intégrer d'autres paramètres permettant d'évaluer voir d'annuler leur impact.

Dans l'analyse des études précédentes employant la méthodes de croisement de données que nous envisageons, nous avons relevé quelques-unes des propriétés du *contexte constructif* apportant des biais et aléas potentiels. Nous pouvons les regrouper en trois catégories :

- **l'installation préférentielle (biais et aléas)**

- les ressources « naturelles » et techniques (aléas principalement)

- la culture constructive (aléas principalement)

Par ailleurs, d'autres aléas et biais provenant des données et de la méthode d'analyse peuvent s'ajouter ou renforcer ceux liés au contexte constructif. Ceux-ci seront résumés après la description du protocole, en 7 .

3.3 L'installation préférentielle

3.3.1 Description

L'installation et la dispersion des populations humaines peut être observée par une « sédimentation » progressive dans l'espace et le temps d'un ensemble d'édifices dédiés à l'habitation et la subsistance. Le choix du lieu d'implantation dépend de nombreux facteurs de l'environnement immédiat. La

distribution des édifices en terre crue n'échappe pas à ce phénomène. La répartition et la densité bâtie en terre crue, dans l'espace, ou relativement aux variables du sol, varie selon ces facteurs, dans une dynamique que l'on qualifiera d'*installation préférentielle*.

Le travail bibliographique de Ford (2002) révèle l'importance de la topographie, de la proximité des réseaux routiers, du couvert forestier et de l'accès à l'eau sur l'installation préférentielle des populations et donc l'occurrence générale des bâtiments. Ces paramètres influencent la qualité de la subsistance quotidienne, qu'elle soit une aisance de construction ou sur d'autres facteurs d'intérêt comme l'alimentation ou un ensemble de pratiques et de coutumes en interaction avec l'environnement.

La qualité agronomique des écosystèmes locaux est probablement un facteur majeur d'installation préférentielle des populations sédentaires. Les fonds de vallées, les plaines sédimentaires, ont pu être des zones attractives pour l'installation et le développement de groupes d'humain.es.

Un exemple lié à la construction directement est la présence de forêt. Les charpentes en bois composent la quasi-totalité des bâtiments construits dans l'hexagone (Rackham 1986, dans (Ford 2002)). La présence de forêts à proximité a donc probablement été un facteur d'installation préférentielle.

Ces facteurs d'influence sur les dynamiques de subsistance des populations évoluent dans le temps, et on peut supposer qu'ils aient fortement changé à l'avènement des systèmes industriels, permettant progressivement le transport de tout, partout et en tout temps. De nos jours, la civilisation industrialisée et mondialisée atteint un niveau de « déracinement » de son environnement immédiat inégalé :

> « Tout, dans l'épopée de l'architecture, semble renvoyer à une émancipation progressive vis-à-vis du sol, qui est presque toujours représenté comme une page blanche sur laquelle matérialiser les projets humains. » (Meulemans (2019), dans (Villain, 2020, p. 65)

3.3.2 Biais et aléas dans la relation sol-technique

L'influence de ces facteurs d'*installation préférentielle* introduit des *aléas* dans la distribution des bâtiments en terre selon les variables pédologiques. Tant que ces facteurs ne sont pas fortement corrélés aux propriétés pédologiques, par exemple la proximité de réseaux routiers ou encore la présence de forêts (3.4.3), il ne s'agit que d'une composante aléatoire qui fait baisser l'acuité de la relation sol-choix technique mais n'impacte pas le type de corrélation directement : sur de nombreux échantillons, une relation de proportionnalité entre une propriété du sol et une densité bâtie en terre crue serait la même avec ou sans aléas.

Cependant, certain de ces facteurs sont probablement corrélés aux variables pédologiques étudiées : l'installation à proximité du réseau hydrographique induit une plus grande proportion de bâtiments sur des sols issus de dépôts sédimentaires ; l'installation dans des zones à haut potentiel agronomique favorise les sols à haut potentiels agronomiques donc fins et profonds, etc.. Cela procure un *biais* si l'on souhaite interpréter les corrélations par leur potentiel technique pour la construction en terre : une plus forte occurrence de bâtiments en terre sur des sols fins peut être lié à la qualité de la terre pour le procédé de construction et/ou à la qualité agronomique des sols.

3.3.3 Variables permettant la réduction des aléas et biais

Heureusement, l'installation préférentielle impacte l'occurrence des bâtiments composés de terre crue mais également et de manière équivalente, celle des autres bâtiments. Ainsi, pour éliminer les biais et aléas qu'elle induit, l'occurrence des bâtiments en terre peut être évaluée comparativement à celle de l'ensemble des bâtiments vernaculaires, comme proposé par Hamard et al. (2018) avec l'emploi de données patrimoniales généralistes permettant de travailler avec des *densités relatives* de bâtiments composés de terre crue.

Dès lors, l'occurrence *relative* d'une technique de construction témoigne de son *choix préférentiel* par rapport aux autres techniques par les constructeur.ices et devient indépendante de tous biais liés au choix préférentiel.

Mais pour les techniques de terre crue, ce choix préférentiel est lui-même impacté par d'autres considérations que l'influence directe des propriétés de la terre sur la facilité de mise en œuvre de la terre. La diversité et l'accessibilité de ressources à disposition, ainsi que de nombreux facteurs socio-politiques impactent les choix techniques.

3.4 L'écosystème matériel : impact du climat, de la géographie, des ressources en terre, pierre, bois, fibres, eau, et systèmes techniques pour le chantier

Le choix de construire en terre crue est réalisé au regard des propriétés des ressources en terre, mais également de celles de la disponibilité des matériaux et matériels autres que la terre. D'une part, *négativement*, dans une concurrence avec les techniques de construction non composées de terre crue, qui sont elles dépendantes de ces matériaux pour leur mise en œuvre. Ce sont les matériaux *principaux* de ces techniques. Par exemple, la proximité de carrières pour la construction en pierre (Hamard 2017), et/ou de moyens de transports de matériaux lourds (Mille 2023) pour son importation facilite son accès et défavorise de fait le choix des autres techniques composées de matériaux locaux comme la terre. D'autre part, *positivement*, car la plupart des techniques de construction en terre emploient également des matériaux et matériels autres que la terre dont la facilité d'accès importe sur le choix technique : bois pour les torchis (Mileto et al. 2019; Hueto-Escobar et al. 2022), systèmes de transports pour les adobes, etc. Ce sont, pour les techniques de terre crue, des matériaux que l'on peut considérer comme *secondaires*, même si cela reste discutable notamment pour le bois des torchis-colombages.

Les ressources « naturelles » ou « techniques » évoluent dans l'espace mais également dans le temps, comme relevé par Ford (2002) et Mille (2023) qui suggèrent que l'impact du développement des moyens de transports de matériaux pondéreux pourrait être visible sur l'occurrence du patrimoine bâti en terre crue, de même que le développement de méthodes mécanisées de l'extraction de la pierre qui facilitent son accès.

L'environnement matériel est ici vu comme un continuum entre les ressources de l'écosystème peu impactées par la société humaine, comme les sols, et les ressources de l'écosystème technique humain, comme l'accès à des briques cuites ou de la pierre fortement dépendant des systèmes sociotechniques de transport et de commerce. En effet, il n'y a pas de rupture nette entre ressources « naturelles » et ressources « techniques » : la forêt, comme les autres ressources agricoles, est issue d'un travail de gestion et de modelage organisé par la société et en dépend de fait. Berque (2021) suggère même que dès lors qu'un objet est nommé, il intègre l'écosystème des ressources d'une société : tout est société et rien n'est « naturel », loin d'un dualisme nature/culture qui a longtemps formatée la pensée du Nord Global* (Descola 2015).

Il est rare qu'une région française n'aie pas de culture constructive employant de la pierre ; pour le bois, des bâtiments dont les murs sont essentiellement composés de bois sont rares mais le remplissage de colombages a pu aussi se faire en pierre ou en briques cuites : l'abondance de bois peut aussi favoriser l'emploi de techniques non composées de terre crue. Ainsi, pour le bois comme pour la pierre, la présence de ressource adéquate et son accessibilité pourraient fortement influencer l'occurrence de bâtiments en terre *relative* par choix préférentiel pour ces techniques alternatives (Le Garrec et al. 1978).

3.4.1 Géographie et climat

Une fois l'installation préférentielle des populations normalisée par la prise en compte de la densité bâtie (3.3.3), l'influence de la géographie et du climat sur l'installation préférentielle est éliminée. Mais ces variables peuvent également impacter les choix préférentiels *relatifs* des techniques de construction.

Hueto-Escobar et al. (2022:18) indiquent que la hauteur des soubassements, la largeur des débords de toit et la fréquence de l'enduisage des éléments extérieurs des murs composés de torchis est proportionnelle à la pluviométrie locale, cependant ces conclusions nécessiteraient un approfondissement de leur analyse statistique (voir 2.2).

Il est probable que des climats plus difficiles favorisent l'emploi de techniques plus résistantes (ou au moins supposées comme telles), comme la pierre ou la brique cuite. Il est en effet souvent remarqué que les murs orientés face aux vents dominants, donc exposés aux intempéries sont moins fréquemment bâtis en terre dans les territoires où les vents sont conséquents comme en Midi-Pyrénnées ou en Bretagne (Marfaing et al. 2000; Bardel & Maillard 2009).

Entre les différentes techniques de terre, il est difficile de se prononcer quant à leur résistances relatives et cet impact sur le choix préférentiel. En revanche, l'impact du climat sur l'étendue de chantier et éventuellement sur la pénibilité liée aux aléas météo est non négligeable. Les artisan.es contemporaines nous indiquent qu'il est très compliqué de faire sécher de la terre lorsque sa teneur en eau est trop élevée (Marfaing et al. 2000; Villain 2020; «Bosi» 2022; «Dugelay» 2022b) et que de ce fait, le choix de la technique est limité par la teneur en eau naturelle du sol en début de saison (Villain 2020). Au 19ème siècle en Ille-et-Vilaine, de riches propriétaires font spécialement venir des maçons Lyonnais pour réaliser un bâtiment de pisé. Mais dans une lettre, le commanditaire communique ses inquiétudes vis-a-vis de la météo :

> « « [...] je fais venir deux ouvriers lyonnais qui me coûteront très cher et si le temps d'hiver continue ils ne pourront rien faire [...]. » » (Huitorel 2018, 274)

La rareté du pisé dans le nord de l'Europe pourrait s'expliquer par des climats plus humides et ainsi des saisons d'ouvrabilité du sol relativement courtes.

En fin de saison estivale, la construction en terre est limitée par la durée nécessaire de séchage des éléments avant les premiers gels qui provoqueraient des pathologies dans les éléments mis en œuvre (Smith & Austin 1989; CCTC 2018). Or, les techniques massives nécessitent des temps de mise en œuvre et de séchage incompressibles, ce qui veut dire que la durée de la saison entre l'occurrence de sols suffisamment ressuyés au printemps ou en été et l'arrivée du gel en hiver doit être suffisante pour permettre le déroulement des chantiers.

La technique du pisé semble particulièrement impactée par la météo sur le chantier. La teneur en eau optimale est la garantie d'une compaction optimale au cours de la mise en œuvre, sur laquelle les constructeur.ices misent pour atteindre une cohésion suffisante (Chapitre 2, 5.2.4.1). Or,

particulièrement pour les sols pauvres en argiles («Bosi» 2022), la variation de la saturation en eau peut être très rapide autour de l'optimum de compaction. Cela induit que la gestion de la teneur en eau de la terre et des aléas météorologiques nécessite un savoir-faire et une attention conséquente (Maniatidis & Walker 2003).

D'autre part, la pénibilité de mise en œuvre est exacerbée en périodes très chaudes (Pillon 2012). Ainsi, le mois d'août peut être limitant pour ces considérations, surtout dans les régions les plus chaudes du sud de l'hexagone. Pour certain.es constructeur.ices, la mise en œuvre idéale du pisé sur site en Rhône-Alpes ne serait idéale que dans un intervalle de deux à trois mois de l'année : mai/juin/juillet (Rinino 2021b).

Ainsi, si le déploiement massif de la construction en pisé semble limitée à la moitié sud de la France hexagonale, c'est peut-être une question de teneur en eau naturelle des sols au printemps : s'ils restent saturés jusque tard dans la saison, il n'y aurait peut-être plus suffisamment de temps pour réaliser les chantiers avant l'hiver, d'autant plus que la fin de saison estivales a souvent pu être rythmée par les récoltes et leur conservation (voir 3.5.2). Au royaume-uni, la mise en œuvre du pisé a pu être réalisée en construisant préalablement la structure porteuse du toit (Maniatidis & Walker 2003).

Les éléments préfabriqués comme les adobes sont en revanche moins dépendants du climat et de la météo (Maniatidis & Walker 2003), car l'étape de fabrication des éléments peut s'étaler sur une longue période : la teneur en eau de mise en œuvre est plus forte et donc rarement limitante à l'approvisionnement, et le séchage plus rapide sous forme de petits éléments donc le façonnage n'est interdit que par les périodes à risque immédiat de gel (Smith & Austin 1989).

3.4.1.1 aléas et biais

Les conditions climatiques et géographiques introduisent certainement un aléa conséquent dans la relation sol-technique pour l'ensemble des techniques de terre crue.

En revanche, il est plus difficile de se prononcer sur un éventuel biais. Ces deux facteurs sont centraux dans la pédogenèse (Chapitre 2, 3) et conditionnent donc également les propriétés des sols. L'altitude et les climats froids ralentissent la pédogenèse et pourraient favoriser des sols plus grossiers. Les climats tempérés et pluvieux donnent plus facilement lieu à des sols profonds, d'autant plus en plaine où l'érosion est relativement faible. Si ces corrélations sont significatives sur un territoire de la taille de l'hexagone, les techniques favorablement corrélées aux sols fins pourraient être en fait choisies en partie pour leur adaptation aux climats tempérés et pluvieux.

Par exemple, il est probable que les techniques de pisé ne soient pas adaptés aux climats pluvieux par le fait qu'elles nécessitent de faibles teneurs en eau de mise en œuvre. La non occurrence de pisé en Bretagne est donc peut-être le fait que le sol soit trop fin et non adapté, mais peut également être le fait que la teneur en eau naturelle des sols est trop élevée pendant l'essentiel de la saison, comme le suggèrent les constructeur.ices contemporain.es ("architecte", dans (Villain 2020:243)).

3.4.2 Terre

Nous cherchons dans ce travail à observer les corrélations entre les paramètres pédologiques et les choix techniques liés à l'ouvrabilité de la terre dans les techniques de terre crue. L'ouvrabilité de la terre est conditionnée par ses propriétés intrinsèques dans les procédés, que l'on peut découper en quatre « étapes-types » : l'approvisionnement, la préparation, le façonnage et les performances d'usage (Chapitre 2, 6.2), et chacune d'entre elles est impactée différemment par les propriétés de la terre.

Mais d'autres techniques sont impactées par les potentiels d'ouvrabilité de la terre locale. Les techniques de pierre et de briques cuites sont souvent maçonnées à la terre, éventuellement adjuvantée de sable ou de chaux. En tant que mortiers, le sable et la chaux employés purs ou mélangés à la terre sont des alternatives à la terre crue car le volume de mortier est bien moins conséquent que le serait le mélange de terre adjuvanté dans un mur massif. Cela rend finalement les techniques de maçonnerie pierre aux mortiers adjuvantés plus sobres que les techniques de terre massives adjuvantées, pouvant expliquer l'absence de ces dernières dans les cultures constructives vernaculaires. Rappelons que l'adjuvantation hydraulique de la terre dans la construction de la masse du mur a très peu d'avantages et équivaut à un « mauvais béton » de ciment ou de chaux (Contexte, 1.4.1). Ainsi, pour la construction en pierre/briques cuites, l'accessibilité de terre « favorable aux mortiers » n'a probablement pas d'impact sur le choix de ces techniques, car les alternatives sable/chaux sont relativement accessibles.

En revanche, les procédés de fabrication de briques cuites travaillent directement la matière terre, et la teneur en argiles des sols employés semble être un facteur de facilitation des procédés et de qualité des produits finis (Smith & Austin 1989; Barnes 2013b). La présence de briqueteries est donc favorisées par des sols très argileux. Les sols très argileux et calciques pourraient être d'autant plus favorables à la brique cuite car selon Smith & Austin (1989) les ions calcium réduisent la température de calcination des briques.

3.4.2.1 Biais et aléa

L'abondance de ressources adéquate très argileuses pourrait donc favoriser la brique cuite, et de ce fait défavoriser les techniques de construction en terre crue dans le choix relatif, produisant un potentiel biais dans l'interprétation de l'occurrence des bâtiments composés de terre crue sur sols argileux ou argilo-calcaires. La brique cuite et la brique crue ayant des cultures constructives communes leur permettant d'évoluer conjointement (voir 3.5.7), et des terres favorables également communes, il est difficile de savoir si la présence de terres argileuses favorise l'une ou l'autre préférentiellement. En revanche, il est possible que face aux autres techniques de construction en terre crue, l'impact de la présence de briqueterie soit significatif et explique leur absence dans les pédopaysages aux ressources argileuses conséquentes.

3.4.3 Bois

Le bois est un matériau d'importance fondamentale pour la plupart des architectures vernaculaires hexagonales. Constituant essentiel des charpentes, le bois est d'importance pour toutes les techniques constructives employant ou non la terre. L'abondance et le type de couvert forestier est donc peut-être facteur d'installation préférentielle, même si la forêt est essentiellement un écosystème géré et organisé sur le territoire.

De toute évidence, l'accès au bois est d'importance fondamentale pour les techniques de torchis ou de terre en remplissage d'ossature en général (type adobe, bauge) (Wolfskill et al. 1970; Hueto-Escobar et al. 2022). A Lyon, l'absence de bois local dans la vallée du Rhône est probablement une des causes de rareté du pan de bois dans la ville (Mille 2023). De nombreux cas le démontrent, en remarquant que les pénuries de bois ont souvent été cause de renoncement à ces techniques (Chancel 2007 dans (Goizauskas 2020), (Hueto-Escobar et al. 2022). Le savoir-faire charpentier permet d'adapter les architectures aux contraintes imposées par la présence de terre, comme l'élargissement des débords de toit pour leur protection (Gohel 1976 dans (Villain 2020)). En ce sens, l'abondance de ressource en bois n'impacte peut être pas que les techniques de torchis-colombage, mais peut être de manière plus anecdotique l'ensemble des techniques de construction en terre nécessitant ces aménagements de charpentes.

La plupart des techniques de construction en terre emploient du bois à certaines étapes du cycle de vie, sous la forme d'outils, notamment les jeux de coffrages pour les techniques-types de pisé. Mais la faible quantité nécessaire et la grande durabilité de ces outils laisse penser que le lien avec l'abondance forestière est négligeable.

Hueto-Escobar et al. (2022) observent une plus forte occurrence des techniques de torchis en milieu urbain, malgré que leurs données de couvert forestier ne montrent pas de densité boisée à proximité. La présence de torchis en milieu urbain est courante, de par ses nombreux avantages dans ce contexte : densité bâtie, prestige esthétique, modularité, *etc.* (3.5.7). Mais à unité fonctionnelle* de résistance mécanique égale, le bois est bien plus léger et compact que les matériaux minéraux, ce qui fait que son accès est probablement autant gouverné par les moyens de transports locaux que par la proximité de la ressource forestière.

Mais les techniques de colombages peuvent également mobiliser d'autres matériaux minéraux ou végétaux en remplissage d'ossature comme la brique cuite ou la pierre (Hueto-Escobar et al. 2022). Ce qui veut dire que si la proximité de la ressource en bois favorise probablement les techniques-types de terre en remplissage d'ossature relativement aux techniques de construction porteuses, elle n'est pas forcément favorables au torchis relativement aux autres techniques de remplissage (pierre, brique cuite).

3.4.3.1 aléas et biais

Pour le bois, la distribution de la quantité et du type de ressources forestières est en partie liée aux conditions environnementales et notamment aux propriétés agronomiques des sols. Les sols de moindre qualité agronomique sont plus souvent emboisés que les terres plus fertiles, réservées à l'agriculture (Pirard & Schruijer 2022).

Il est à noter que la qualité agronomique d'un sol, impactant également l'installation préférentielle des populations pré-industrielles, est variable selon le contexte. On remarque notamment que l'industrialisation de l'agriculture dans la seconde moitié du XXe siècle, via l'introduction de nutriments industriels et la mécanisation, a réduit l'importance relative de la fertilité chimique naturelle des sols par rapport à celles de la topographie (Pirard & Schruijer 2022). Dans la période pré-industrielle, selon les organisations agricoles locales, la corrélation entre ressources forestières et sols a pu être encore plus importante qu'elle ne l'est aujourd'hui, ce qui veut dire que les contextes forestiers contemporains ne correspondent pas forcément à ceux des époques de construction des bâtiments historiques.

Les sols grossiers, de forte pente et/ou peu profonds sont souvent attribués à la gestion forestière. La présence de torchis dans des pédopaysages composés de sols avec ces propriétés est donc peut être liée à l'omniprésence du bois, favorisant une corrélation entre ces sols et le choix technique des techniques de remplissage d'ossature.

Cependant, le transport du bois étant peu limitant, la densité forestière devait être considérée à plus grande échelle que directement dans le pédopaysage alentours au bâtiment. Si les sols boisés sont sur les « hauts » des versants et les bâtiments dans le fond des vallées comme dans les paysages de la Champagne crayeuse (Pirard & Schruijer 2022), alors les sols autours des bâtiments ne sont finalement pas les mêmes que les sols boisés. Ainsi, il est assez peu probable qu'une corrélation significative existe entre les terres employées dans les bâtiments et le potentiel des sols pour la production forestière.

3.4.4 Fibres

Certaines technique de construction en terre crue emploient des fibres végétales dans la masse de la terre (cultivées : paille, chanvre, foin, lin, ou fibres sauvages : ronce, genévrier, etc), qui facilitent certaines étapes de la mise en œuvre et modifient les performances du matériau final. Dans l'ordre d'importance des fibres dans les procédés, on peut classer les 4 techniques-types historiques : torchis > adobes = bauge > pisé. Le pisé n'a *a priori* pas de fibres, en tout cas en France hexagonale. L'accès à ces fibres a pu jouer sur le choix technique. On pourrait lier la présence de telle ou telle fibre à la qualité agronomique des sols, et prendre en compte cette influence. Cependant, ces fibres sont hautement substituables avec d'autres fibres cultivées ou sauvage, et en l'absence de contexte favorable pour une de ces fibres, une alternative locale est probablement disponible et a été employée.

De plus, contrairement aux techniques modernes comme la terre allégée ou les procédés de bauge très fibrées (Contexte, 2.3.3.1), il semble que les éléments composés de terre crue préindustriels contiennent rarement plus de quelques pourcents massiques de fibres - généralement entre 1 et 2 % (Hamard, Cazacliu, et al. 2016:108). Les fibres nécessitent en effet un travail de préparation et avaient de nombreux usages (alimentation et litières animale, amendements des sols, conception de toitures de chaume, etc.) dont l'avantage procuré pouvait être supérieur à celui de l'emploi dans la terre. Leur abondance dans le contexte de l'agriculture productiviste et mécanisée contemporaine ne doit pas faire oublier qu'elles n'ont pas toujours été si disponibles. Par ailleurs, les besoins d'isolation n'étaient certainement pas aussi importants qu'aujourd'hui : dans ce cas, l'étanchéité à l'air des ouvertures et couvertures rarement aussi surveillée que dans les bâtiments contemporains auraient probablement reçu une attention prioritaire à l'isolation des murs.

Ainsi, des aléas et biais sur les variables environnementales relatifs aux fibres sont peu susceptibles d'apparaître à l'échelle du territoire hexagonal.

3.4.5 Eau libre

Le mélange de terre mis en œuvre contient une teneur en eau variable selon les techniques. La teneur en eau est d'ailleurs une variable utilisée pour classer les procédés de construction en terre crue (Contexte, 2.3.4). Souvent, les constructeur.ices s'arrangent pour extraire la terre au moment où sa teneur en eau est proche de celle désirée. Peut-être même que les choix techniques ont été influencés par les teneurs en eau des sols locaux (cf. 3.4.1 Géographie et climat). Malgré tout, lorsque le sol extrait est en deçà de la teneur en eau désirée, il est nécessaire d'en ajouter au mélange. Ainsi, l'influence du climat sur la teneur en eau du sol (3.4.1) peut être modulée, uniquement dans le sens de l'augmentation de teneur en eau, par l'ajout d'eau libre (réseau hydrique naturel, systèmes techniques de captation).

Cette disponibilité en eau pourrait être limitante dans les territoires où cette ressource est rare, et ainsi, l'accès à l'eau serait un facteur de choix préférentiel des techniques de terre crue (Hueto-Escobar et al. 2022). Cette limitation ne serait alors pas la même selon les différentes techniques de construction, qui demandent généralement des teneurs en eau par masse de terre selon l'ordre suivant : torchis > adobe ≥ bauge > pisé. Il est possible que la quantité d'eau nécessaire par unité fonctionnelle* (de m^2 de mur), ne soit pas directement proportionnelle à la teneur en eau massique supposée les techniques-types puisque l'épaisseur de mur influence le volume total de matériau. Ainsi, la teneur en eau nécessaire par m^2 de mur pour les techniques où de l'eau est ajoutée est probablement plutôt liée à l'épaisseur du mur qu'à la technique-type.

Finalement, les quantités d'eau utilisées sont probablement négligeables relativement à sa disponibilité dans la plupart des contextes en France métropolitaine. On notera aussi que les techniques de torchis ou d'adobes sont utilisées aussi bien en Europe que dans des pays tropicaux ou désertiques. Ainsi, on supposera que la disponibilité en eau n'est probablement pas une variable impactante sur les choix techniques.

3.4.6 Pierre

Les techniques de construction employant de la pierre en France métropolitaine sont diverses et variées. La provenance du matériau varie également : dans l'ordre d'intensité croissante du travail* de production du matériau, on peut distinguer la *cueillette** locale (Amouroux et Saramon 1982, p 20) de « pierres volantes » ou « pierres de champ » qui permet par la même occasion d'épierrer les champs et faciliter les travaux agricoles (Klein 2011); la pierre de carrière brute, non taillée ; la pierre de taille. Avec l'augmentation du travail de préparation, on suppose également une plus forte centralisation de la production : les petites carrières de ferme pour des blocs non taillés, et des carrières spécialisées pour les pierres taillées. La production centralisée et mécanisée s'est progressivement imposée avec la rationalisation* progressive des moyens de production et de transport à l'approche du XXe siècle (Le Garrec et al. 1978; Hamard 2017). La pierre devient alors un matériau très concurrentiel car il permet une mise en œuvre rapide d'édifices de tous types. Dans l'habitat vernaculaire, on rencontre essentiellement de la pierre de champ ou de carrière non taillée, sauf peut-être dans le cas de roches dont la taille est plus aisée (p. ex. calcaires). On suppose que les dynamiques de choix techinques de la pierre de taille sont moins impactantes que celles des techniques de pierre non taillées s'il s'agit de comprendre le développement des techniques de terre crue vernaculaires. La pierre de taille de carrière spécialisée est un produit qui sort plus fréquemment du cadre vernaculaire* tel que nous le définissons.

Comme pour le bois, les associations de la terre et de la pierre sont fréquentes. Les soubassements (ou solins) en pierre, plus ou moins conséquents, soutiennent la majorité des ouvrages composés de terre crue. La hauteur du sous-bassement en pierre pourrait être considérée comme une forme de représentation de « l'intensité » du choix préférentiel de la terre dans les bâtiments : plus il est haut, plus la pierre est préférée. Comme nous l'avons remarqué en introduction (Contexte, 2.3.4) on peut voir une certaine continuité entre les techniques dites « de terre » et les techniques « de pierre » : il n'y a pas de limite nette entre de la bauge où de grosses pierres ont été incluses et un appareil de pierres brutes maçonnées avec un épais mortier de terre.

On observe aussi des renforts d'angles de murs ou d'ouvertures en pierre, qui protègent les zones fragiles, donnent une symbolique sociale rapprochant la maison de la maison en pierre (cf. 3.5.5), et *in fine* peuvent favoriser le développement ou maintien de cultures constructives de la terre crue. Les pierres sont également employées comme maintien de continuité entre les levées de bauge (Hamard, 2017, p. 79), ou pour favoriser l'accroche de la couche d'enduit comme Klein (2011) le suggère pour les techniques de damier (Contexte, 2.3.2.3).

L'accessibilité et l'ouvrabilité des techniques de pierre a pu avoir des impacts directs sur certains aspects de la performance des techniques de terre crue en renforçant les angles par exemple, ce qui améliore la compétitivité de la terre relativement aux autres techniques de construction (p. ex. pierre, brique, bois). Mais dans la relation de choix préférentiel entre la pierre et la terre, l'accès à la pierre procure surtout un avantage aux techniques de pierre. En terme de développement *relatif* de la terre par rapport aux autres techniques de construction vernaculaires, dont la pierre est le constituant principal, la disponibilité de la pierre reste ainsi probablement un facteur négatif du déploiement de la terre, comme en témoignent Le Garrec et al. :

> « Partout, où la pierre affleure ou subaffleure elle a été employée préférentiellement à la terre. Il existe cependant des « pays » tel le bassin de Rennes où il a fallu utiliser la terre, les quelques pierres « volantes » quartz filonien, dolérite,… étant réservées à la base des murs. Ce n'est que lorsque les moyens de transport se sont développés, vers les années 1920, que la terre a été progressivement mais rapidement abandonnée. » (Le Garrec et al. 1978)

3.4.6.1 Aléas et biais

La teneur en pierres du sol de surface est de toute évidence un gage d'accessibilité immédiate et permanente au matériau pierre pour construire. De même, la profondeur du sol, conjointe à la typologie du matériau du sous-sol, donne une information sur la profondeur à creuser pour ouvrir une carrière de pierre et la qualité du matériau pour la construction en pierre : moins le sol est profond, plus la roche sous-jacente est dure. Ces variables sont également des variables d'intérêt pour les techniques de construction en terre crue :

- la pierrosité de la terre entre directement en jeu dans les étapes de tamisage et dans la mécanique globale du matériau ;

- la profondeur du sol est corrélée à de nombreuses variables de composition *via* les conditions pédogénétiques : par exemple, les sols plus superficiels sont souvent plus grossiers, ce qui influe sur les propriétés du matériau terre.

L'impact de l'accès à la pierre a des effets variables selon les techniques de terre considérées : les techniques massives, notamment compactées (pisé), seraient moins gênées par la présence de pierres car celles-ci s'insèreraient plus aisément dans des gros éléments d'ouvrage que dans des briques (Klein 2011), ou gêneraient dans la mise en œuvre des torchis (CCTC 2018).

L'accessibilité et l'ouvrabilité de la pierre sont donc fortement liées aux variables pédologiques de profondeur et de composition granulométrique et minéralogique. Il sera donc difficile de distinguer la variation d'*occurrence relative* de bâti en terre qui relève de l'influence des propriétés pédologiques directement sur la *facilité de mise en œuvre des techniques de terre* ou indirectement sur la *facilité de mise en œuvre des techniques de pierre.*

On peut conjecturer que ces influences se conjuguent plutôt qu'elles ne s'opposent : la présence de pierres dans la terre facilite la technique de pierre, tandis que, globalement, elle gêne celle de la terre.

Mais les cultures constructives de la construction en pierre sont complexes et mettent en jeu de nombreux mécanismes sociétaux de transformations, d'échanges et de transport du matériau. La proximité de carrières et le contexte économique, impactent la possibilité de s'approvisionner en ce matériau sans forcément de lien avec les données pédologiques.

Il est certain que la facilité d'emploi du matériau pierre est d'importance centrale dans l'intensité relative d'occurrence des techniques de terre. Cependant, la part qui est corrélée aux variables pédologiques reste incertaine.

3.4.7 Ressources énergétiques et systèmes de transports

Les bouleversements techniques de la modernité apportent une complexité dans la lecture des choix techniques historiques. Le bâti que l'on observe aujourd'hui est une superposition de périodes aux caractéristiques d'accès aux ressources très variables. Du fait du déclin de la construction en terre crue au début du 20^{e} siècle, nous faisons ici l'hypothèse que la majorité des édifices que nous voyons

aujourd'hui a été bâtie dans des conditions que l'on peut qualifier de « pré-industrielles ». C'est-à-dire, un contexte de croissance de la disponibilité énergétique et de rationalisation progressive des techniques traditionnelles* (p. ex. pierre de taille, brique cuite) qui rend certaines plus compétitives que d'autres ; mais toutefois sans l'arrivée massive de nouveaux produits industriels (bétons de ciment, acier). Cette hypothèse est limitée car il y a eu de toute évidence des interactions entre terre crue et matériaux industriels au début du 20e siècle, notamment en contexte urbain (Mille 2023). Mais elle simplifie l'analyse en permettant de considérer une « simple » période de croissance de certaines techniques traditionnelles rationalisées face au déclin des techniques vernaculaires.

3.4.7.1 Impact sur les techniques de pierre, terre cuite, chaux, ciment

A l'image de la pierre, la diversité des chaux vernaculaires et de leurs modes de production rend difficile une généralisation de la compétitivité de leur choix par rapport à d'autres matériaux. En revanche, il est certain qu'une étape de cuisson à haute température y était mobilisé, ce qui implique *a minima* un coût énergétique non négligeable.

La disponibilité des ressources énergétiques non métaboliques[37] est croissante à partir du XIXe siècle et autorise un plus grand développement des fours à chaux et à briques cuites :

> « Dans la France métropolitaine de la seconde moitié du XIXème siècle, la brique cuite et la pierre taillée sont considérablement employées au sein du champ de la construction en raison de leur disponibilité et de leur accessibilité croissantes. L'emploi de nouvelles sources d'énergie servant de combustibles comme les houilles et les charbons se substituent[38] au bois et permettent d'augmenter la chaleur des fours nécessaire à la cuisson des briques et à la calcination de certains liants comme par exemple la chaux hydraulique. » (Villain, 2020, p. 75)

Plus tard, de nouvelles sources énergétiques permettent de faciliter la production du ciment, encore plus énergivore :

> « Le développement de l'usage des énergies fossiles comme le pétrole et les gaz naturels contribue à délaisser les houilles et les charbons[39] en tant que combustibles en permettant la calcination de liants plus résistants que la chaux hydraulique, comme par exemple le ciment. » (Villain, 2020, p. 76)

En parallèle, la disponibilité énergétique permet le développement de moyens de transports des matériaux de construction. Le transport permet d'une part, de réduire l'impact de la distance d'accès aux ressources, et d'autre part, de faciliter la centralisation des moyens de production (fours, fabriques) qui permet d'accroître leurs dimensions et leur productivité. Ainsi, le développement des transports permet l'emploi de ressources de moins en moins locales et issues de systèmes techniques de plus en plus complexes (Ford et al., 2005, p. 966).

Mille (2023) détaille l'impact de la croissance énergétique et du développement des réseaux de transport sur les matériaux de construction dans la région Lyonnaise. Jusqu'au XIXe siècle, « les cours d'eau étaient le vecteur privilégié pour la diffusion de matériaux pondéreux, et ce depuis l'antiquité » (Jacob-Rousseau, Rousseau-Jacob, 2014, p. 293, dans Mille, 2023, p. 33), ce qui fait que « seules les ressources exploitées à proximité de cours d'eau navigables étaient facilement exportables » : « la pierre, le bois, la chaux, la brique et la tuile de terre cuite » (La construction Lyonnaise, 1879 dans

37 Externes au corps humain. Voir lexique, énergie métabolique*.
38 Note : en fait, ces nouvelles sources d'énergie s'additionnent dans le mix énergétique global (Fressoz 2024)
39 Idem

Mille, 2023, p. 33). De même, seules les zones desservies par le transport fluvial pouvaient bénéficier de matériaux pondéreux.

Le développement au XIXe siècle du chemin de fer « bouleverse le transport des matériaux pondéreux et leur économie » en créant « une nouvelle cartographie des filières d'approvisionnement. Ainsi, une modeste carrière de pierre, dont l'aire de diffusion était jusqu'à présent demeurée locale, pouvait prendre en quelques années une envergure régionale, voire nationale. » (Mille 2023:36).

Enfin, de manière corrélée à l'abondance énergétique, le capital* technique croît rapidement, ce qui facilite l'emploi de techniques plus complexes, plus mécanisées, qui sont employées à bas coût grâce à la disponibilité énergétique.

La disponibilité énergétique est donc un facteur important de facilité d'accès aux matériaux issus de combustion (chaux, briques cuites), mais également potentiellement à la pierre : les carrières de pierre « sont de plus en plus exploitées à l'aide d'explosifs et les blocs de pierre sont taillés par davantage de capital technique. » (Villain, 2020, p. 75), et le transport est facilité. Malgré tout, on peut penser que ces dynamiques avantagent surtout la pierre de taille, et que dans le cadre de la construction vernaculaire rurale l'emploi de pierre volante ou de carrière de ferme reste économiquement compétitive.

3.4.7.2 Relations avec la terre : distance de transport et mécanisation

Le transport de la terre foisonnée pour l'édification de bâtiments en terre crue est généralement considéré comme n'ayant pas dépassé quelques kilomètres de distance au site de construction (voir 7.1). La terre a pu être extraite sur site ou à proximité immédiate, et dans le cas d'un transport, celui-ci a pu être limité par les moyens énergétiques. On peut penser que dans un système de transport plus intensif, la terre peut être extraite à plus grande distance, ce qui veut dire que l'étendue de la zone d'approvisionnement potentiel est agrandi, donc le choix de la terre élargi. On peut penser que cela ait ainsi permis de choisir les « meilleures terres », et ainsi peut-être optimiser l'aisance de mise en œuvre et sa compétitivité.

Pour les techniques autorisant une préfabrication des éléments comme les adobes, le transport du matériau permet une gestion de la temporalité du procédé. Pour ces techniques, l'ajout d'un potentiel de transport permet également la gestion de l'espace, en déplaçant les lieux de stockage et de fabrication, ainsi que comme pour les briques cuites ou la pierre, une centralisation de la production permettant sa rationalisation* : optimisation de la terre employée et/ou optimisation des postes de travail.

Hormis le transport potentiel des éléments préfabriqués, la mécanisation des procédés de terre crue ne semble pas avoir eu lieu avant son déclin au profit des matériaux industriels (Huitorel 2018). La mise en œuvre reste manuelle, malgré le déploiement dans la première moitié du 20ème siècle de procédés permettant par exemple la construction de granges en bauge aux murs plus étroits (jusqu'à 45cm), des murs pignons plus hauts, et de plus grandes ouvertures (Bardel & Maillard 2009; Hamard 2017:80). L'avènement de matériaux issus de procédés rationalisés n'entraîne pas l'abandon de l'amélioration des techniques préexistantes, qui peuvent coexister longtemps avant d'être éventuellement remplacées (Carnino et al. 2016:11).

L'intensité énergétique et le développement des systèmes techniques n'aura donc pas eu d'impact conséquent sur la facilité de mise en œuvre de la terre crue directement avant son déclin début 20ème, en tout cas pas significativement relativement à l'avantage procuré aux autres matériaux dont la production a pu être rationalisés (pierre, brique cuite). C'est également le cas du transport. Dans le cas des techniques préfabriquées comme les adobes, le déploiement des systèmes de transport a pu avoir un impact positif, au moins relativement aux autres techniques de terre crue, mais cela reste incertain.

3.4.7.3 Relations avec la terre : matériaux secondaires

La présence de contextes constructifs favorables à la pierre ou à la brique cuite n'est pas que défavorable à l'occurrence des techniques de terre crue. L'accès à la brique cuite, comme pour la pierre, procure des avantages dans son association aux techniques de construction en terre crue. Elle permet de réaliser des chaînages, des renforts d'angles, etc., là où la terre présente des points faibles. Notamment, elle s'inscrit fortement dans le patrimoine bâti en brique de terre crue : lorsqu'elles sont de dimensions équivalentes, briques crues et cuites s'accordent aisément dans des appareillages mixtes (Klein 2011).

La chaux est rencontrée dans les ouvrages composés de terre crue. Elle est employée pour la réalisation d'enduits ou de peintures protectrices ou de mortiers entre les briques de terre crue (bien que souvent, ils soient composés d'un mélange terre-sable sans chaux) ou entre les levées de pisé.

Pour la chaux comme pour les briques de terre cuite, leur accessibilité facilite dans l'absolu la mise en œuvre de certaines techniques de terre crue. Mais, comme nous l'avons remarqué pour l'accès à la pierre, il est probable que la présence de ces matériaux soient finalement surtout favorables au déploiement de techniques non composée de terre crue. La chaux est alors employée préférentiellement à la terre comme mortier pour les techniques de pierre, la brique cuite a peut-être remplacé progressivement la brique crue dans les cultures constructives Occitanes et Champenoises, bien qu'elle ait probablement autorisé son maintien plus tardif que les autres techniques dans des systèmes composites. Aussi, l'enduisage de chaux permet de masquer la terre, alors que ce masquage s'inscrit dans l'établissement d'une « pudeur » symbolique dévalorisant le matériau relativement à la pierre dans de nombreux contextes culturels (cf. 3.5.5), et peut participer à la réduction du choix technique de la terre crue.

3.4.7.4 Biais et aléas

L'intensité énergétique du contexte constructif a un impact variable à la fois dans l'espace et dans le temps sur les choix des matériaux de construction.

Avant le 20^{e} siècle et l'arrivée des matériaux industriels (acier, béton de ciment), l'emploi de briques cuites et éventuellement de la pierre est progressivement favorisé par des conditions d'abondance énergétique, impactant probablement négativement l'emploi des autres techniques de construction comme la terre crue par choix préférentiel. On a vu que la culture constructive de la brique cuite pouvait créer un biais relativement aux variables pédologiques par la présence de terres adéquates pour les briquetiers. Cependant, le développement progressif du réseau de transport permet d'envisager une décorrélation proportionnelle des sols du pédopaysage de construction et des sols employés pour les briques transportées: il ne s'agit alors progressivement plus d'un biais mais seulement d'un aléa, sans corrélation avec les variables pédologiques. Au cours du temps, l'intensification énergétique décorrèle les choix techniques et les variables environnementales.

La cuisson et la distribution de la chaux est facilitée en contexte d'abondance énergétique. Celle-ci a pu remplacer progressivement les mortiers de terre dans les maçonneries de pierre, ou dans leur réfection au cours du temps. Il est possible que la présence de chaux ne facilite pas significativement l'emploi de la pierre mais que ce remplacement soit réalisé par préférence symbolique d'un matériau « noble » pour maçonner les pierres (voir 3.5.5).

La présence de chaux a pu en revanche réduire l'emploi de la terre crue en tant qu'enduit, remplacée par des enduits chaux-terre ou chaux-sable.

On pourrait penser que la ressource calcaire favorise l'emploi de la chaux. Cependant, le matériau était relativement léger car il était mélangé avec les ressources locales (terre ou sable): l'impact de la

proximité des fours à chaux est probablement peu significatif. Seulement, à l'échelle régionale, des régions où les roches calcaires sont rares (Bretagne) contrastent peut-être avec d'autres où elles sont plus abondantes (Champagne).

Ainsi, l'impact de la chaux sur les choix technique est, comme pour la brique cuite, variable dans le temps mais probablement peu dans l'espace. Un aléa de choix technique s'ajoute alors à la corrélation terre-technique, croissant dans le temps. Si pour la brique cuite, la proximité de la ressource agit sur le choix technique et ajoute potentiellement un biais dans la corrélation avant l'avènement de transports de grande envergure, pour la chaux, il n'y a probablement pas de biais significatif selon les données pédologiques, du moins à l'échelle intra-régionale.

Finalement, il est difficile de savoir si l'intensité énergétique augmenterait un biais lié aux besoins de sols spécifiques pour la brique cuite, la pierre, ou la brique crue, par développement de leurs potentiels techniques relativement aux autres techniques, ou réduirait ce biais par décorrélation des sols locaux via l'augmentation des distances de transport. Mais il est certain que les aléas dans les choix techniques vont croissants avec la délocalisation des matériaux employés : la corrélation entre l'environnement immédiat et le choix technique disparaît progressivement.

3.4.8 Analyse : matériaux et matériels

Le potentiel « technique » de chaque technique de construction est impacté par son écosystème matériel, c'est à dire les « ressources » à disposition : matériaux bruts de l'environnement (terre, pierre, bois) et les outils et systèmes de l'écosystème social. C'est le cas pour les techniques de construction en terre crue, comme pour les autres techniques employées dans la construction urbaine et rurale. Le choix d'une technique de construction se fait en considérant l'implication de ces facteurs sur le procédé ; mais également en considérant les procédés concurrents. Un facteur positif pour une technique peut l'être encore plus pour une concurrente, et ainsi être finalement défavorable à la première si l'on considère un choix *relatif*.

Le Tableau 5 résume l'influence des facteurs étudiés sur les différentes techniques de construction. Les facteurs influençant directement la facilité de mise en œuvre des techniques de terre crue sont surlignés en gris : ce sont effectivement ces paramètres que nous cherchons à observer dans la corrélation sol-technique. Dans cette optique, le reste des facteurs peut être interprété comme des « biais » influençant la relation sol-choix technique sans être liés directement à la facilité de mise en œuvre de la terre.

Tableau 5 : facteurs d'influence « environnementaux » théoriques sur le choix des techniques de construction vernaculaire. +/-: le facteur est favorable/défavorable à la technique. En gris : facteurs d'influence direct du matériau sur la facilité de mise en œuvre de la terre. Le reste des facteurs peuvent être interprétés comme des « biais » au regard de cette relation.

Facteur	Variables pédologiques avantagées	Pisé	Bauge	Adobe	Pan de bois + terre	Pierre	Brique cuite/ chaux
Composition du sol	Minéraux argileux, calciques	-		+			+
Intempéries : état hydrique et durabilité	Rétention d'eau, pédogenèse : sols fins	--	++		-	+	+
Couvert forestier : matériau et énergie	Sols grossiers, peu profonds				++		+
Fibres		Pas de biais					
eau		Pas de biais					
Pierre	Sols grossiers, peu profonds					+++	-
Capital* technique	Réduction ou exagération des biais déjà existants			+/-		+/-	±

3.5 Cultures constructives

> « Le concept de culture constructive embrasse la dimension sociale et technique de l'acte de construire et du processus d'élaboration des savoirs et savoir-faire qui lui sont inhérents, reflétant intrinsèquement la multiplicité des sociétés humaines et leur enracinement indissoluble au territoire qu'elles habitent. » (Caimi 2014:4)

Dans un même lieu, parfois dans une même rue, et souvent dans une même période, se superposent plusieurs techniques-types de construction en terre et/ou en d'autres matériaux (Contexte, 2.3.5). En Isère, Chancel (2007, dans Goizauskas 2020) identifie une succession de techniques dans le temps pour différentes techniques : les hourdis de terre des pans de bois sont remplacés par de la maçonnerie de pierre, ou des techniques de terre coffrée ; en l'espace de quelques dizaines d'années le pisé remplace le pan de bois dans les nouvelles constructions dans certains secteurs.

Or, il semble que si l'on ne considère que l'environnement « naturel », aucune variable ne varie à l'échelle d'une même rue de village. Cela indique que le déterminisme matériel sur l'installation et les choix techniques des populations n'est pas suffisant pour comprendre les choix techniques (Chazelles & Klein 2003). D'autres influences souvent qualifiées de socio-économiques (Calame, 1987 dans Goizauskas 2020) ou socio-historiques (Goizauskas 2020) guident les choix techniques. On les appellera les *cultures constructives* (Caimi 2014).

Les facteurs d'influence de la culture constructive sont nombreux : les besoins techniques, représentations*, coût économique, contraintes administratives (Fabbri et al. 2022:4); ou encore « les traditions, les croyances religieuses, les technologies disponibles, l'organisation sociale, les pratiques agricoles » (Hueto-Escobar et al. 2022).

Elle nécessite probablement également une adéquation avec les besoins/envies locales des constructeur.ices et habitant.es, influencées par les conditions environnementales comme suggéré par (Mileto et al. 2019) (besoins d'isolation, de résistance aux éléments, etc.) mais également par des facteurs socio-politiques qu'on peut considérer comme indépendant de l'environnement, comme la

présence d'influences réglementaires ou les représentations* du matériau qui ont pu varier dans le temps et l'espace. Il y aura donc beaucoup d'*aléa* potentiel apporté par les paramètres de cette catégorie, mais également potentiellement des *biais* par corrélation indirecte avec les propriétés du sol ou la pédogenèse. A notre connaissance, aucune des études précitées n'a intégré de paramètres liés à cette culture constructive dans leurs modélisations, et ils ont été peu considérés dans les commentaires des résultats des corrélations entre variables environnementales et choix techniques.

Pour l'écosystème matériel, on a vu qu'il n'y a pas de rupture nette entre ressources « naturelles » et les systèmes techniques des sociétés humaines. De même, ici nous avons séparés les systèmes matériels et techniques des « cultures constructives », mais bien évidemment les schémas culturels, techniques et des biotopes s'entremêlent et s'influencent.

3.5.1 Diffusion

De toute évidence, le développement d'une techniques nécessite au moins sa connaissance dans les savoirs vernaculaires locaux, qui dépend de la *diffusion* du savoir-faire.

Avant la période industrielle, les savoir-faire des techniques de construction vernaculaires se transmettaient principalement par voie orale (Hamard 2017). L'apparition « spontanée » des savoir-faire est à considérer pour certaines techniques (torchis, bauge ou briques modelées) lorsque l'on considère le patrimoine très ancien (Hubert Guillaud et al. 2008:18). Pour les bâtiments considérés dans cette étude, pour la plupart postérieurs au 15^{e} siècle, et pour les techniques d'adobes et de pisé, c'est par diffusion que la présence du savoir-faire évolue dans l'espace.

Huitorel (2018) indique que le développement et la diffusion des techniques constructives vernaculaires a pu être favorisé par les « nombreux traités et les revues spécialisées » au cours du XIXe siècle, parfois au sein de « véritables projets politiques ». Mais la diffusion de l'architecture passait également par d'autres biais, car ces recommandations ont pu souvent rester « cantonnées à la sphère bourgeoise ». Au contraire, les visites de bâtiments, qu'elles soient « motivées par les grands propriétaires » ou spontanées, liées à l'activité quotidienne, ainsi que le « partage de connaissances entre les fermiers et les ouvriers » sur les chantiers sont autant d'expériences collectives de terrain qui entraînent « la transposition et l'adaptation de techniques de fermes en fermes ». La présence d'artisan.es formé.es est indispensable à l'usage et la transmission de savoir-faire: les tentatives de déploiement du pisé Lyonnais en région Toulousaine n'ont fonctionné que lorsque des praticien.nes formé.es s'y sont effectivement déplacés pour bâtir et transmettre (Nègre 2003).

Il explique également que la diffusion des techniques de construction impliquant la terre crue a pu se faire de manière privilégiée du rural vers l'urbain, la campagne étant « fertile aux expérimentations constructives » (Huitorel 2018:313).

Sur un territoire ne peut subsister un nombre illimité de techniques, même si l'environnement y est favorable. Une uniformisation des techniques choisies peut être poussée par la spécialisation du capital* matériel. Marcom («Marcom» 2022) le suggère comme une explication possible de l'intensité d'emploi de la technique du damier dans certaines zones Occitanes () : « sur un territoire, la pratique d'une technique peut forcer à l'uniformisation : chaque chantier nécessite plusieurs stocks de briques de provenance différentes, et si les briques sont différentes, elles ne sont pas compatibles ». D'où une uniformisation des dimensions des briques entre producteur.ices. Par ailleurs, transmis par la pratique, le capital savoir-faire demande une quantité minimale d'ouvrages bâtis pour être entretenu. Une technique peu employée peut disparaître rapidement, à l'image d'une langue peu pratiquée. Il existe donc des effets de seuils d'intensité de production en deçà desquels les techniques périclitent.

3.5.1.1 Aléas et biais

Nous ne voyons pas de raisons pour lesquelles la diffusion des techniques serait corrélée aux variables pédologiques, il n'y a donc probablement pas de biais conséquent apporté par cette variable.

Mais elle impacte forcément le *choix technique* : en l'absence de connaissance technique, la technique n'est certainement pas employée même avec des terres convenables à disposition. Des aléas conséquents peuvent impacter les corrélations si l'on étudie des zones où la technique n'est pas connue : la densité relative de bâtiments en terre y serait moins grande malgré une convenance des terres potentielles. Cela impacte les zones pédologiques indépendamment de leur composition, donc ne crée pas de biais, mais peut réduire localement la convenance de manière aléatoire. Pour réduire ces aléas, il faudrait évaluer des zones spatio-temporelles où l'on a la certitude que la technique étudiée a été connue, ce qui est difficile sans connaissance précise de l'histoire locale. On pourra cependant limiter l'étude aux zones spatiales à proximité des bâtiments existants, ce qui garantira que la technique a été connue au moins à un moment de l'histoire locale et évitera de considérer de grandes zones spatiales hors champ de connaissance des techniques de terre (5.3.3.1).

3.5.2 Coutumes et rythmes saisonniers de subsistance

Parmi les usages locaux, les travaux de subsistance alimentaire ont une place centrale dans l'organisation sociale. Braudel (2014, dans Villain 2020, p.63) considère qu'ils rythment les saisons et gouvernent l'espace. Si la subsistance est prioritaire à l'aménagement de nouveaux espaces, alors la saisonnalité agricole gouverne l'espace-temps disponible pour construire les édifices :

> «La maison de terre du pays de Rennes est construite en partie par le paysan. Le chantier doit donc s'adapter aux impératifs de l'exploitation et se dérouler dans les moments laissés libres par les travaux agricoles.» (Bardel & Maillard 2009)

Dans l'édification du bâtiment composé de pisé Lyonnais en Ille-et-Vilaine au 19ème siècle, le chantier est retardé d'une part par la teneur en eau du sol qui tarde à être suffisamment basse pour la mise en œuvre (3.4.1), mais également parce que ce retard induit que les fermièr.es alentours, « qui constituent normalement la main d'œuvre nécessaire aux maçons pour réaliser la construction », sont alors « pris par les moissons » (David et al. 2020).

Se conjuguant aux contraintes « matérielles » saisonnières, comme la teneur en eau du sol ou le séchage des éléments bâtis en terre, les rythmes agricoles saisonniers délimitent les temporalités disponibles pour l'effort de construction. Ils participent à la sélection des techniques adaptées à ces rythmes, lorsque la gestion globale relève d'une rationalité paysanne*.

Dans le Gers, une habitante d'une ferme composée de pisé, adobes et damier, nous a raconté la fabrication des adobes qu'elle a pu observer enfant dans la fabrication de la maison familiale en 1920. Ils étaient moulés au sol l'été, « après la moisson ». Une fois secs, les adobes pouvaient être stockés en vue d'un futur chantier. Mais souvent, une ferme voisine pouvait demander à employer les adobes stockés, ainsi qu'aux autres fermes voisines, pour l'édification d'un bâtiment. En retour, cette ferme produirait également des adobes qui alimenteraient les chantiers voisins. De ces « arrangements entre voisins » naît une véritable monnaie parallèle dans le travail de l'adobe :

- leur production peut profiter de n'importe quel surplus de main d'œuvre (hors période hivernale),

- ce travail peut être épargné en stockant les adobes et ne perd pas de valeur

- il sert de capital* immédiatement disponible pour des projets urgents alentours, pouvant alors recourir à l'emprunt dans l'emploi des adobes des fermes voisines et rembourser l'emprunt a posteriori par la production de briques.

Cet exemple montre la versatilité de la technique de l'adobe, qui devient un objet dont la valeur dépasse son usage comme simple élément d'ouvrage : il s'agit ici d'une monnaie d'échange qui semble déconnectée des flux monétaires globaux et assure ainsi que toute la valeur produite reste sur le territoire. Ce regard « comptable » donne peut-être des finalités excessives à des échanges relativement spontanés et peu calculés, mais nous penons qu'il est intéressant de le relever dans le contexte contemporain de recherche de relocalisation des économies. L'échange des adobes montre également comment une technique de construction peut *façonner* les sociétés. L'impact d'un choix technique ne s'arrête pas à la productivité matérielle directe qu'il entraîne : la technique façonne les humain.es lorsque ceux-ci l'emploient (Illich 1973; Ellul 1988; Carnino et al. 2016).

Les choix techniques dépendent ainsi des usages et coutumes, mais les façonnent en retour. C'est un processus d'essais permanents où c'est lorsque des techniques permettent des améliorations des conditions individuelles et collectives significatives, potentiellement inattendues, qu'elles finissent par être adoptées plus largement.

3.5.2.1 Aléa biais

Lorsque l'organisation générale de la subsistance locale est favorable à son inclusion, une technique a bien plus de chance de se déployer. Les usages agricoles sont très liés à leur environnement, et pourraient présenter des corrélations avec les sols locaux. Cependant, on fera l'hypothèse que ces corrélations sont très diverses et variables et qu'à l'échelle d'une région ou d'un « pays » il s'agisse essentiellement d'aléas.

3.5.3 Performances techniques d'usage

Aujourd'hui comme hier, les bâtiments dont l'objectif est d'être habité par des humain.es répondent à des besoins spécifiques aux contextes. L'adéquation entre les besoins de propriétés finales des matériaux et la possibilité d'une technique à y répondre est sa *performance technique d'usage*. Les propriétés finales *techniques* relèvent d'une catégorie regroupant ce qui concerne la mécanique et l'hygrothermie des matériaux à partir de l'étape d'habitation du bâtiment : résistances mécaniques, thermiques, etc. Les besoins changent selon les conditions climatiques et surtout culturelles: ce qui relève des besoins ou de la désirabilité est forcément subjectif. Dans un même espace-temps culturel, les besoins changent selon l'usage du lieu : habitation de résidence, ateliers, annexes agricoles, etc.

3.5.3.1 Contraintes mécaniques

La terre crue, même porteuse, est employée dans une grande diversité de situations architecturales : « dans les petits édifices (habitations, greniers) et dans les architectures monumentales (enceintes) » (Sénépart et al. 2015, dans Goizauskas 2020). Mais dans certains contextes, ses propriétés techniques peuvent être moins adaptées que d'autres matériaux. Le milieu urbain, plus densément peuplé et bâti, implique l'optimisation de la surface habitable et de l'usage de l'espace au sol sur des parcelles de taille réduite (Villain 2020:49). De manière générale, les bâtiments sont plus hauts, permettant un gain de surface habitable dans les étages ; les murs sont les plus étroits possibles pour réduire la perte d'espace qu'ils occasionnent ; les façades sont plus souvent des murs pignons, plus hauts que des murs gouttereaux; les façades sont percées de plus grandes et plus nombreuses ouvertures car les activités intérieures sont plus fréquentes qu'en contexte rural et un certain confort intérieur est recherché par la bourgeoisie. Tout cela entraîne des performances mécaniques nécessaires supérieures à celles des maisons de plein pied des fermes rurales.

Les techniques de pan de bois, comblées de hourdis de terre ou d'autres matériaux, sont particulièrement adaptés à ces contraintes. Leurs performance mécanique sont essentiellement celles de l'ouvrage de charpente des pans de bois et de ce fait permettent des performances considérables : « les pans de bois peuvent résister aux effets du vent ou même à des séismes, là où des maçonneries s'écrouleraient » (Chancel, 2007 : 99-103) dans (Goizauskas 2020).

Surtout, la faible épaisseur des murs que ces techniques permettent et les surplombs que les pans de bois permettent sur l'espace public (encorbellements) permettent des gains de densité habitable conséquents (Chancel, 2007 : 99-103 dans (Goizauskas 2020) (Vérité 1984; Villain 2020; Hueto-Escobar et al. 2022), ce qui fait probablement du pan de bois LA technique de construction permettant la plus grande densité bâtie en ville parmi les techniques courantes des temps pré-industriels.

Les techniques d'adobes ont aussi de bonnes performances, leur forte résistance et leur format maçonné permettent la réalisation de parois relativement étroites.

Si la densité urbaine peut apporter des contraintes mécaniques, il faut cependant envisager que la plupart des bâtiments ruraux vernaculaires puisse être structurellement dimensionnés en s'adaptant à la technique choisie, elle-même choisie pour d'autres raisons (p. ex. aisance de mise en œuvre). De récents essais sur des briques de terre crue Champenoises (Aras-gaudry 2025) montrent une absence manifeste de corrélation entre la résistance mécanique des éléments et leur usage dans le bâti (porteur* ou remplissage). Les éléments sont façonnés avec les savoir-faire locaux et sont probablement la plupart du temps bien plus résistants que nécessaire. Si la résistance des éléments est limitante, si besoin est, c'est probablement l'architecture qui s'adapte aux performance des éléments. Ce n'est put-être qu'en dernière instance et dans des conditions extrêmes que le choix de la technique/du matériau peut être gouverné par des besoins de performances mécaniques.

3.5.3.2 Contraintes de modularité

A ces contraintes mécaniques s'ajoutent celles de la plasticité requise des habitations urbaines. En effet, l'évolution des fermes rurales conduit généralement à une extension horizontale des bâtiments, en rajoutant progressivement des dépendances, tandis que l'espace urbain contraint à une extension verticale, par exemple en ajoutant des étages. Cela suppose une certaine adaptabilité de la structure à des remaniements et des variations de contraintes. La structure des bâtiments composés de bauge dépendant intimement de celle de la charpente, engagée dans les murs, sa modification pouvait engendrer une instabilité de l'ouvrage (Villain 2020:48).

Au contraire, les techniques de pan de bois permettent le percement rapide d'ouvertures ou leur comblement. Légères, elles permettent également de construire sur d'autres structures de maçonneries sans que celles-ci nécessitent de surdimensionnement. On observe souvent que les étages supérieurs des grands bâtiments composés de terre porteuse sont réalisés en pans de bois.

3.5.4 Performances techniques de mise en œuvre

3.5.4.1 Intensité de travail

L'occurrence du patrimoine bâti en terre dépend certainement de la facilité de mise en oeuvre de la technique considérée, comprenant l'ensemble des étapes du cycle de vie de transformation du matériau. Pour la terre comme pour les autres matériaux, cette facilité dépend de sa transformation avant mise en œuvre, de son transport et de sa mise en œuvre sur le chantier (Streiff & Lahure 2003, dans (Goizauskas 2020), (Marfaing et al. 2000)).

Lorsque c'est aux habitant.es que le coût du travail revient, par exemple lorsque les habitant.es construisent elle.eux-mêmes leurs maisons ou que la rémunération des constructeur.ices équivaut à

une unité semblable de leur propre travail dans le cadre d'« économies de village », la technique de mise en œuvre choisie dépend fortement de la facilité de mise en œuvre. Choisir une technique peu favorable à la mise en œuvre à l'une des étapes du cycle de vie est un « luxe » : cela peut arriver sous l'influence d'un imaginaire individuel ou collectif favorisant une technique, mais dans l'ensemble, les matériaux de luxe sont accessibles essentiellement à celles et ceux qui ne « payent » pas le vrai coût du travail par leur propre labeur.

La facilité de mise en œuvre intègre toutes les considérations de l'écosystème matériel (3.4) et les contraintes particulières de l'organisation du chantier.

Les étapes nécessitant du travail de fabrication pour les techniques présentées jusqu'alors sont :

- terre « massive » (pisé, bauge) : extraction, (transport), (préparation), façonnage

- terre « préfabriquée » (adobes) : extraction, (transport), préparation, façonnage, (transport), pose

- pan de bois : gestion forestière, découpe du bois, transport, pose de charpente, garniture (une des autres techniques)

- pierre: extraction, (taille), (transport), pose

- brique cuite : extraction, (transport), préparation, façonnage, cuisson (+collecte de la ressource énergétique), (transport), pose

Chacune des étapes ajoute du temps de travail et, selon les techniques et le contexte, les étapes sont plus ou moins conséquentes. Il n'est donc pas possible de classer les techniques selon leur aisance technique indépendamment du contexte. Cependant, dans un contexte théorique où (1) toutes les étapes de transport sont nulles, les ressources étant disponibles à proximité ; (2) il n'y a pas de centralisation de la production ; (3) l'étendue temporelle et spatiale du chantier n'est pas limitante, (4) les performances mécaniques sont les mêmes pour les techniques de maçonnerie et supérieures pour le pan de bois ; on peut suggérer que :

- la pierre locale brute, la bauge et le pisé locaux, sont probablement les mises en œuvre les plus directes et donc plus économes. Nègre (2003) rapporte que le paillebart (dénomination locale d'une technique-type de bauge) était « trente fois moins cher que la maçonnerie de brique [cuite] » en région Toulousaine au XIXe siècle.

- la préfabrication ajoute du temps de travail au façonnage et à la pose. L'adobe est donc moins efficiente que son homologue massif, la bauge.

- la brique cuite est probablement la plus dispendieuse des techniques, faisant intervenir une étape de cuisson en plus de la préfabrication.

- le pan de bois rajoute un travail du bois, mais réduit le volume de maçonnerie nécessaire, ce qui s'équilibre peut-être. Sa catégorie de temps de travail nécessaire dépend donc probablement de ce qui compose sa garniture.

3.5.4.2 Intensité de l'espace-temps disponible : contraintes d'organisation du chantier

L'organisation des étapes de fabrication du bâtiment est tributaire de l'espace-temps disponible pour l'établissement du chantier. Tout d'abord, un espace restreint peut réduire « la probabilité de se procurer la terre suffisante sur le site du chantier, c'est-à-dire à pied d'œuvre, et ainsi éviter le transport du matériau. » (Villain 2020:51). Les étapes de préparation de la terre supposent aussi un espace

dédié : surface pour étaler le mélange de bauge ou de torchis («Bosi» 2022), surface de séchage pour les éléments préfabriqués.

L'espace temporel peut également être contraint. En contexte urbain notamment, les délais de construction admis sont plus courts, ne laissant pas l'opportunité d'interrompre le chantier pendant l'hiver ; le temps d'attente entre le séchage des levées est plus problématique et peut être d'autant plus long en cas de mur mitoyen, auquel il peut par la même occasion engendrer des désagréments liés à l'humidité (Villain 2020:51). Pour les techniques de torchis, pisé d'adobes, la durée du chantier n'est pas ou peu conditionnée par le séchage des éléments. L'étendue du chantier sur site peut également être réduite par la préfabrication hors site dans le cas des élément maçonnés (briques crues et cuites, pierre, bois), entraînant cependant un transport des matériaux.

Les contextes constructifs *intensifs**, imposant de fortes cadences ou contraignant l'espace, réduisent les marges de manœuvre des constructeur.ices. Ils forcent ainsi le choix de techniques dont le travail de mise en œuvre ou on aisance ne serait pas celui choisi en contexte *extensif**. Des constructeur.ices contemporain.es témoignent de l'impact des cadences imposées sur les chantiers : par exemple, un chantier initialement prévu en bauge traditionnelle est finalement mise en œuvre semi-compactée pour réduire les délais de séchage («Dugelay» 2022a) : le chantier devient pénible et le travail nécessaire est démultiplié, combinant les deux étapes énergivores de la bauge et du pisé : le mélange, plus pénible à l'état ferme pour la bauge, et la compaction au pisoir.

Ces contraintes techniques expliquent en partie la quasi absence de la bauge en milieu urbain (Villain 2020). Dans le Bas Quercy, la terre massive est absente des zones urbaines alors qu'elle est courante autour des villes (Marfaing et al. 2000). Quelques vestiges médiévaux sont cependant identifiés dans certaines unités urbaines dans le Tarn-Et-Garonne (Marfaing et al. 2000).

Les techniques de torchis et d'éléments préfabriqués se prêtent volontiers au contexte urbain intensif en temps et en espace. Le pisé a une position intermédiaire. Il compose par exemple une grande partie des bâtiments de l'espace urbain Lyonnais, mais Mille (2023) relève que la construction en pisé s'est essentiellement déployée dans la périphérie urbaine, comme « matériau pionnier ». L'accès à la terre et sa gestion sur le chantier nécessite de l'espace et du temps, compatible uniquement en contexte extensif*. Pourtant, ses bonnes performances mécaniques, son séchage peu limitant, bien plus rapide que celui de la bauge, lui permettent peut-être de rester compétitive, mais ce sont surtout des « dispositions particulières de relations entre la ville et la campagne Lyonnaise » qui ont permis son développement relatif au XIXe siècle dans les faubourgs urbains (Mille 2023).

3.5.4.3 Le coût : une question de position sociale

La facilité de mise en œuvre gouverne le « coût » du choix technique, plus ou moins fortement selon l'intensité des variations apportés par l'économie de marché et les systèmes de régulation collectifs : taxes, rémunération du capital*, etc. (Berlan 2021). Mais, dans une économie monétaire où les capitaux et rémunérations ne sont pas égaux, le coût du travail ouvrier n'est pas le même pour tout le monde : les plus aisé.es ont une plus grande liberté dans l'emploi de techniques « coûteuses » donc complexes à mettre en œuvre.

La « richesse de l'économie locale » influence négativement l'occurrence du patrimoine bâti en terre crue (Streiff & Lahure 2003, dans (Goizauskas 2020)) : leur domination économique assure leur capacité à *faire faire* pour peu d'efforts propres, et rend plus « flexible » le choix de la technique de construction. Cela permet aux possédants locaux de s'extraire d'une forte rationalité paysanne* et de choisir des techniques relevant du « luxe ».

Il y a donc une différente entre le coût et l'accessibilité économique : la bauge a été l'une des techniques les moins « chères » en Ille-et-Vilaine (35) avant le 20e siècle dû à l'économie de moyens qu'elle permettait, et *donc* accessible à la plus grande partie de la population (Hamard 2017). Tandis que sur un territoire où la pierre est peu accessible, les techniques de construction en pierre sont coûteuse pour tout le monde, mais néanmoins accessible aux plus aisé.es.

Une fois les variables d'aisance de mise en œuvre relative des différentes techniques de construction connues considérées, ce n'est donc pas vraiment le coût lui même qui est une variable influençant les choix techniques relatifs, mais la position sociale des commanditaires locaux. Or, ici encore, la localisation urbaine est de grande influence car elle est corrélée avec cette position sociale favorable : dans les villes, la bourgeoisie peut se permettre des « extravagances techniques ».

C'est ainsi que dans le contexte urbain, le choix du matériau de construction « paraît étroitement lié au statut social de l'habitant : la pierre pour la classe dominante laïque ou religieuse, le pan de bois pour les bourgeois aisés, principalement commerçants semble-t-il et la brique crue pour une population urbaine pauvre exerçant sans doute de 'petits métiers'. » (Letterlé & Fizellier-Sauget 2011 : 367, dans Goizauskas 2020)

On peut considérer que la position sociale moyenne des habitant.es et la domination économique n'ont pas d'influence seuls sur le choix technique, mais seulement lorsque certaines techniques « de luxe » sont préférées à d'autre. Aussi, le contexte de domination économique exacerbe l'influence de la désirabilité des techniques.

3.5.5 Désirabilité, incitation symbolique

L'accessibilité économique limite le choix technique à un panel variable selon la classe sociale des habitant.es. De ce fait, elle devient un marqueur d'appartenance à une classe sociale et cette « extravagance technique » est mobilisée de manière démonstrative par les classes aisées et donc subie par les classes ouvrières et paysannes, plus *contraintes* à employer le matériau terre (Hamard 2017).

Si le coût est gouverné par la facilité de mise en œuvre, alors ce facteur crée finalement une probable corrélation inverse entre efficacité technique de mise en œuvre et choix technique : plus la technique est luxueuse, plus elle assure une distinction de classe au sein de l'espace social. Le matériau de construction, avec le procédé de construction qui l'accompagne, peut donc être utilisé « entre autres choses, comme un instrument pour participer à la construction d'une domination symbolique d'un groupe social » (Villain 2020:49).

De manière directement liée ou non au coût des matériaux, l'imaginaire social peut projeter sur ceux-ci de fausses représentations*. Ainsi, le matériau terre, identifié au « matériau du pauvre », a souvent été jugé comme fragile ou malsain (Hamard 2017), alors même que ces propriétés d'usages techniques n'étaient aucunement limitantes dans la plupart des contextes constructifs extensifs*. C'est ainsi que le matériau terre devient ou non désirable, au-delà de la rationalité paysanne.

La pierre est souvent préférée à la terre lorsque le choix est possible : « dans les territoires où la pierre est rare, son utilisation est principalement réservée pour les ouvrages investis d'un certain pouvoir symbolique, souvent corrélé à une certaine hauteur de l'ouvrage, comme par exemple pour bâtir des édifices religieux » (Villain 2020). Dans les cas d'ouvrages prestigieux, il s'agit souvent de pierre de taille. Dans le marais Vendéen, Le Boeuf (2006:11) commente le remplacement progressif, « par paliers », de la « maison éphémère » de terre par la « maison de pierre », en passant par le camouflage par enduisage : « dans un premier temps [...] un badigeon de chaux permettant de camoufler la réalité du matériau », parfois même, «pour des raisons économiques », le badigeon se limitait « au seul

encadrement des baies ». La préoccupation est certes pratique, pour la protection du mur de terre, « mais également d'ordre esthétique », comme une première étape vers l'image d'une maison de pierre (Le Bœuf 2006).

Dans le Bas Quercy, la disponibilité de multiples matériaux fait que les constructeur.ices les emploient dans une hiérarchie qui peut représenter leur désirabilité : à l'extérieur, le gros œuvre est préférablement réalisé en moellons de calcaire mais les adobes viennent compléter le haut des façades ; tandis qu'à l'intérieur les cloisons sont réalisées en torchis (Marfaing et al. 2000).

Au tournant du XXe siècle, la bauge a pu être dévalorisée relativement au pisé, considérée plus fragile (Huitorel 2018:274).

Cependant, dans une étude bibliographique sur la perception du matériau terre dans l'histoire récente, (Goizauskas 2020) montre que si la terre a dans la plupart des contextes été considérée comme le « matériau du pauvre », cette perception n'est pas universelle car on retrouve de nombreux exemples de maisons bourgeoises dont les éléments composés de terre crue ne sont pas masqués ou semblent même mis en avant. Le pan de bois est un bon exemple : cette technique est rationnellement efficiente pour l'espace urbain, mais elle a pu également être valorisée dans certains espaces sociaux : « Malgré le prestige de la pierre, il existe au Moyen-Âge une mode du bois. » (Chancel, 2007 : 99-103 dans (Goizauskas 2020).

La technique du damier (Contexte, 2.3.2.3), mettant en œuvre en alternance des briques de terre crue avec un remplissage en galets, est un autre exemple de choix technique où les critères de performance technique expliquent difficilement son choix préférentiel. Quel intérêt du damier face à un appareillage de briques crues ? L'intérêt technique ne fait pas consensus, mais « l'effet ornemental, lui, est évident » (Marfaing et al. 2000). Cette technique est notamment employée dans des édifices relativement prestigieux (Aubert et al. 2015).

Le pan de bois a fait l'objet d'une valorisation esthétique spécifique en France hexagonale. Des spécificités d'origine technique, comme la croix de St André, sont utilisées au-delà du nécessaire comme valeurs de représentations*, uniquement en contexte urbain. En Espagne, l'occurrence de ce style d'architecture est d'ailleurs attribué à une influence Européenne, car dans les régions plus éloignées de l'Europe, la croix de St André se limite aux besoins techniques des édifices (Hueto-Escobar et al. 2022).

Mais encore une fois, ce n'est pas vrai dans tous les contextes : dans la Bresse à la fin du 18^{e} siècle, des écrits témoignent de la préférence des techniques de pisé aux techniques de torchis (Chancel, 2007 dans (Goizauskas 2020)) ; tandis que dans l'époque moderne on a pu voir une dévalorisation du torchis au profit des constructions en adobes (Chazelles-Gazzal et Poupet 1984 dans (Goizauskas 2020)).

Parfois même, il n'y a même pas de distinction décelable par le matériau directement. Dans certains cas, cette absence de distinction par le matériau est probablement liée à l'absence d'autres matériaux de construction, et c'est au sein même des techniques que s'applique la distinction : « de plus grandes dimensions, des finitions plus soignées, une ornementation abondante, des emprunts à des cultures prestigieuses, etc. » (Chazelle et al. dans (Goizauskas 2020)). Dans d'autres, rien de matériel n'explique cette absence de distinction (Goizauskas 2020). Ainsi, « Il ne s'agit donc pas de nier l'intérêt socio-économique (« mise en oeuvre rapide et économique ») qu'il peut y avoir à sélectionner la terre comme matière à bâtir mais de suggérer que cela peut aussi relever d'un « choix culturel », associé à une éventuelle tradition constructive. » (Goizauskas 2020)

Dans l'ensemble, il est quand même probable que l'usage de la terre comme matériau soit moins désiré par la bourgeoisie, et de ce fait qu'elle soit moins employée en contexte urbain que les matériaux « nobles » comme la pierre de taille.

3.5.5.1 Aléa et biais

La désirabilité du matériau est probablement très influente sur le choix technique. Son lien potentiel avec les variables pédologiques est assez improbable, bien qu'on puisse se demander si la forte valeur agricole de certains sols pourraient favoriser la richesse des exploitants et leur éloignement de la rationalité paysanne, par exemple en privilégiant la brique cuite à la crue.

Peut-être également pourrait-on trouver une désirabilité plus grande des techniques de terre crue pour de « belles » terres, comme on peut l'observer aujourd'hui sur les chantiers modernes où les artisan.es apprécient les couleurs rouges ou les terres claires, pour mettre en valeur le matériau ou la luminosité. Ou au contraire, dans le désir de masquer son emploi, d'utiliser des terres de couleur plus discrète… On voit que ces appréciations sont très variables selon les contextes, ainsi, on les considérera comme décorrélées des variables pédologiques.

L'ensemble des variables de désirabilité apportent cependant un aléa dans la corrélation entre sol et choix technique et réduisent son acuité.

3.5.6 Incitations légales et administratives

La désirabilité des techniques constructives peut être très influente et devenir une norme « de fait », où il est attendu de chacun.e de construire selon les usages coutumiers ou à l'image de sa classe sociale. Il en va de même pour les critères techniques, restreignant l'usage des matériaux à leur optimums respectifs. Cependant, l'organisation sociale et politique procure des instruments d'influence institutionnelle *organisée* sur les choix techniques.

Après l'incendie de Rennes en 1720, « les puissants charpentiers rennais imposent le bois dans la reconstruction, derrière des façades de pierre, et la pénurie se fait sentir » (Bardel & Maillard 2009:26): le torchis et le pan de bois disparaissent progressivement des campagnes, favorisant l'émergence de la bauge. Dans ce cas, les conditions de construction en bauge n'auraient pas évolué, mais celles de la construction en torchis se seraient dégradées par complexification de l'accès à la ressource en bois, jusqu'à devenir moins favorable économiquement. Cette contrainte organisée est liée à un cadre réglementaire imposé par l'ordre des charpentiers de l'époque. Pour aller plus loin sur l'émergence de la bauge en Bretagne et la disponibilité du bois, voir (Villain 2020:41).

Autre exemple, Villain (2020) rappelle que dans l'espace urbain, l'utilisation de la pierre « varie selon la situation géographique dans le territoire métropolitain, à savoir s'il est plus ou moins proche des frontières interétatiques ». Dans les espaces urbains proches des frontières interétatiques, « la disponibilité et l'accessibilité des pierres sont réservées à la politique régalienne » (par exemple : construction de fortifications). S'ensuit une moindre disponibilité de la pierre pour les ouvrages civils, favorisant potentiellement l'emploi de terre crue.

Même lorsque les matériaux sont disponibles, leur accessibilité peut être limitée par la communauté villageoise ou le seigneur : « Dans un village, écrit Fernand Braudel, une maison ne se construit, ne se répare qu'avec l'autorisation de la communauté ou de l'autorité seigneuriale qui commande l'accès aux carrières d'où est extraite la pierre ou l'argile et aux forêts d'où provient le bois « à maisonner ». » (Braudel 1993) dans (Villain 2020). Dans ce contexte, la ressource en terre, extraite in situ, est moins limitée par la position sociale des constructeur.ices, tant que ceux-ci ont accès à la terre, ressource

abondante et peu contrôlée. Dès lors que la structure sociale permettant l'approvisionnement en matériau se complexifie, la dépendance aux forces politique dominant ce système social augmente.

Les transformations sociales concomitantes à l'exode rural et à l'uniformisation culturelle liée à l'avènement de l'État français ont à la fois réduit les possibilités techniques de mise en œuvre des procédés de construction en terre crue, par exemple en réduisant la main d'oeuvre paysanne disponible (Villain 2020:63), et effacé les schémas culturels permettant la réalisation de ces procédés techniques. En Bretagne par exemple, l'éradication de la langue et de la culture bretonne a participé au remplacement des *cultures constructives* de la bauge pour les techniques industrielles (Villain 2020:63). En transformant jusqu'aux structures sociales coutumières, l'intervention étatique participe à la transformation des cultures constructives. L'homogénéisation culturelle, que l'on peut qualifier d'industrialisation des cultures humaines (Illich 1973), participe ainsi au remplacement des techniques vernaculaires par des techniques industrielles (Villain 2020:63).

Mille (2023) analyse les contraintes des différentes législations visant le déploiement ou la restriction de l'usage du pisé entre le XVe et le XXe siècle dans la région Lyonnaise. Il conclut que les réglementations ont pu être facilitatrices ou excluantes pour des techniques de pisé, selon la perception et les objectifs des classes sociales dirigeantes : les interdictions « autoritaires » de construire en pisé associant au matériau une vision « misérabiliste », liée à sa sensibilité à l'eau et les représentations* rurales qu'elle véhicule ; tandis que certaines régulations ont pu chercher à accompagner son développement dans une vision « pragmatique » et vantant les mérites d'un matériau « réputé pour être résistant mécaniquement, incombustible et peu coûteux en raison de la simplicité de sa mise en œuvre et de la facilité à se procurer la terre qui est le plus souvent prise sur le site de la construction » (Mille, 2023, p. 320). Cependant, cette vision a également pu mener à son remplacement progressif par « les pisés de mâchefer ou de béton maigre ».

La régulation de l'emploi des techniques semble avoir eu essentiellement lieu dans l'espace urbain. Elle peut ainsi avoir des conséquences radicales, surtout négatives : car si interdire l'emploi d'une technique assure sa disparition des usages et à moyen terme des cultures constructives, a l'inverse, son soutien administratif n'a pas un impact positif systématique, car une technique de construction en terre imposée par une autorité peut réduire sa désirabilité et finalement compromettre son déploiement (Fabbri et al. 2022).

3.5.6.1 Aléas et biais

Ainsi, les contraintes légales et administratives peuvent impacter volontairement ou non l'ensemble du spectre des facteurs favorable ou défavorables aux choix techniques. La contrainte réglementaire appartient à une « superstructure culturelle » : construite sur un système social préexistant, elle ne dépend de l'environnement qu'à travers la « culture constructive » elle-même. La plupart des facteurs culturels que nous avons observés ne procurent pas de biais significatifs, mais des aléas conséquents. Les contraintes réglementaires procurent des aléas de plus grande échelle encore, s'établissant les augmentant ou les réduisant. Pouvant s'appliquer à des régions voire des empires entiers, ces aléas peuvent difficilement être « moyennés » par la diversification des sources de données comme suggéré en 3.3.2 . Si toute une région voit une culture constructive interdite, le déséquilibre de densité bâtie sera conséquent avec d'autres régions et pourraient induire des biais par présence d'aléas mal moyennés.

3.5.7 Analyse : cultures constructives

3.5.7.1 Le contexte urbain, une accumulation de facteurs sociaux à fort impact

L'ensemble des paramètres que l'on a catégorisé dans la « culture constructive » semblent fortement dépendants du contexte urbain/rural, par la ségrégation économique qu'il produit, par la variation des objectifs architecturaux des constructions et l'incitation des réglementations. Ces facteurs sont loin d'être négligeables : ils peuvent être techniquement très défavorables aux techniques extensives* comme la bauge, ou participer à faire disparaître complètement les cultures constructives d'une technique-type* par interdiction de leur mise en œuvre. Le Tableau 6 résume les interactions positives et négatives que les facteurs d'origine urbaine ont sur les choix techniques. En contexte urbain, les techniques de mise en œuvre massives in situ présentent des désavantages liée aux faibles intensités temporelles, spatiales et mécaniques des techniques, particulièrement pour la bauge. L'adobe possède des avantages et inconvénients similaires à la construction en pierre taillée et aux briques cuites, car les éléments sont pré-façonnés et transportés. Le pan de bois combine le pré-façonnage et à la légèrté des structures qui procurent des avantages dans la construction comme dans l'usage.

Dans l'ensemble, il est difficile d'imaginer des liens systématiques entre la présence de l'environnement urbain et les variables pédologiques, du moins pas autant qu'avec les variables de l'« écosystème matériel ». Mais l'influence de la culture constructive que le contexte urbain fait varier localement apporte certainement beaucoup d'aléa dans le choix technique, par exemple en autorisant l'emploi de techniques « de luxe », c'est à dire non économiquement optimal. Dans l'étude des corrélations entre patrimoine et propriétés pédologiques, cela pourrait invisibiliser ou fausser les observations si l'échantillonnage n'est pas suffisamment aléatoire ou représentatif.

Par exemple, si un échantillonnage est réalisé dans la zone d'influence d'une unité urbaine et que celle-ci présente des caractéristiques pédologiques particulières, il sera difficile d'attribuer la variabilité du choix technique selon les variables pédologiques au contexte constructif ou à l'aisance de mise en œuvre des techniques. Pour effacer l'influence de cette aire urbaine, il faudra s'assurer que l'échantillonnage intègre des données en zone rurale ayant ces mêmes conditions pédologiques. L'autre possibilité est d'intégrer la variable « densité bâtie » directement comme variable explicative du modèle.

Tableau 6 : Facteurs d'influence sur les choix techniques liés au contexte urbain. Exemple de lecture : l'intensité spatiale imposée par le contexte urbain est défavorable à l'établissement des techniques-types de bauge, et favorable aux techniques transportées comme les adobes, le pan de bois ou la brique cuite, d'autant plus pour le pan de bois que l'intensité spatiale est aussi favorisée par la densité habitable qu'il permet.

Facteurs (favorisés en conditions urbaines)	Pisé	Bauge	Adobe	Pan de bois + terre	Pierre	Brique cuite
Intensité temporelle imposée		-	+	+	+	+
Intensité spatiale imposée		-	+	++		+
Intensité mécanique (densité habitable)				+		
Contraintes administratives				-		

Désirabilité		+	+	+
(rappel) Capital technique	+/-		+/-	+/-

3.5.7.2 Interactions entre techniques de construction

L'ensemble des facteurs influençant le choix technique que nous avons évoqué se rapportent en deux catégories : ceux qui influencent le choix technique par favorisation/défavorisation de la technique étudiée, et ceux qui l'influencent par favorisation/défavorisation d'une ou plusieurs autres techniques.

Mais l'impact du développement des autres techniques sur le développement de la technique étudiée n'est pas le même selon leurs interactions réciproques. Toutes les techniques n'ont pas exactement les mêmes fonctions et les mêmes propriétés constructives, et si certaines sont rarement employées dans une même édification (ex : bauge et pisé), elles sont parfois complémentaires (ex : adobes ou torchis sur du pisé ou de la bauge, terre sur soubassement de pierre). Ainsi, il est possible que le développement de certaines techniques favorise les autres dans une action mutuellement bénéfique, ou au contraire s'excluent.

Nous avons vu l'impact des techniques de pierre ou de brique cuite sur les techniques de construction en terre (3.4.6 , 3.4.7) : les chaînages, les renforts d'angles, les sous-bassements de brique cuite ou de pierre participent au déploiement des techniques de terre. On note particulièrement la relation entre briques crues et cuites qui s'accordent aisément dans des appareillages mixtes (Klein 2011). De ce fait, ces techniques s'entre-favorisent probablement par rapport aux autres, même si elles sont en compétition entre elles.

Nous n'avons cependant pas discuté des interactions entre techniques de terre crue. Nous n'avons pas observé, ni dans nos expéditions cartographiques, ni sur les chantiers de construction contemporains, de mise en œuvre dans un même édifice de bauge et de pisé. L'une des techniques-type n'a rien à apporter à l'autre, elles ont essentiellement les mêmes fonctions. En revanche, nous avons relevé des exemples où des levées de bauges et d'adobes sont posées en alternance afin d'accélérer le chantier («Bosi» 2022; «Dugelay» 2022b). Guillaud et al. (2008) rapportent également la pose de couches d'adobes sur le sous-bassement, préalablement à celle des levées de bauge en Italie.

La mise en œuvre traditionnelle* du pisé est moins impactée par les temps de séchage (3.4.1), de ce fait, la rigidité apportée par des lits d'adobes intermédiaires, ou l'optimisation du temps de chantier relatif au temps de séchage des levées de bauge ne s'applique pas au pisé. De plus, une telle association avec le pisé est plus difficile à envisager puisque la force de compaction pourrait rompre les adobes sous-jacent.

L'adobe est un matériau idéal pour combler des ouvertures ou réparer des fissures, comme nous avons pu le constater sur des chantiers de rénovation contemporain et dans l'observation du bâti vernaculaire. C'est une association courante avec l'ensemble des techniques de construction en terre. Le pan de bois, technique légère, est fréquemment rencontrée dans les étages des bâtiments construits en techniques plus massives, composées de terre crue ou non. On observe également qu'une continuité est possible entre les techniques d'adobes porteuses et les techniques de pan de bois garnis d'adobes sur le territoire champenois (Aras 2024).

L'adobe pourrait donc être une technique facilitatrice pour les autres techniques composées de terre crue. Le torchis, en revanche, complète aussi bien la pierre ou la brique cuite que les techniques de terre porteuse, mais la présence de savoir-faire de garniture de torchis en terre est peut-être facilitatrice du maintien d'une culture de la terre crue localement, et inversement.

3.6 Conclusion : choix technique et contexte constructif

3.6.1 L'influence du sol au sein d'un contexte socio-écosystémique complexe

Les techniques de construction en terre crue se déploient dans des écosystèmes socio-environnementaux complexes où les choix techniques sont favorisés ou défavorisés par de nombreux facteurs que l'on peut attribuer à l' « environnement » et à la « culture constructive » locale, avec bien entendu une porosité entre ces deux catégories.

Le potentiel de concentration ou d'étalement de l'effort constructif dans le temps a une grande influence sur l'adéquation des techniques de construction aux rythmes saisonniers des socio-écosystèmes locaux : le climat, l'organisation des rythmes agricoles, l'intensité temporelle des milieux urbains, limitent l'emploi des techniques à celles qui entrent dans les contraintes. Les potentiels d'intensité spatiale des techniques est également d'importance et guide les possibilités de déploiement lorsque l'espace est restreint. Les techniques extensives* dans le temps ou l'espace, comme la bauge, sont défavorisés en contexte urbain, plus favorables aux techniques comme les adobes ou aux pans de bois assurant un décalage du travail dans l'espace et/ou dans le temps par préfabrication.

Ainsi, y a-t-il une influence significative des propriétés des sols sur les choix techniques (Hypothèse 3, Chapitre 1, 4) ? Cette question mérite d'être posée, tant l'influence socio-environnementale des autres facteurs peut être importante.

Nous proposons dans la Figure 55 une représentation de l'ensemble des catégories de facteurs identifiés dans cette étude qui pourraient expliquer le choix d'une technique de construction en terre crue. Le lien que l'on cherche à mettre en évidence dans cette étude est l'influence des propriétés du sol sur le choix techniques directement via la facilité de mise en œuvre des techniques de construction en terre crue (en rouge, trait plein). Mais d'autres facteurs influencent cette corrélation. Ces autres facteurs peuvent eux-mêmes présenter des corrélations avec les propriétés du sol (*biais*, en noir, trait plein) ou non (*aléas*, noir, trait pointillé). Par exemple, les « incitations légales et administratives » ne semblent pas liées aux variables pédologiques mais apportent de probables *aléas* dans la corrélation; tandis que la pierrosité du sol a à la fois une potentielle influence sur l'ouvrabilité de la terre et sur le potentiel de déploiement des techniques de construction en pierre, qui concurrencent la terre dans les *choix techniques relatifs*. Le potentiel technique de la construction en pierre apporte donc un *biais* dans la relation entre propriétés du sol et choix d'une technique de construction en terre crue.

Les choix techniques *absolus* d'une technique de construction en terre reflètent l'occurrence directe du nombre de bâtiments d'une technique de terre selon les propriétés du sol. C'est l'intensité bâtie brute observable sur un territoire dont on relève l'occurrence du patrimoine bâti en terre. Les choix *relatifs* représentent la préférence de la technique de terre crue relativement aux autres techniques. C'est la densité de bâtiments d'une technique de terre relativement à la densité de bâtiments composés d'autres techniques de terre ou d'autres matériaux. Ce sont les choix *relatifs* qui représentent le mieux les choix préférentiels, car la simple densité bâtie en une technique de terre crue sur un type de sol est fortement influencée par la densité bâtie globale qui découle des dynamiques d'*installation préférentielle*. Pour obtenir des données décrivant la répartition relative du bâti composé de différentes techniques, un échantillonnage équivalent de l'ensemble des catégories de techniques étudiées est indispensable.

3.6.2 Quelles données pour évaluer le contexte environnemental ?

Dans ce chapitre théorique, nous nous sommes intéressés au déterminisme environnemental des paramètres des sols sur les choix des techniques de construction en terre crue. Dans l'interaction entre sols et choix techniques, on remarque que de nombreuses variables « sociétales* » complexifient les liens éventuels entre terre et technique. Dans la continuité des propositions du Chapitre 2 (6), on comprend que le système de variables qui en découle dépasse largement l'ouvrabilité directe de la terre dans les différentes techniques-type. Seule une bonne connaissance des contextes des espaces-temps étudiés permet d'identifier et de prendre en compte ces variables de *contexte constructif*. Cela est particulièrement difficile lorsqu'il s'agit de comprendre les contextes historiques : toute interprétation doit se baser sur des connaissances historiques solides afin de ne pas tomber dans des préjugés sur les époques concernées (Roberts 1987 dans (Ford 2002). Un travail commun croisant des savoirs du domaine des sciences dites « naturelles » et des sciences dites « humaines et sociales » est alors indispensable (Barley 1986, dans (Ford 2002)).

Toutes ces variables introduisent des *aléas décorrélés* des propriétés pédologiques, qui réduisent plus ou moins significativement l'acuité des corrélations observées : par exemple, les *incitations légales et administratives* à l'emploi de la terre varient selon les contextes et introduisent une composante « aléatoire » dans la corrélation. Un échantillonnage insuffisamment décorrélé de cette propriété, par exemple déséquilibré entre le contexte urbain/rural, peut changer cet aléa en biais de méthode.

Mais certaines de ces variables du contexte constructif introduisent très probablement des *biais corrélés* aux propriétés pédologiques, qui peuvent faire varier la forme des corrélations observées *in fine* entre sols et occurrence technique. Par exemple, l'emploi de la pierre est facilité par la présence d'un sol peu profond et/ou caillouteux. De même, les sols peu profonds et/ou caillouteux peuvent influencer la facilité de mise en œuvre de certaines techniques de construction en terre crue. Ainsi, lors de l'observation de la corrélation entre choix technique et profondeur du sol ou teneur en cailloux, on ne peut savoir si la corrélation est liée à la facilité de mise en œuvre de la terre ou à celle de la pierre.

La baisse de l'acuité des corrélations par des aléas vraiment décorrélés des propriétés pédologiques n'est pas forcément problématique. Au contraire, on peut supposer que **la baisse de l'acuité est corrélée à l'importance du contexte constructif dans le choix technique, hors influence du sol**. C'est-à-dire qu'en admettant les biais liés à la méthode nuls (7), si l'ensemble des propriétés pédologiques supposées impactantes sur les ouvrabilités ne présentent aucune corrélation avec les choix techniques, ou que l'aléa autour des corrélations est très fort, on pourra considérer que l'influence de la composition de la terre sur les choix techniques est peu significatif face au reste du contexte constructif. La caractérisation de l'acuité des corrélations pourra ainsi permettre de discuter de l'importance du déterminisme matériel sur les choix techniques : si malgré l'emploi de données de qualité et un traitement adéquat, nous n'arrivons pas à dégager de tendance claire ou explicable entre sols et choix techniques, c'est que celui-ci est peu *déterminé* par cette variable environnementale.

En revanche, les biais corrélés aux propriétés pédologiques sont plus « problématiques », car ils peuvent mener à des conclusions erronées ou exagérées, comme on a pu le suggérer par exemple pour les conclusions de l'étude de Mileto et al. (2.2). C'est pourquoi l'évaluation d'un déterminisme environnemental sur les phénomènes sociaux doit faire l'objet d'une analyse rigoureuse de l'ensemble des interrelations potentielles entre les facteurs environnementaux et sociaux en jeu. La présente analyse permettra de prendre du recul sur les corrélations observées au Chapitre 3B.

Lorsque des aléas et biais sont identifiés, il peut être utile de les réduire, ou au moins quantifier leur influence potentielle, via l'introduction de variables externes, afin de « dégager » les corrélations

directes entre terre et choix techniques directement liés à l'ouvrabilité de la terre à disposition. Des exemples de données qui pourraient renseigner et/ou éliminer des biais (pointillés bleus) sont proposés sur la Figure 55. Dans le travail d'analyse de données cartographiques, nous évaluerons différent types de données de densité bâtie générale qui permettent d'atténuer ou d'annuler le biais d'installation préférentielle. D'autres données ont été envisagées, mais n'ont pas été employées dans cette étude faute de temps pour évaluer leur influence :

- des informations relatives au climat, notamment la teneur en eau moyenne des sols au cours de l'année, qui permettent de considérer l'impact de ces facteurs sur les étendue temporelles des saisons favorables aux chantiers terre crue (3.4.5);

- des cartographies du couvert forestier au cours du temps, qui pourraient caractériser l'influence de la proximité de la ressource en bois sur les techniques de pan de bois (garnies ou non de terre crue) (3.4.3);

- des informations concernant la distribution des bâtiments non composés de terre crue qui détaillent leurs techniques de construction (brique cuite, pierre); qui n'ont probablement pas les mêmes impacts concurrentiels sur les différentes techniques-types de terre crue (3.5.7.2);

- des données représentant l'environnement urbain, par exemple la densité bâtie absolue autour de chaque bâtiment, renseignant sur les conditions dans lesquelles celui-ci a été bâti. Elles permettraient de visibiliser l'impact du milieu urbain où de nombreux phénomènes socio-économiques apportant potentiellement de forts aléas ont été identifiés (3.5.7.1).

4 Données pédologiques

La méthode utilisée dans cette partie est largement inspirée de celle proposée par Hamard et al. (2018). Elle consiste en l'extraction de propriétés pédologiques spatialisées à la localisation exacte de chacun des bâtiments d'une base de données de patrimoine géolocalisé, afin de remplacer l'analyse du matériau en laboratoire.

Au moins depuis les années 2000 avec Ford (2002), les méthodes de croisements spatiaux de bases de données numériques ont été employées pour explorer ces relations. La méthode développée par Hamard et al. (Hamard 2017; Hamard et al. 2018) est celle qui a retenu notre attention car c'est la seule dont les éléments méthodologiques sont présentés et reproductibles ; d'autre part, c'est la seule qui évalue la densité bâtie globale pour réduire le biais *d'installation préférentielle*.

Un travail conséquent d'automatisation algorithmique et d'amélioration de la méthode a été apporté. L'ensemble de la méthode est décrit dans ce chapitre, mais pour le détail de la transformation et du croisement des données, l'algorithme python est disponible en accès libre (Verron-Guillemot 2025).

4.1 Données pédologiques ou données géologiques ?

Trois domaines scientifiques étudient le « sol » au sens commun (Chapitre 2, 2) : la géotechnique, la géologie et la pédologie. En France, géotechniciens et géologues partagent les mêmes outils de travail : cartes géologiques et bases de données du BRGM. Ces données décrivent généralement le sous-sol, et rarement le sol pédologique, c'est à dire le matériau altéré de surface (souvent meuble). Les bases de données pédologiques en revanche, sont calibrées pour permettre une description précise des horizons du sol (pédologique), de la surface à la limite d'influence de la pédogenèse.

L'essentiel de la couche superficielle meuble (Chapitre 2, 2), matériau d'intérêt pour la construction en terre crue, est donc décrite dans les bases de données pédologiques et peu prise en compte dans les données de sous-sol.

Cependant, les bases de données pédologiques ne fournissent aucune donnée profonde, car la pédogenèse altère les sols sur une épaisseur dépassant rarement 1,50m sous nos climats. D'autre part, leur objectif principal d'utilisation est essentiellement agronomique et généralement, au-delà de 1 à 2m de profondeur, l'influence du sol sur le couvert végétal est moindre (Arrouays et al. 2014).

Ainsi, dans le cas de matériaux meubles présents en profondeur (dépots sédimentaires épais, grès très friables…), les bases de données pédologiques (de sol) ne sont pas adaptées. Seules les bases de données géologiques (de sous-sol) sont à même de nous renseigner sur la nature et la quantité des matériaux meubles en profondeur. D'autre part, ces bases de données sont souvent bien plus accessibles et couvrent de plus grands territoires que les bases de données pédologiques (Hamard et al. 2018).

Dans le cas de l'étude du bâti vernaculaire pré-industriel composé de terre crue, il est généralement admis que le matériau utilisé pour l'édification est prélevé à proximité et dans une logique de moindre effort (Hamard, Cazacliu, et al. 2016): la couche organique est souvent retirée, mais il est probable que l'excavation n'ait pas dépassé l'échelle d'un mètre de profondeur. Dans les études du patrimoine ancien et donc dans cette étude, les bases de données pédologiques sont les plus pertinentes pour étudier les liens entre patrimoine bâti et typologie de terres (Hamard et al. 2018). C'est également ce type de données qu'il est intéressant de mobiliser pour la construction en terre crue contemporaine se déployant en volontaire déconnexion du système industriel, donc dans une logique de moindre effort similaire aux modes constructifs pré-industriels. Nous avons observé plusieurs chantiers procédant à une excavation manuelle (pelle-pioche).

Dans le cas de l'étude d'une potentialité de réemploi de matériaux d'excavation en contexte industriel, la terre peut être excavée en surface, lors de travaux de terrassement, mais également en profondeur : lignes de métro, parkings et autres tunnels. Ce contexte que l'on peut qualifier d'« extractiviste* » par son intensité est une conséquence de l'abondance énergétique qui permet une excavation presque sans effort et donc d'atteindre des typologies de terres situées en profondeur. Il s'agit généralement d'un « co-produit » (comprendre : déchet) de travaux ayant d'autres objectifs (Contexte, 1.3). La métropole Parisienne est particulièrement concernée : le bassin parisien est composé de formations géologiques sédimentaires diverses et souvent meubles, et la métropole fait continuellement l'objet de travaux générant des quantités *monstrueuses* de terres d'excavation (Contexte, 1.3).

On a vu que ces travaux génèrent des flux considérables de terres dans les métropoles qui, lorsqu'elles n'ont pas été polluées ou modifiées par des adjuvants, pourraient être réemployées pour la construction en terre crue (Contexte, 1.3). Dans ce contexte, l'utilisation de bases de données géologiques peut être pertinentes pour estimer le potentiel de réemploi des terres d'excavation. Une nuance relevée par Hamard et al. (2018) suggérant que l'évaluation de la disponibilité de la ressource en terre est :

- une notion de distribution de surface de sols convenables pour le patrimoine pré-industriel* ;

- une question de volumes de ressources locaux pour la construction en terre crue contemporaine si elle s'ancre dans le système industriel existant. Précisons qu'il s'agit peut être moins des stocks que des flux de terres excavées, apportant une complexité supplémentaire dans l'analyse géographique.

Dans cette étude, l'essentiel du travail porte sur l'analyse de données patrimoniales. Les bases de données pédologiques s'imposent pour l'analyse des corrélations entre patrimoine et typologies de terres.

4.2 Description des données pédologiques

La qualité de l'analyse statistique réalisée en croisant données patrimoniales et données pédologiques dépend de la qualité des données pédologiques employées. Plusieurs bases de données pédologiques ont été sélectionnées pour être testées dans cette étude.

Le travail d'étude de convenance des terres relativement à la construction en terre crue nécessite une base de données de propriétés des sols spatialisées avec une finesse d'échelle spatiale suffisante. L'échelle de l'étude est celle de la distance potentielle de collecte de la ressource terre pour construire : une échelle plus grande (>1km) apporte de l'aléa par mauvaise description des sols employés ; une échelle plus fine (<10m) n'apporte plus d'information car la ressource est fréquemment transportée au-delà.

3 bases de données pédologiques couvrent l'ensemble du territoire hexagonal : DoneSol3, GlobalSoilMaps et SoilGrids.

4.2.1 DoneSol3 – raster-STU, vecteur-STU et vecteur-SMU

Les bases de données DoneSol permettent le stockage et la gestion de données pédologiques spatialisées, dans un format adapté à la description pédologique de terrain. De nombreuses données concernant les types de sols et leurs horizons peuvent être renseignées. A l'origine, elles sont définies à l'échelle départementale et la plupart ont aujourd'hui été agrégées et harmonisées à l'échelle régionale. Elles sont gérées localement par diverses institutions publiques qui en définissent les conditions d'accès, qui peuvent être plus ou moins complexes. Obtenir l'ensemble des RRPs régionaux est une quête administrative dont nous n'avons pas pu voir le bout au cours de cette étude. Toutefois, l'accès aux données concernant les régions où nous avons de grandes quantités de données patrimoniales spatialisées a été priorisé. Un résumé des sources de données obtenues est présenté en Tableau 7.



Figure 56: Illustration de la délimitation d'UCS dans un paysage. © E. Rabot, CNRS, laboratoire Écologie Fonctionnelle et Environnement, photographie V. Hurtes, CAUE de l'Aveyron

Dans l'ensemble, les données renseignées dans les bases DoneSol3 décrivent 3 échelles spatiales[40] (IGCS 2023), dans une organisation schématisée sur la Figure 57 :

40 voir aussi la vidéo de présentation : https://peertube.iriseden.eu/w/4sPJAfZbtpguhg9nQ3xiC5

- les Unités Cartographiques de Sol (UCS) : ce sont des portions du paysage dans lesquelles les facteurs de la formation des sols sont homogènes (morphologie, géologie, climat et dans certains cas l'occupation du sol). Leur tracé peut ainsi se baser sur des limites topographiques (rupture de pente, courbes de niveau) ou des limites géologiques. Elles sont composées d'Unités Typologiques de Sol (UTS). L'ordre de grandeur des dimensions des UCS est le kilomètre, avec une forte variabilité dans l'échelle 100m - 10km selon la variabilité locale des sols et la forme du paysage.

  Dans ce travail, nous les nommerons en anglais Soil Map Unit (SMU) car c'est ainsi que nous les avons nommées dans l'algorithme et sur les figures.

- Les Unités Typologiques de Sol (UTS) : ce sont des « profils pédologiques types », des portions de la couverture pédologique qui présentent une pédogenèse identique. Elles sont définies par l'évaluation d'expert.es locaux et locales. La définition par des expert.es d'un profil type représentant les sols d'une zone locale est considérée comme plus performante que l'évaluation d'un seul profil de sol réel à une position aléatoire dans l'espace dans la zone (Lemercier et al. 2022).

  Dans le format cartographique DoneSol vecteur classique, les UTS ne sont pas directement cartographiées : la proportion spatiale relative des UTS identifiés dans une SMU est définie, mais les délimitations spatiales exactes ne sont pas définies. Une UTS peut être présent dans plusieurs SMU.

  Dans le format expérimental proposé par (Vincent et al. 2018), une cartographie des UTS au format raster (appelé par la suite *raster-STU*) est proposée à l'échelle de la Bretagne. Ce format facilite le traitement de données spatiales.

  Dans ce travail, nous les nommerons en anglais Soil Type Unit (STU) car c'est ainsi que nous les avons nommées dans l'algorithme et sur les figures.

- Les strates : ce sont les « horizons types » des STU. Comme des horizons pédologiques, c'est à cette échelle qu'on définit une certaine homogénéité de la composition du sol. C'est donc à cette échelle que sont décrites les propriétés physiques (granulométrie, densité, morphologie des consituants…) et chimiques (CEC, pH…). Contrairement à GlobalSoilMaps et SoilGrids dont les « couches » sont définies par des classes de profondeurs strictes, les strates des STU de DoneSol3 sont d'épaisseur et de profondeur d'apparition variable, plus proches des horizons que ne le sont les couches. C'est pourquoi nous distinguerons les termes « strates » et « couches », relevant de deux représentations différentes des profils de sols.

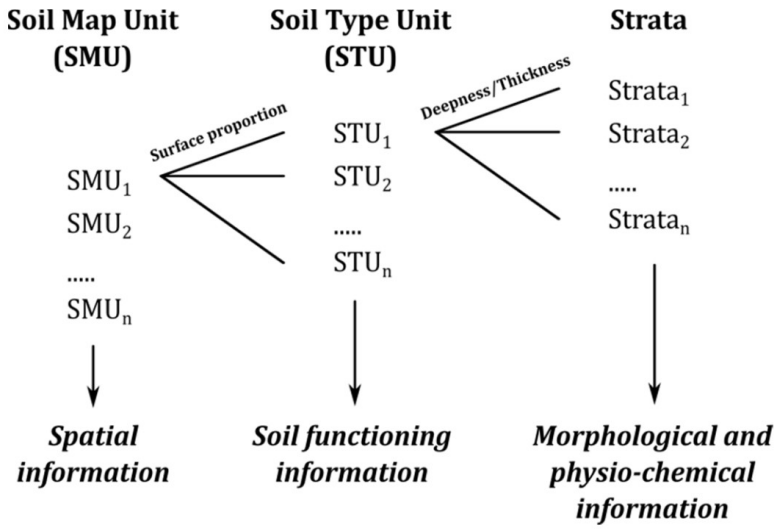


Figure 57 : Les Unité Cartographiques de Sol (UCS, ou SMU en anglais) sont des descriptions de pédopaysages spatialisées à l'échelle 1:125000. Elles sont composées d'Unité Typologiques de Sol (UTS, ou STU en anglais), « profils-types » de sols. Les STU sont composées de strates (strata), représentant des horizons-types (Hamard, 2017, p. 49).

Les informations quantitatives et qualitatives sur les propriétés du sol sont nombreuses dans les bases DoneSol3 et concernent les propriétés des trois échelles : propriétés des SMU, des STU et des strates (« horizons »).

C'est à l'échelle des strates que sont définies la plupart des propriétés qui nous intéresseront dans cette étude : texture (F2µm, F50µm, F2000µm), éléments grossiers (F2000µm_D), CEC, teneur en carbone ou en matières organiques. Quelques informations qualitatives supplémentaires renseignent notamment sur la forme des éléments grossiers. La profondeur d'apparition et l'épaisseur de chaque strate est également définie à cette échelle. Pour chaque propriété, la valeur est issue de la moyenne d'une ou plusieurs mesures de laboratoire ou de terrain, mais il n'y a pas d'informations concernant l'incertitude sur ces mesures.

D'autres propriétés utiles pour cette étude sont définies à l'échelle des STU : la profondeur du sol, et le matériau parental du sol.

Les bases de données DoneSol3 sont définies localement, ainsi la complétude des données dépend de l'intensité de mesure et d'enregistrement réalisée pour chacune des bases de données locales. A l'obtention des données, nous évaluons pour cinq variables pédologiques le pourcentage de valeurs renseignées pour ces propriétés dans l'ensemble des strates de chaque base de données (Tableau 7). Dans l'ensemble, les données de texture sont renseignées pour la quasi-totalité des strates. Les données concernant les éléments grossiers sont moins bien renseignées mais le sont toujours à plus de 50 %. En revanche, pour la CEC et les matières organiques, les valeurs sont parfois très peu renseignées. Cependant, dans les régions pour lesquelles nous disposons de données patrimoniales pour l'analyse de croisement de données, les données de CEC sont remplies à plus de 50 % sauf en Ile de France, où très peu de bâtiments sont concernés (sud du 77).

Référentiel Pédologique (format DoneSol3)			% de données valide					Données
Zone Géographique	No. Depts	Accessibilité	texture	EG	CEC	OrgM	OrgC	terre crue
Bretagne	22, 29, 35, 56	Convention	100	93	93	0	93	oui
(Basse Normandie) Calvados	14	convention	99	62	52	54	29	non
(Basse Normandie) Manche	50	convention	100	67	65	65	63	non
(Basse Normandie) Orne	60	convention	99	53	44	51	11	non
(Pays de la Loire) Loire-Atlantique	44	Sur demande	97	99	68	2	99	oui
(Centre) Loiret	45	Sur demande	73	88	19	0	19	non
(Auvergne-Rhône-Alpes) Ain	01		92	98	64	64	0	non
(Auvergne-Rhône-Alpes) Allier	03		99	96	90	61	22	oui
(Auvergne-Rhône-Alpes) Puy-de-Dôme	63		98	67	70	49	38	oui
(Auvergne-Rhône-Alpes) Ardèche	07		94	88	82	37	0	non
(Auvergne-Rhône-Alpes) Drôme	26	Convention	78	84	83	35	0	non
(Auvergne-Rhône-Alpes) Isère	38		89	98	80	64	4	non
(Auvergne-Rhône-Alpes) Loire	42		92	89	55	35	0	non
(Auvergne-Rhône-Alpes) Rhône	69		97	100	39	33	0	non
(Auvergne-Rhône-Alpes) Savoie	73		90	89	63	57	0	non
(Auvergne-Rhône-Alpes) Haute-Savoie	74		81	91	72	45	0	non
(Champagne-Ardennes) Marne	51		99	99	100	100	0	oui
(Champagne-Ardennes) Aube	10	Convention	100	87	65	38	25	oui
(Champagne-Ardennes) Ardennes	08		99	99	100	100	0	oui
(Champagne-Ardennes) Haute Marne	52		100	80	46	62	36	non
(Nouvelle Aquitaine) Lot-Et-Garonne	47	Convention	81	73	86	87	86	oui
(Nouvelle Aquitaine) Gironde	33	accès libre web	99	96	61	54	53	non
Occitanie	09, 11, 30, 31, 32, 34, 46, 48, 65, 66, 82	Sur demande	96	84	67	67	34	oui
Alsace	67, 68	Convention	99	100	97	96	0	non
Lorraine	54, 55, 57, 88	Convention	99	67	73	45	56	non
Ile de France	75, 77, 78, 91, 92, 93, 94, 95	Sur demande	89	24	0	13	28	oui

Tableau 7: Référentiels Régionaux Pédologiques au format DoneSol3 obtenus pour cette étude

La méthode utilisée par Hamard et al. (2018) emploie les données pédologiques issues du Référentiel Régional Pédologique (RRP) (InfoSol 2021) sur la région Bretagne. La représentation spatiale de base de cette base de données pédologiques est au format vecteur, c'est-à-dire un ensemble de polygones dont chacun contient une table d'informations sur l'Unité Cartographique de Sol (SMU) associée. L'inconvénient majeur de ce format est que les SMU ne cartographient pas directement les propriétés du sol, mais des « paysages-types » composés de plusieurs Unités Typologiques de Sols, eux même composés des Strates qui contiennent des valeurs quantitatives et qualitatives pour les propriétés pédologiques. On ne peut donc pas directement extraire une propriété du sol à un endroit donné, ce qui complique le traitement des données et l'évaluation des incertitudes des résultats.

Depuis, Vincent et al. (2018) ont produit une carte des Unités Typologiques de Sol (Soil Type Unit, STU en anglais) du RRP Bretagne au format raster avec une résolution de 50m, en désagrégeant les STU des SMU à l'aide de covariables environnementales (topographie, couvert végétal, etc.). Cette carte simplifie le traitement spatial des données issues de la base de données DoneSol Bretagne et améliore la précision cartographique des données de composition du sol. En chaque point, on peut identifier la STU concernée et en précisant la profondeur désirée, accéder à la strate et aux variables pédologiques recherchées. Sur le territoire breton, chaque point de la grille raster prédit l'occurrence du la bonne STU dans 72 % des cas, ce qui est une très bonne performance à cette échelle de résolution.

4.2.2 GlobalSoilMaps

GlobalSoilMaps est un projet international visant à créer des cartes pédologiques couvrant l'intégralité du globe et cohérentes entre elles, dans une approche « de bas en haut » où des spécialistes locaux et locales collaborent pour homogénéiser les cartes de l'échelle locale à l'échelle globale. En France hexagonale, la cartographie a permis la production de cartes des sols au format raster (grille de pixels) de 90m de résolution représentant les propriétés communément employées des sols : texture (F2µm, F50µm, F2000µm), éléments grossiers (F2000µm_D), pH, teneur en carbone organique, CEC et profondeur totale du sol. Les jeux de données GlobalSoilMaps viennent également avec des cartographies d'incertitudes pour chaque propriété et chaque couche de profondeur. Cependant, (Lemercier et al. 2022) rappellent que les estimations d'incertitudes produites par la modélisation initiale peuvent présenter des incohérences avec des incertitudes évaluées de manière indépendante. Les limites de classes de profondeur sont les suivantes (en centimètres depuis la surface) : 0, 5, 15, 30, 60, 100, 200.

Notons que GSM France repose sur des données communes aux bases de données DoneSol3 et de ce fait que les deux bases présentent de probables biais communs.

Les cartes produites ont été évaluées par plusieurs études. Dans la publication initiale du jeu de données (Mulder et al. 2016) indiquent que le modèle présente globalement de bonnes prédictions relativement à des échantillons de sols de validation pour les propriétés de pH, F2000µm et F50µm. La prédiction de F2µm et CEC est moins performante, et encore moins pour F2000µm_D ou la profondeur du sol. Les auteur.ices indiquent qu'il s'agit là de propriétés difficiles à prédire car à haute variabilité et très dépendantes de la topographie et des dynamiques sédimentaires locales. Iels indiquent également que les prédictions deviennent moins fiables avec l'augmentation de profondeur. Enfin, iels précisent que la diversité des types et sources de données employées pour la construction et la validation du modèle apporte parfois des « artefacts » imprévisibles, liés aux bordures des unités cartographiques des sources de données initiales, à des manques de données localement, *etc.*, qui peuvent être retrouvés dans les cartes résultantes.

Lemercier et al. (2022) ont comparé les cartes GSM du territoire hexagonal aux données issues des bases de données DoneSol3 dans trois régions. Les résultats sont globalement cohérents avec les remarques de Mulder et al., mais les auteur.ices remarquent que la qualité de la prédiction varie significativement en fonction des régions. Par exemple, GSM-F2µm est fortement sous-estimée en Bretagne, tandis que la sous-estimation est moins conséquente en Alsace et dans le Languedoc-Roussillon. C'est probablement l'effet de l'harmonisation nationale des données, car les cartes GSM produites plus localement ne présentent pas ces biais. Mais les données locales GSM ne sont pas disponible pour l'ensemble des régions concernées par cette étude, nous utiliserons donc les données GSM de France hexagonale.

Nous avons pu obtenir gracieusement et sans délai ni convention de mise à disposition les fichiers de données de l'ensemble des couches de profondeur pour les propriétés de texture et les éléments grossiers auprès du laboratoire de recherche concerné (Arrouays et al. 2014). Malheureusement, pour des raisons qui nous sont inconnues et malgré nos sollicitations, nous n'avons pas eu accès aux autres propriétés telles que la CEC.

4.2.3 SoilGrids

SoilGrids est une base de données cartographique pédologique qui comme GlobalSoilMaps a pour objectif de produire un outil de référence harmonisé à l'échelle internationale. SoilGrids est produit à partir de bases de données d'échelle internationale ce qui garantit une qualité comparative des

données à cette échelle. Cependant, contrairement à GlobalSoilMaps, il n'y a pas de prise en compte des données pédologiques locales dans une harmonisation progressive à plus grande échelle.

Le fonctionnement est similaire à GSM, avec les mêmes intervalles de profondeur de définition des couches, et les mêmes propriétés sont proposées.

La résolution de 250 mètres est moins fine que celle de GSM mais reste relativement fine comparée aux SMU, mais les essais réalisés par Lemercier et al. (2022) montrent que l'acuité n'est pas de cette finesse : globalement, l'ensemble des prédictions de SoilGrids sont approximatives et sont moins performantes que celles de GSM.

L'avantage de SoilGrids réside surtout dans sont accessibilité, directement en ligne[41]. Le téléchargement des données peut s'automatiser et s'intégrer aux programmes de calcul.

4.2.4 Analyse : potentiels des sources de données pédologiques

Le système de cartographie par unités pédologiques représentatives de DoneSol (SMU, STU et strates) représente avec justesse la manière dont les pédologues délimitent les unités pédologiques en pratique. La variabilité des propriétés pédologiques est modulée localement, selon l'échelle cartographique, et permet une aggrégation en unités-types (Lemercier et al. 2022).

La représentation cartographique des SMU est probablement la source de données pédologiques la plus certaine et détaillée couvrant le territoire français. Cependant, ce système est peu flexible quant il s'agit d'étudier des propriétés physico-chimiques des sols et non des types de sols, notamment parce que le format rend complexe l'utilisation conjointe de données spatialisées raster (météorologiques, géographiques…) dans des modèles numériques, entre autres contraintes relevées par (Arrouays et al. 2014).

Dans notre étude, nous avons tenu à évaluer conjointement la performance de l'ensemble des données pédologiques disponibles pour l'usage de croisement patrimoine-propriétés du sol. C'est pourquoi nous avons cherché à utiliser également les données issues de DoneSol3 à l'échelle nationale au format vecteur, malgré la complexification conséquente du traitement et d'obtention des données pédologiques que ces données impliquent.

La cartographie raster-STU est idéale, car il est aisé d'extraire et représenter spatialement les propriétés de ces STU, en sélectionnant une profondeur, ou en moyennant les propriétés sur un ensemble de strates. Cependant, cette représentation n'existe que sur le territoire breton.

Soil Grids et GlobalSoilMaps, au format raster et couvrant l'intégralité du territoire français hexagonal, pourraient faciliter le traitement des données et harmoniser l'analyse à l'échelle de ce territoire. Cependant, malgré la haute résolution des données, Lemercier et al. (2022) rappellent que la résolution et l'acuité des données ne doivent pas être confondues et que la qualité de prédiction de ces deux bases de données reste inférieure aux données issues des différentes représentations de la base DoneSol3. Une évaluation de l'impact de la variabilité des prédictions sur les résultats obtenus est alors indispensable en comparant les résultats obtenus par différentes bases de données.

4.3 Préparation des données pédologiques

Le traitement des données pédologiques vise à rendre disponible chaque variable pédologique d'intérêt directement identifiable au niveau d'un point-bâtiment, pour le croisement spatial des données.

41 les cartes SoilGrids sont également consultables directement via un outil interactif en ligne : https://soilgrids.org/

L'ensemble des étapes de transformation des données peut être vue en détails dans les algorithmes de transformation disponibles en accès libre et commentés *in situ*. Une description synthétique du traitement est proposée ici.

4.3.1 DoneSol3

4.3.1.1 Accès et préparation de la base de données harmonisée nationalement

La complexité de la base de données DoneSol3 est un atout concernant la précision de la description des systèmes pédologiques. En revanche, elle rend le traitement des données complexes et a nécessité un travail de préparation conséquent.

(1) Unicité des données et codage des strates

Afin de maintenir une trace et une unicité des données pédologiques employées, un système d'identification à 4 critères est mis en place :

- Le numéro de l'étude donne la base de données du RRP d'origine

- le numéro de la SMU est celui de l'étude d'origine. Deux études peuvent avoir des SMU de numéros identiques, seul le numéro d'étude maintient la distinction

- chaque SMU se voit attribuer les données des STU dont il est composé. Le numéro de la STU vient ainsi distinguer chaque couple étude-SMU-STU

- enfin, chaque couple étude-SMU-STU voit attribuer les propriétés de chaque strate (horizon pédologique).

En résulte une table de données dont chaque ligne est un horizon différent au code étude-SMU-STU-strate différent.

(2) Vérification, complétude et préparation des données

- les « non-sols », c'est a dire les sols « noyés », « anthropiques » ou « autres » sont identifiés : leur numéro de la SMU est négatif. Leur surface est calculée et sommée pour toute la base, et sont affichées pour information et vérification. Puis, ces « non-sols » sont supprimés.

- Selon la documentation (InfoSol 2021), la somme des fractions granulométriques « argile », « limon » et « sable » doit être égale à 1000 (g.kg-1). Chaque couche est vérifiée. Lorsque la somme est différente de 1000, si elle se situe dans l'intervalle [950 ;1050], alors les valeurs de fractions granulométriques sont ajustées proportionnellement pour que leur somme atteindre 1000. Au delà de cet intervalle, les valeurs de granulométrie sont supprimée. Des statistiques concernant la distribution des valeurs autour de 1000 sont affichées.

- Afin d'éviter toute confusion dans les unités, les propriétés pédologiques sont harmonisées aux unités de mesure du système international.

- La teneur en carbone organique est complétée lorsqu'elle n'est pas renseignée. Pour ce faire, une régression linéaire entre les données « carbone organique » et « matières organiques » est réalisée sur l'ensemble de la base de données. Puis, pour les sols où « matières organiques » est renseigné, la valeur carbone organique est obtenue par interpolation sur la régression linéaire.

- Le nom du matériau parental est simplifié et agrégé en catégories. Il n'a pas été investigué pour ce travail de thèse.

- l'épaisseur du dernier horizon de chaque STU est sans valeur, car généralement, s'il est le dernier horizon renseigné du profil alors sa limite basse n'a pas été atteinte au cours de l'étude de terrain. Cependant, il existe parfois une donnée sur l'épaisseur minimum (probablement la profondeur atteinte). Celle-ci est appliquée en guise d'épaisseur du dernier horizon. Si l'épaisseur minimum n'est pas renseignée, l'épaisseur de l'horizon prend la valeur de la moyenne (pondérée par la surface de la STU) des épaisseurs des derniers horizons de tous les STU de la base. On suppose cette estimation comme sous-estimant la profondeur du sol, mais permettant des calculs de volumes de terre (Chapitre 4) plus proches de la réalité qu'en considérant comme inexistant les horizons profonds.

- Notons une différence avec la méthode utilisée par Hamard et al. (2018). Nous n'avons pas réalisé de pré-tri de la base de données selon la présence de matières organiques et la profondeur des horizons. Nous extrayons directement la valeur donnée à la profondeur de -45cm pour vecteur-SMU et vecteur-STU, et la strate reclassifiée 30-60cm pour raster-STU (voir aussi 7.2).

(3) fusion des fichiers vectoriels

Les données vectorielles de chaque RRP sont agrégées dans un seul fichier vecteur, et ses erreurs topologiques sont corrigées par traitement QGIS.

(4) agrégation des données à l'échelle désirée

Obtenir, à l'échelle des études-SMU (vecteur-SMU, vecteur-STU) ou des études-SMU-STU (raster-STU) une donnée pédologique initialement définie à l'échelle des strates (ou des STU) nécessite une étape d'agrégation. Cette étape diffère selon la représentation spatiale (raster ou vecteur) et selon la stratégie d'agrégation.

4.3.1.2 Raster-STU

La carte des STU au format raster nous permet de représenter directement les données pédologiques des STU sur la carte, et donc d'éviter l'étape d'agrégation STU→SMU. Elle n'est en revanche disponible que pour la région Bretagne. Afin de traiter cette représentation cartographique au même titre que les autres représentations raster, un traitement supplémentaire est réalisé dans la base de données du RRP Breton (Figure 58) :

- Une « reclassification » des horizons de la base de données initiale est réalisée. La méthode est similaire à celle réalisée par Lemercier et al. (2022). Les strates nouvellement délimitées sont prises égales à celles des bases de données SoilGrids (SG) et GlobalSoilMaps (GSM) : les limites d'intervalles (en m) sont 0; 0.05; 0.15; 0.30; 0.60; 1.00; 2.00. Pour chaque intervalle de profondeur, les propriétés pédologiques des horizons sont moyennées en pondérant par l'épaisseur de chaque horizon dans l'intervalle de profondeur. Par exemple, si deux horizons sont présents dans l'intervalle 0.30-0.60m, et que leur délimitation s'effectue à 0.50m, alors dans le calcul de moyenne pondérée la valeur de chaque propriété pédologique de l'horizon supérieur aura un facteur 0.20/0.30 et pour l'horizon inférieur 0.10/0.30. Ensuite, on projette chaque propriété pour chaque couche de profondeur, comme pour SG et GSM (voir 4.3.2 , 4.3.3).

- La carte raster-STU représente, sur chaque pixel, le numéro de la STU. Il faut agréger les valeurs des différentes couches à l'échelle de chaque STU. Pour chaque propriété pédologique à l'échelle des couches (p. ex. F2µm), on choisit d'attribuer à chaque STU la valeur de la couche reclassifiée 30-60cm. Cette valeur est projetée sur chaque pixel de la carte indiquant cet STU.

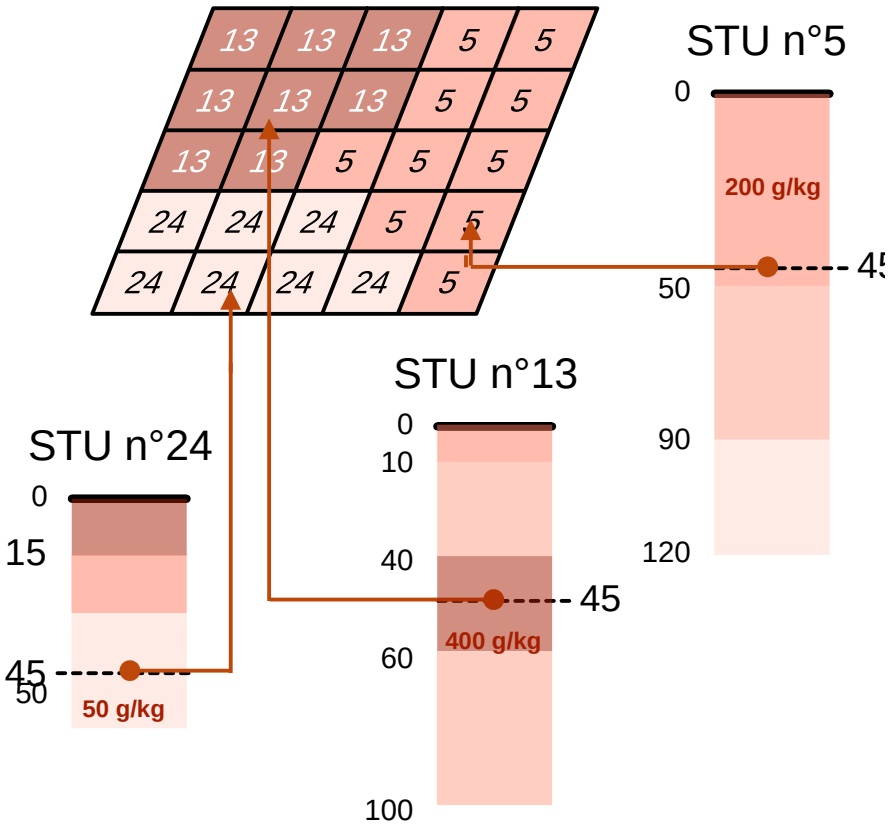


Figure 58 : Schéma récapitulatif de la transformation des données raster-STU. La profondeur de -45cm est choisie, et la valeur de la strate présente à cette profondeur est projetée sur les pixels raster indiquant cet STU.

4.3.1.3 DoneSol format vecteur

En dehors du territoire Breton, nous ne disposons que de cartes où ce sont les SMU qui sont représentées sous forme de polygones. La cartographie vecteur des SMU ne permet pas une extraction directe des propriétés des STU au niveau du point-bâtiment, car ce sont les SMU qui sont cartographiées. L'emplacement des STU au sein des SMU n'est pas connu, seulement la fraction de surface qu'elles représentent dans la SMU.

Or, les propriétés pédologiques (p. ex. granulométrie) sont renseignées à l'échelles des *strates* des STU, et certaines sont renseignées à l'échelle des STU (p. ex. profondeur, matériau parental). Un travail d'agrégation est nécessaire pour passer des propriétés des strates aux STU, puis des STU aux SMU (Figure 59):

- strate → STU : choix de la valeur de la strate présente à une profondeur définie (p. ex. -45cm).

- STU → SMU : moyennes pondérées par la surface des STU (« vecteur-SMU ») OU choix aléatoire de la valeur d'une STU, pondéré par la surface des STU (« vecteur-STU »). Les propriétés non numériques (p. ex. matériau parental) peuvent être sélectionnées par médianes.

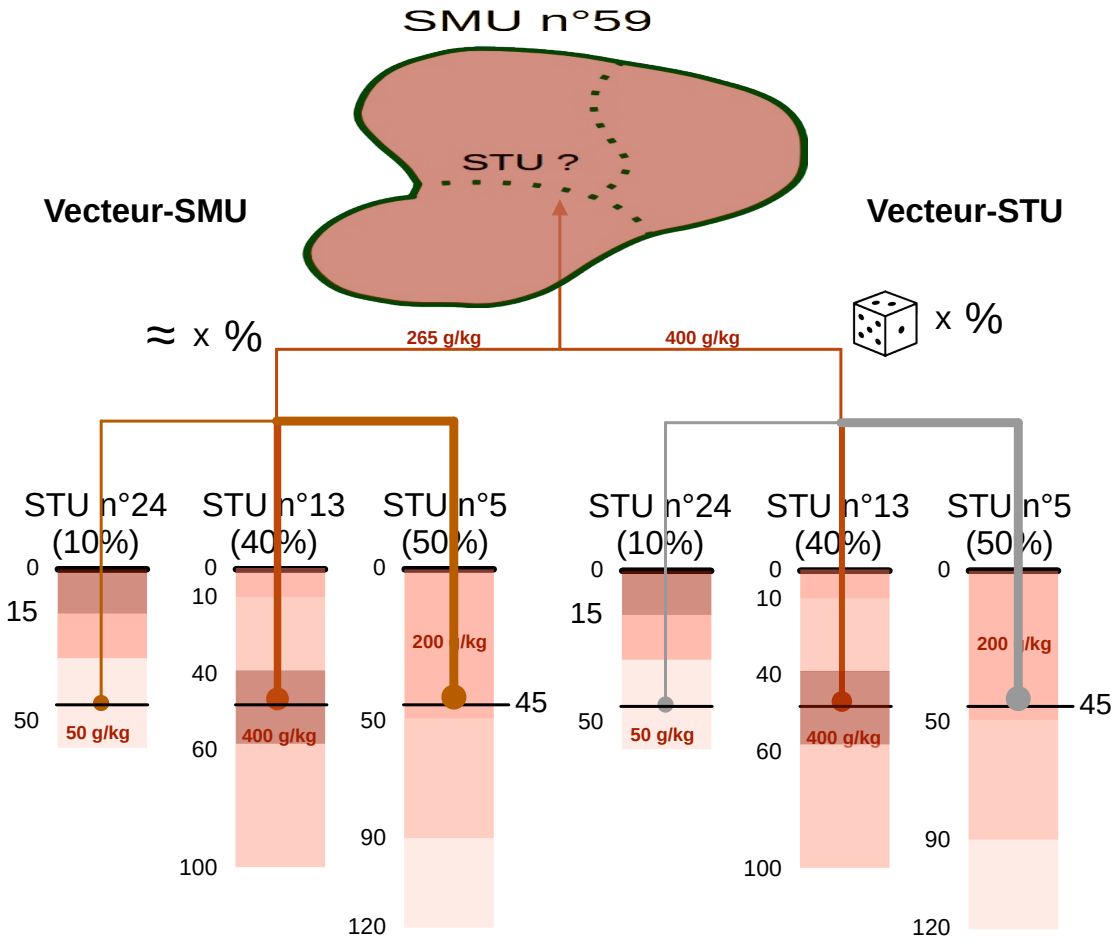


Figure 59 : Schéma récapitulatif des méthodes de transformation des données vecteur-SMU et vecteur-STU. La profondeur de -45cm est choisie. Puis, 1) pour vSMU, c'est une moyenne des valeurs des STU; 2) pour vSTU, c'est un choix aléatoire d'une valeur de STU. Le moyennage comme le choix aléatoire sont pondérés par les surfaces relatives des STU dans la SMU.

Ce n'est qu'après ces agrégations que les données agrégées à l'échelle des études-SMU sont attribuées aux polygones des fichiers vecteurs et projetés dans QGIS pour le croisement avec les données patrimoniales.

4.3.1.3.1 Vecteur-SMU

Vecteur-SMU est une agrégation des propriétés des STU par moyennage des valeurs des STU pondéré par leur surfaces relatives dans la SMU. Ce sont ces valeurs moyennes-pondérées qui sont ensuite attribuées aux points-bâtiments. Cette méthode est celle employée par Lemercier et al. (2022).

Puis, chacun des fichiers cartographiques .shp des RRP agrégés sont fusionnés, et les propriétés de la SMU sont attribuées à chaque polygone en vue du croisement avec les points-bâtiments. On a donc dans chaque polygone, les informations relatives à la SMU et les informations des propriétés pédologiques extraites à -45cm puis moyennées-pondérées.

4.3.1.3.2 Vecteur-STU

Vecteur-STU est une méthode d'extraction consistant à sélectionner la valeur d'un STU aléatoirement dans la SMU, dans un choix aléatoire pondéré par la surface relative des STU dans la SMU.

Pour des questions de simplicité technique, cette extraction est réalisée en pratique a posteriori de l'extraction du numéro de la SMU pour chaque point-bâtiments. L'identifiant SMU extrait au niveau du point permet de relancer l'algorithme d'agrégation des propriétés au niveau de la SMU, cette fois en choisissant une agrégation aléatoire-pondérée plutôt que moyennée des valeurs des STU.

Initialement, cette méthode d'extraction a été réalisée dans l'objectif de voir si le flux de traitement des données en était simplifié. On supposait que l'effet serait statistiquement semblable que la moyenne pondérée vecteur-SMU pour de grands jeux de données. Mais en pratique, l'extraction aléatoire donne des résultats différents lorsque l'on ne réalise pas des traitements par « moyennes » et qu'on regarde la distribution des valeurs (Chapitre 3B, 4.3.2).

4.3.2 SoilGrids

Les données sont extraites du serveur via une délimitation spatiale prédéfinie (dimensions de la France hexagonale), et enregistrées localement.

Comme pour DoneSol3, la somme des variables granulométriques est calculée et modifiée si nécessaire.

Comme pour raster-STU, c'est la valeur de la couche 30-60cm qui est retenue pour chaque propriété (Figure 60).

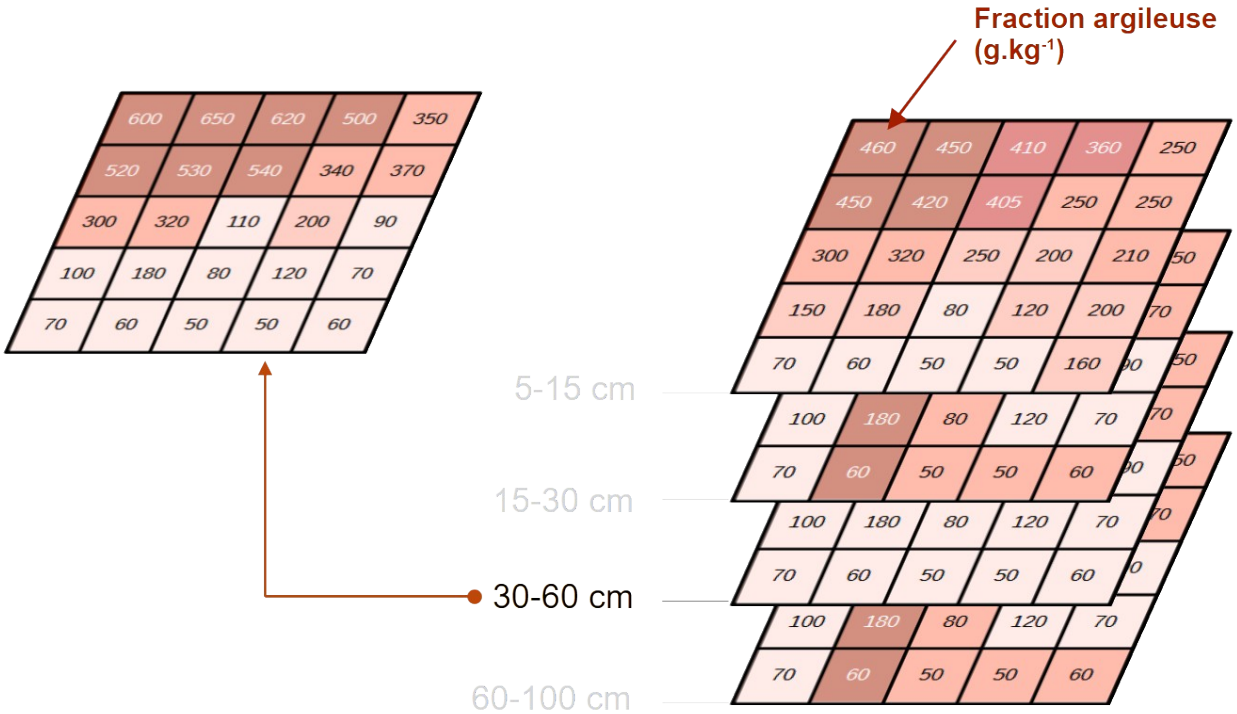


Figure 60 : Schéma récapitulatif des méthodes de transformation des données SoilGrids et GlobalSoilMaps. Ces bases de données sont constituées d'un ensemble de couches raster pour chaque propriété pédologique. C'est la couche 30-60cm est celle qui est gardée.

4.3.3 GlobalSoilMaps

Les fichiers ont été obtenus gracieusement auprès des producteurs (Arrouays et al. 2014).

Comme pour DoneSol3, la somme des variables granulométriques est calculée et modifiée si nécessaire.

Comme pour raster-STU, c'est la valeur de la couche 30-60cm qui est retenue pour chaque propriété (Figure 60).

5 Données patrimoniales géolocalisées

Évaluer l'impact des propriétés du sol, et donc a priori des terres à bâtir, sur les choix techniques réalisés pour le bâti pré-industriel, nécessite de disposer de données spatialisées décrivant le patrimoine bâti. Pour cela, nous avons exploré plusieurs sources de données possibles à différentes échelles territoriales. Celles-ci décrivent des bâtiments composés de terre crue, mais parfois également des bâtiments du bâti historique non bâti en terre crue.

En effet, l'occurrence du bâti en terre n'est pas une donnée suffisante pour une bonne évaluation de la relation entre sol et choix préférentiel technique : une densité relative aux autres techniques de construction doit être évaluée (2.4).

Trois formats de données dites « de densité », représentant la « densité bâtie » ont été utilisées :

- Les données « tous matériaux » du service de l'inventaire du patrimoine de Bretagne ;

- la couche vectorielle des bâtiments OpenStreetMap contemporains ;

- pour les données « transects », les bâtiments OpenStreetMap filtrés par une analyse de visibilité au cours de l'observation de terrain.

De plus, une couche de pseudo-bâtiments aléatoirement distribués sur la zone d'étude a été intégrée aux calculs du modèle afin de représenter proportionnellement la distribution des propriétés pédologiques de la zone (bâti « Aléatoire »). L'ensemble des algorithmes de traitement des données est publié en accès libre (Verron-Guillemot 2025).

5.1 Terre : liste des sources

Les différentes sources de données de patrimoine bâti géolocalisé que nous avons eu à notre disposition pour cette étude sont listées dans le Tableau 8. Ces différentes sources totalisent 14612 bâtiments géolocalisés, dont 7892 comprenant de la bauge, 831 du pisé, 4524 des briques moulées, et 1365 du torchis. Les échantillons sont localisés en France métropolitaine, et distribués majoritairement dans 6 des 18 régions métropolitaines et 21 des 96 départements métropolitains. La distribution de ces données permet une bonne représentativité des zones du territoire français métropolitain où le patrimoine bâti en terre crue est présent en grande quantité : le grand ouest (Bretagne, Normandie, Loire-Atlantique), l'Occitanie autour de la région toulousaine, la vallée du Rhône et la Limagne, l'ancienne région Champagne-Ardenne.

catégorie	Référence/Origine	Période de collecte	Zone géographique	Techniques constructives	Nombre d'échan-tillons par technique	Méthode d'échan-tillonnage/ données de densité
interne	Aras 2024	2021-2024	Champagne-Ardennes	bauge; pisé; briques moulées (dont damier; dont en remplissage de pan de bois); torchis	206; 2; 3585 (6; 423); 831	Transect
	Campagnes de relevés réalisée pour cette étude	2020-2023	Ille-et-Vilaine et Pays de la Loire	bauge; torchis; enduit	187; 2; 3	
			Occitanie	bauge; pisé; adobes (dont damier; dont remplissage pan de bois); torchis (dont quenouilles)	25; 31; 417 (51; 6); 130 (2)	
			Limagne	bauge; pisé; adobes; torchis; enduit	11; 737; 117; 2; 1	
Total "transects"				bauge; pisé; adobes (dont damier; dont remplissage pan de bois); torchis (dont quenouilles); enduit	429; 770; 4119 (57; 429); 965 (2); 4	
interne	(Rojat et al. 2020)	?-2020	Rhône-Alpes	pisé	22	analyses matériau
	autres collectes indépendantes	2021	Occitanie	adobes; torchis	24; 1	non
		2023	Eure-et-Loire	bauge	56	non
externe-terre	(Miranda Santos & Daubas 2019)	2018-2019	Loire-Atlantique	Bauge	184	non
externe-terre	Pustoc'h 2022	2015-2022	Région Bretagne	Bauge (dont caillebotis) ; torchis	1615 (75);10	Exploration systématique
externe-généraliste	Service du Patrimoine de Bretagne	1980-2022	Région Bretagne	Bauge (dont caillebotis); torchis (dont quenouilles)	7218 (74);373 (19)	Densité vernaculaire
externe-généraliste	CAUE Tarn	?-2022	Tarn	Pisé, briques moulées	36;2	(densité vernaculaire)
externe-généraliste	Service du Patrimoine du Bas Quercy	?-2021	Bas Quercy, Tarn et Garonne	Bauge; Pisé; Brique moulée ; Torchis	5; 3;379 ;16	(densité vernaculaire)
Total				Bauge; Pisé; Brique moulée ; Torchis	7892; 831; 4524; 1365	=14612

Tableau 8: Sources de données décrivant le bâti terre géolocalisé agrégées pour cette étude.

Ce travail fut aussi l'occasion de faire l'état des lieux sur les bases de données patrimoniales spatialisées contenant des informations sur des bâtiments en terre. Nous avons également identifiées plusieurs bases de données potentielles que nous n'avons pas exploitées, pour des raisons d'accessibilité de la donnée et/ou de temps de traitement :

- « cartoterra »[42] est une base de données en ligne participative. Elle semble peu active mais contient une certain nombre d'informations concernant des bâtiments géolocalisés, dont la qualité reste à évaluer [note: au 14/05/2024, elle semble ne plus être en ligne]

- Les services de l'inventaire du patrimoine : d'autres régions doivent disposer des bases de données d'inventaire du patrimoine bâti. Nous les avons obtenus pour trois régions, mais ces bases ont un gros potentiel et pourraient être explorées.

- Certaines publications sont illustrées de cartographies qui semblent avoir mobilisé de grandes quantité de données. Par exemple, Klein (2011) propose une cartographie des zones bâties en

42 http://craterre.org/actualites:lancement-de-cartoterra/

différentes techniques relativement précise. Mille (2023) a identifié plusieurs dizaines de bâtiments en pisé dans la ville de Lyon. Le laboratoire CRAterre dispose probablement également de bases de données décrivant le pisé en région Rhône-Alpes[43], mais n'a pas répondu a nos sollicitations.

- Les diagnostiques de performance énergétique (DPE) désormais obligatoires en France pour la location d'un logement renseignent la composition des murs des bâtiments analysés. Une exploration rapide de ces données révèle que de nombreux bâtiments sont identifiés comme « terre », « bauge » ou « pisé ». Cependant on peut s'attendre à ce que ces identifications soient souvent hasardeuses ou erronées car l'identification d'un matériau terre crue n'est pas toujours aisée : nous avons vu que même dans les bases de données des services du patrimoine, des erreurs de terminologie sont courantes. En revanche, cette base de données pourrait servir à une exploration préalable du territoire pour identifier des zones bâties en terre non repérées jusqu'alors.

Ces bases de données pourront être explorées dans des travaux ultérieurs.

5.2 Tri et formatage des données terre au format de la base de données : type de sources et transformation associée

Les données de patrimoine géolocalisé de chaque source sont triées, formatées et regroupées dans une base commune. Un algorithme (Verron-Guillemot 2025) est écrit afin de réaliser ce travail de tri et de concaténation. Le format de la base de données a été testé et amélioré progressivement au cours du travail de thèse afin de s'adapter aux besoins spécifiques d'une base de données décrivant des bâtiments composés de terre crue (5.4).

Selon les transformations et vérifications ayant été nécessaires pour chacune des sources de données, nous pouvons les regrouper en 3 catégories, comme renseignées dans le Tableau 8.

- Données internes au laboratoire (cf. Transects de collecte de données : bâtiments en terre crue, p.197): ces données ont été collectées au cours de la thèse en utilisant différentes versions d'un formulaire de collecte créé pour l'occasion et amélioré à l'usage (Annexe II).
    - Transformation : Le format du formulaire a évolué au cours des sessions de collecte, améliorée par le retour d'expérience. Une tracabilité des évolutions successives du formulaire a permis de maintenir une continuité de compatibilité entre les données des différentes versions. Quelques transformations ont été réalisées: certains noms de champs ou dénomination de techniques sont modifiés, et pour les collectes ayant utilisé les premières versions du formulaire, c'est même l'architecture de stockage des données a été modifiée.
    - Qualité : Les règles de dénomination des techniques sont connues. La localisation du point est située exactement sur le bâtiment concerné.
    - Informations supplémentaires: La plupart de ces données sont issues de transects dont le tracé géolocalisé a été enregistrée, ce qui permet l'évaluation de densité présentée en 5.3.3.3 .
- Données externes-terre: ces données sont fournies gracieusement par des spécialistes de la construction en terre crue.
    - Transformation : la transformation nécessaire pour l'intégration des informations dans la base de données globale est spécifique aux bases de données fournies.

43 Voir par exemple la carte des communes où du pisé a été recensé en région Rhone-Alpes https://terrespise.hypotheses.org/cartographies/cartographie-du-bati-ancien-en-pise-en-auvergne-rhone-alpes

- Qualité : Les règles de dénomination des techniques sont connues. La localisation du point est généralement située sur le bâtiment concerné ou à proximité immédiate.

- Données externes-généralistes: ces données sont obtenues de bases de données publiques ou fournies gracieusement par les services d'étude du patrimoine de différentes régions.
  - Transformation : Pour ces sources de données, le tri est effectué principalement selon une recherche des termes décrivant la présence des différentes techniques de terre crue (« pisé », « torchis », « bauge » »...). Dans tous les cas, la sélection est choisie de manière à visibiliser l'incertitude : par exemple, lorsque le terme « pisé » est employé, on attribuera la technique « bauge » si la localisation est située en Bretagne ou en Loire-Atlantique, car à notre connaissance aucun bâtiment en pisé n'a été identifié dans la région. Sur le reste de la France, la technique «terre massive indéterminée» serait attribuée au bâtiment. Pour les données du Service du Patrimoine de Bretagne, un tri particulier est réalisé afin d'obtenir des données de densité Vernaculaire (5.3.2.1).
  - Qualité : La localisation du point est généralement située sur le bâtiment concerné ou à proximité immédiate. Les règles de dénomination des techniques ne sont pas connues. Les enquêteur.ices ayant renseigné les données ne sont généralement pas des spécialistes de la construction en terre crue, on observe donc une forte variabilité de dénomination de ces techniques. Les descriptions les plus récentes semblent plus fiables. Particulièrement, le mot « pisé » semble avoir dominé les autres dans la description de toute technique de terre crue, un fait par ailleurs remarqué dans la littérature, en France hexagonale comme au proche-orient

    Dans la base de données du Service du Patrimoine de Bretagne, les termes « pisé » et « torchis » peuvent tous deux désigner alternativement des techniques de bauge et de torchis. Un exemple provenant de la description d'un bâtiment en bauge type « caillebotis », parfois confondus avec des adobes : « présence d'adobe (pisé) en pignon ouest » (Service du Patrimoine de Bretagne 2004)).

5.3 Détail de la transformation des données terre et densité, par source

Les sources de données mobilisées ont des architectures différentes. Pour les employer conjointement dans des traitements statistiques, il convient d'homogénéiser le format dans un format unique. Des transformations sont alors réalisées.

Toutes les catégorisations et transformations proposées n'ont pas été mobilisées dans les croisements de données réalisés par la suite (Chapitre 3B). Elles alimenteront cependant la future base de données collaborative en cours de mise en place (voir Annexe II).

5.3.1 Transects de collecte de données : bâtiments en terre crue

Plusieurs campagnes de relevés cartographiques de bâtiments vernaculaires composés de terre crue ont été réalisées dans le cadre de cette étude. Certaines d'entre elles (Rinino 2021a; Cannat 2022; Aras-Gaudry et al. 2023) ont été réalisées à l'occasion d'autres études de terrain réalisées au sein du laboratoire.

Les objectifs de ces collectes sont les suivants :

- obtenir plus de données que celles obtenues via nos partenaires, afin d'améliorer le traitement statistique;

- obtenir des données de qualité suffisante et dont la variabilité est connue ;
- traverser une diversité de régions pédologiques afin d'avoir un maximum de représentativité des types de sols français. En effet, les bases de données obtenues contiennent beaucoup d'échantillons mais parfois sur des territoires réduits.
- obtenir une source de données permettant d'évaluer la densité bâtie globale afin d'évaluer une densité relative bâtie en terre et éviter le biais d'installation préférentielle (3.3). Une méthode d'évaluation de la densité bâtie est proposée à partir de la trace GPS du transect réalisé (5.3.3.3).

5.3.1.1 Outils numériques et données collectées

La méthode de collecte proposée a pour objectif de permettre la saisie rapide d'un grand nombre d'échantillons. Nous la décrivons en détails ici, mais elle a déjà été résumée dans une publication de Aras-Gaudry et al. (2023).

L'application pour appareils électroniques nomades Qfield est utilisée sur une tablette tactile sur le terrain. Elle permet la saisie de données dans une interface simplifiée de QGIS et la synchronisation avec un projet QGIS sur l'ordinateur.

Des données sont chargées pour servir de « fond de carte » : la carte OpenStreetMap qui se charge en temps réel via une connexion internet, ainsi qu'une extraction dans la région d'étude des polygones « bâtiments » et « routes » de la base de données OpenStreetMap enregistrée dans le stockage de l'appareil, afin d'avoir un support en cas de coupure d'accès au réseau.

Les données sont collectées directement dans une base de données au format BDD-terre-crue (5.4), via un formulaire de saisie personnalisé. Si possible, lors de la création d'un point, on le positionne à l'intérieur du polygone de bâtiment OpenStreetMap correspondant au bâtiment observé. Le formulaire s'ouvre : certains champs se remplissent automatiquement : date-heure de création du point, localisation. D'autres sont saisis par l'enquêteur.ice : techniques de constructions observées, orientation/exposition des murs, et autres variables d'intérêt selon les besoins des études. Certains champs sont prévus pour la saisie de la qualité des données ou d'informations complémentaires sur le bâtiment : approximation du positionnement du point, incertitude de la technique décrite, commentaire général.

La trace du parcours effectué est enregistrée en continu au cours de la collecte. Qfield propose une méthode d'enregistrement de la trace, mais celle-ci est gourmande en capacité de calcul et a fait crasher l'application plusieurs fois, sans possibilité de sauvegarde. C'est pourquoi nous avons utilisé l'application MyTracks, qui enregistre la trace en arrière-plan de l'application, ou sur un autre dispositif nomade. La trace enregistrée est composée de points reliés, enregistrés toutes les secondes. Pour chaque point, la vitesse et l'azimut de déplacement sont enregistrés. Le traitement des données de densité réalisé à partir de la trace est décrit en 5.3.3.3 .

La méthode de collecte est la suivante :

- dès lors que l'on décide le début du transect, on lance l'enregistrement de la trace. On observe attentivement tous les bâtiments visibles depuis la route.

- lorsqu'un bâtiment composé de terre crue est repéré, un point est créé sur le bâtiment concerné. Ses techniques de mise en œuvre sont identifiées. Si la position du bâtiment n'est pas certaine, l'entrée de formulaire « approximatif » est cochée. Pour les techniques identifiées qui ne sont pas « certaines »,

par exemple si une petite fraction seulement est visible sous un enduit fissuré, l'entrée de formulaire « incertain » est cochée. Nous avons cherché à faire un relevé exhaustif de ce qui était visible depuis la route, même dans les zones à forte densité, ce qui a parfois nécessité de revenir sur nos pas pour s'assurer de ne rien avoir raté.

- lorsque la fin du transect est décidée, l'enregistrement de la trace est arrêté. Les bâtiments repérés « hors trace » sont identifiés comme tels afin de ne pas influer sur l'analyse de densité.

Le nombre d'observateur.ices présent.es dans le véhicule étaient variables : de 2 à 5 (y compris la conducteur.ice) selon les transects. Au moins un.e des observateur.ices est munie de jumelles. Dans la mesure du possible, les rôles étaient distribués dans l'équipe, comme décrits dans le travail de (Cannat 2022):

- un.e conducteur.ice, « concentré.e sur la conduite et la vitesse de prise de donnée dans l'équipe », ralentissant ou s'arrêtant si la densité d'édifice sature la prise de donnée ;

- un.e co-pilote, « en charge de l'itinéraire » ;

- un.e enquêteur.ice, « en charge de la prise de données dans le formulaire sur tablette sur le logiciel QField »

- un.e photographe et/ou dessinateur.ice, « avec un appareil photo synchronisé à la tablette pour lier *a posteriori* les images prises au nom attribué au point recensé ».

Dans un contexte d'évaluation de l'outil de cartographie pour un usage collaboratif futur, nous avons dans la mesure du possible interverti les rôles au cours des journées, « afin que chacun puisse évaluer l'outil "formulaire" sur la tablette et puisse émettre un avis sur sa malléabilité et les ajustements à lui apporter pour une meilleure pertinence et fluidité dans les prises de données futures. » (Cannat 2022)

5.3.1.2 Choix du transect

La collecte de données sur le terrain s'est effectuée principalement en voiture par souci de rapidité[44], à l'exception des bourgs de villages que nous avons explorés à pied. L'itinéraire est pré-tracé puis adapté sur le terrain. Par exemple, en Limagne, « les parcours pressentis établis avant le départ ont évolué quotidiennement pour s'adapter aux découvertes faites sur site et à la topographie en ne perdant pas de vue l'objectif premier, traverser de part en part la plaine de la Limagne pour formuler un premier visage représentatif des techniques rencontrées » (Cannat 2022).

L'évolution du parcours a pu être influencée par plusieurs objectifs :

- circuler au niveau des « limites » de zones de présence du patrimoine bâti des différentes techniques de terre crue porteuse. Les techniques-types de torchis ne sont pas pris en compte dans ces évaluations.
- traverser des paysages variés : topographie, composition pédologique, densité de bâtiments.
- Circuler dans des directions variées : nord/sud/est/ouest, car pour des raisons d'intempéries, les murs composés de terre crue sont parfois orientés préférentiellement vers certains azimSTU
- Éviter tant que possible les voies rapides pour pouvoir circuler lentement sans risques, éviter les voies non carrossables.

44 Sans commentaires…

Traverser à la fois des zones de présence du patrimoine bâti de techniques variées, et des zones à proximité sans patrimoine bâti, permet de s'assurer que l'on reste dans une zone où la connaissance de l'existence de ces techniques est probable. Ainsi, le fait qu'elles n'aient été choisies par les constructeur.ices témoigne d'un choix préférentiel.

En pratique, on se base préalablement sur les cartographies du patrimoine existantes. L'exploration commence au niveau d'une « limite » décrite dans la littérature (par exemple celle proposée dans *Terra Europae* (Figure 14, (Dipasquale et al. 2011)). Puis, l'itinéraire se rapproche du « cœur de zone », jusqu'à effectivement rencontrer des bâtiments composés de terre crue. Lorsque plusieurs bâtiments ont été rencontrés, nous bifurquons d'environ 90°, pour avancer parallèlement à la limite supposée. Si nous continuons à voir des bâtiments composés de terre crue, alors nous bifurquons de nouveau de 90°, vers l'extérieur de la zone supposée. Une fois que nous ne rencontrons plus de bâtiments composés de terre crue, nous bifurquons dans l'autre sens, pour longer la limite par l'extérieur, puis, en l'absence de nouvelle observation de bâti composé de terre crue, nous tentons de re-rentrer dans la zone. Ainsi de suite, cette méthode permet de circuler en « limite » des zones de distribution du patrimoine en terre sur un territoire, en réalisant des « créneaux », à cheval sur la limite.

Il est à noter que la limite observée n'est valable que pour la zone effectivement observée. Il n'est pas impossible que des zones « isolées » de bâtis composés de terre crue existent au-delà de l'exploration réalisée. Cependant, l'objectif de ce travail est moins la délimitation de la zone que l'exploration de zones de rupture de la continuité du patrimoine bâti en terre crue : c'est dans ces zones que nous pensons rencontrer à la fois des sols « convenables » et des sols « limitants ».

5.3.1.3 Limites de la méthode

5.3.1.3.1 Repérage des bâtiments

L'objectif d'exhaustivité du repérage des bâtiments visibles a pu être influencé par plusieurs paramètres :

- le nombre de personnes dans le véhicules attentifs au cours du repérage, leurs compétences de repérage et reconnaissance des techniques de terre.
- La vitesse et le moyen de circulation.

Ces biais de repérage sont probablement minimes dans la mesure où la vitesse de collecte s'adaptait à l'intensité de présence du patrimoine (Aras-Gaudry et al. 2023).

Cependant, il reste possible que de légers biais subsistent, par exemple :

- dans les zones à forte densité bâtie en terre crue, nous sommes moins sensibles à des bâtiments très loin en arrière plan car l'abondance et l'intensité du relevé baisse la vigilance.

- repérer un bâtiment en terre incite à explorer les alentours plus en détail pour en dénicher d'autres. A l'inverse, dans les zones à densité visible nulle pendant plusieurs kilomètres, la vigilance peut également baisser par supposition qu'il n'y en a pas : on ne regarde pas la moindre faille dans un enduit ciment… Cependant, nous étions attentifs à arrêter le protocole (stopper l'enregistrement de la trace) lorsque nous souhaitions réduire la vigilance, ce qui a pu réduire ce biais.

5.3.1.3.2 Visibilité des bâtiments

La visibilité des bâtiments elle-même est inévitablement imparfaite :

- Les obstacles à la vision : autres bâtiments, couvert végétal, topographie, météo

- la position de la technique dans le bâtiment : nous avons souvent observé une présence ou visibilité de la terre plus importante dans les façades arrière ou latérales que dans les façades sur rue, pourtant la plus visible pour nous. Du fait d'une hiérarchisation dans la représentation* symbolique des matériaux, nous avons vu que la terre était souvent masquée et pouvait être employée exclusivement dans les cloisons intérieures. Il est rare que nous ayons pu pénétrée dans les bâtiments pour voir les murs intérieurs.
- La direction de déplacement relativement à l'orientation des intempéries majoritaires : dans toutes les régions étudiées, le matériau terre a semblé être moins fréquemment employé pour les façades exposées (Aras-Gaudry et al. 2023), ou plus fréquemment protégé par des enduits ; un constat partagé dans la littérature (Marfaing et al. 2000). Durant l'observation, nous remarquons moins aisément les éléments apparaissant derrière nous, ce qui fait que lorsque la circulation se fait dans le sens des intempéries majoritaires il est probable que le repérage des bâtiments en terre soit moins efficace (Aras-Gaudry et al. 2023).
- La présence d'enduits (chaux, ciment) interdit bien souvent l'identification de la technique. Cela est remarqué par de nombreux enquêteur.ices dans l'étude du patrimoine bâti en terre crue (Ford 2002).

  Particulièrement en milieu urbain, ceux-cis sont souvent plus souvent « entretenus » et laissent rarement entrevoir la terre sous-jacente, un phénomène également remarqué par (Mileto et al. 2019).
- On peut également considérer dans la « visibilité » des bâtiments la destruction progressive du patrimoine bâti, ne laissant comme témoins que quelques édifices. En presqu'île de Guérande, Hilton (2016) montre que plus de 70 % du bâti historique présent sur la carte de l'Etat-Major a disparu. Mais il apparaît que la destruction impacte autant le patrimoine bâti en terre qu'en pierre. On peut cependant suggérer que cette destruction est plus conséquente pour le patrimoine le plus ancien, donc les cultures constructives plus anciennes. Cela pourrait expliquer la moindre présence de la bauge, dont les cultures constructives ont pu être remplacées par l'adobe ou le pisé dans certaines régions. Dans ce cas cette moindre occurrence serait donc « artificielle » et non liée aux potentiels de la terre locale. (Mileto et al. 2019) soulignent également que le patrimoine est plus fréquemment détruit dans les zones urbaines, s'ajoutant au manque de visibilité lié au masquage des matériaux du gros œuvre.

Dans les zones où les bâtiments sont moins visibles pour cause de topographie ou de densité de bâtiments, la densité apparente est impactée si l'on ne limite pas aussi le nombre de bâtiments non-terre proportionnellement. Pour cela, a partir de la trace, une estimation de la visibilité des bâtiments alentours est réalisée (5.3.3.3). Celle-ci ne prend cependant pas en compte le masquage engendré par le couvert végétal.

5.3.1.3.3 Identification de la technique

Notre expertise de la reconnaissance de la diversité des techniques-types de terre crue a parfois été limitante dans l'identification de certaines techniques avec certitude. En effet, la différentiation des techniques de bauge et de pisé, par exemple, est souvent source d'erreurs d'identification dans le patrimoine vernaculaire (Cammas 2018). Cependant, dès lors que nous n'étions pas certains de l'identification d'une technique, nous avons gardé la trace de cette incertitude de deux manières :

- pour une incertitude légère, souvent liée à l'inaccessibilité de l'information, nous cochons la variable « incertain » qui permet un tri a posteriori dans la base de données si nécessaire ;

- pour les incertitudes fortes, nous avons apporté aux dénominations des techniques-types de terre crue des noms intermédiaires : « terre indéterminé » ou « terre massive indéterminée ».

5.3.2 Service du patrimoine de Bretagne : bâtiments « Vernaculaires » et bâtiments « terre »

Depuis 1964, historiens et architectes du Service du Patrimoine Culturel de Bretagne réalisent un inventaire systématique du patrimoine culturel et alimentent une base de donnée régionale (Service de l'Inventaire du patrimoine culturel de Bretagne 2023).

Cette base de données est traitée afin d'en extraire l'ensemble des bâtiments vernaculaires* ainsi que les bâtiments composés de terre crue. Dans l'ensemble, le traitement est similaire à celui réalisé par (Hamard et al. 2018). Les critères de tri sont cependant affinés par l'emploi d'un algorithme d'évaluation de la qualité de tri.

5.3.2.1 Tri des données « Vernaculaires »

Les différentes tables composant la base de données sont extraites et fusionnées afin d'obtenir une seule base comprenant toutes les données patrimoniales : 112 992 entités (contre 113 824 pour Hamard et al.). Ces données comprennent des entités qui ne sont pas des bâtiments, et des bâtiments composés de matériaux industriels. Les bâtiments Vernaculaires sont sélectionnés par le tri suivant :

- suppression des entités aux coordonnées géographiques erronées

  entités restantes : 112 816 (-176)

- élimination des entités dont le champ « matériau_murs » comprend un matériau industriel : "béton", "acier", "brique creuse", "verre", "fer", "ciment"

- élimination des entités dont toutes les datations sont postérieures à 1950

  entités restantes : 64 056 (-48 760)

- sélection des entités dont la dénomination correspond à un bâtiment. Les dénominations valides ont été sélectionnées parmi toutes celles existantes dans la base de données : 'ferme', 'maison','grange', 'étable', 'demeure', 'fournil','chapelle', 'mur de clôture', 'dépendance','porcherie','manoir', 'moulin','relais de poste','demeure','communs','village', 'cellier', 'remise', 'cabane', 'écart', 'grange', 'halle', 'logis','forge', 'magasin de commerce', 'auberge','café','restaurant', 'bourg', 'prieuré','école','restaurant', 'remise agricole', 'mairie','hôtel de voyageurs', 'atelier', 'boutique','boulangerie', 'hospice', 'tannerie','alignement'

  entités restantes : 49 515 (-14 550)

Après traitement, il reste 49 515 entités identifiées comme bâtiments *Vernaculaires* (contre 48 230 pour Hamard et al. (2018)).

5.3.2.2 Tri des données « terre »

Pour la sélection des bâtiments composés de terre crue, un algorithme de tri est créé et amélioré par comparaisons successives à un échantillon vérifié systématiquement :

5.3.2.2.1 Vérification systématique d'un échantillon

Une vérification systématique est réalisé sur un échantillon de 1195 (2.4%) bâtiments issus de la base de données triée. Afin de ne pas avoir à vérifier un trop grand nombre d'échantillons, un pré-tri est réalisé sur les données, sur la présence des termes « bauge », « terre », « torchis » dans les champs

textuels de la base de données. Puis, parmi les données pré-triées, on évalue, bâtiment par bâtiment, la présence de techniques de terre crue.

Il est à noter que les 1195 bâtiments n'ont pas été sélectionnés aléatoirement, mais triés dans l'ordre du nom de l'enquêteur.ice. Cela a facilité la rapidité de la vérification, car après plusieurs bâtiments vérifiés pour un.e enquêteur.ice, on connaît mieux la manière d'étudier le bâti de cette personne et on sait généralement à quoi s'attendre dans la vérification de données. Le biais engendré pour la vérification de qualité de tri est probablement négligeable.

Un programme d'aide à la vérification est créé pour l'occasion. Il permet de visualiser pour chaque bâtiment de l'échantillon (Figure 61) :

- les champs de description du bâtiment, avec les termes « terre », « bauge », « torchis », « pisé », « quenouilles » (voir Annexe II), « tangue » (voir Annexe II) mis en valeur pour les repérer dans le texte ;
- un lien cliquable vers le dossier en ligne du bâtiment, afin de visualiser les photos
- les noms des enquêteur.ices

Lors de ce tri, les techniques de bauge, de torchis, et de planchers quenouilles ont été identifiées. Pour la bauge, une distinction est faite lorsque les « pains » sont distinguables de la masse, correspondant à la technique appelée « caillebotis ».

Le tri visuel a aussi été l'occasion d'évaluer un critère d' « importance architecturale» de la terre dans le bâtiment. Lorsque la terre était visible sur une photo, un critère de nombre d'étages est évalué. Ce critère d'importance pourrait permettre d'évaluer une analyse de convenance basée sur une résistance mécanique hypothétique, cependant nous n'avons pas pu exploiter les données pour l'instant.

Dans la fenêtre du programme (Figure 61), après vérification des champs et photos, des cases à cocher sont prévus pour sélectionner :

- les techniques présentes
- la certitude de présence des techniques
- le nombre d'étages qu'elles représentent dans le bâtiment

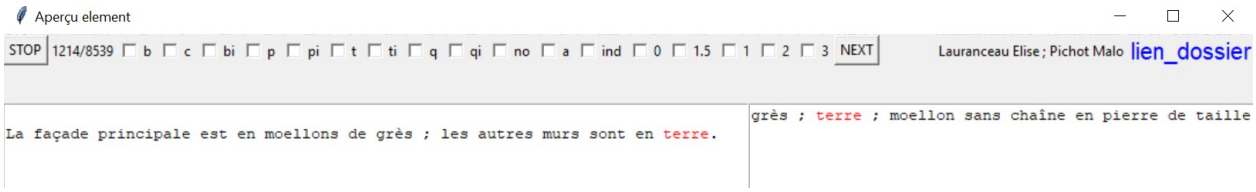


Figure 61: Fenêtre de visualisation des propriétés d'un élément de la base de données de bâti vernaculaire. Les cases à cocher sont les « techniques-types », avec ou sans incertitude (i) ; ainsi que des cases de catégories de « hauteur des murs en terre » (en nombre d'étages) lorsque la photo permet de le vérifier. Le bouton "lien_dossier" permet d'ouvrir la page du bâtiment du site de l'inventaire afin de vérifier des photos lorsque le texte n'est pas assez explicite.

La vérification systématique est interprétée de manière à valider les entités uniquement lorsqu'il est certain qu'elles contiennent effectivement la technique validée. L'interprétation a été réalisée de la manière suivante :

- si la technique est visible dans une des photos, elle est validée ;

- Sinon :
  - si les termes spécifiques à la technique de terre (autres que « terre ») sont présents dans un champ et qu'il est vraisemblable qu'il s'agisse de cette technique, elle est validée. « Pisé », « tangue » sont validés comme « bauge ». Parfois, « torchis » est validé comme « bauge » selon le contexte.
  - Si le terme « terre » est présent :
    - si le contexte clarifie le terme, la technique est validée ;
    - si de nombreux bâtiments recensés par l'enquêteur.ice du bâtiment permettent d'assurer que cet.te enquêteur.ice est compétent.e, alors la technique est validée comme pour les autres bâtiments.



Figure 62: Entrée dans le programme :
a. technique = caillebotis-certain, hauteur = 1 ; b. technique = caillebotis-certain, hauteur = 1.5 ; c. technique = bauge, hauteur = 0 ; d. technique = bauge, hauteur = 0

Quelques exemples de bâtiments et des catégorisations associées sont présentés sur la Figure 62.

5.3.2.3 Création et amélioration de l'algorithme de tri

Le filtre de l'algorithme de tri est basé principalement sur la terminologie renvoyant aux techniques présentes dans différents champs. 3 techniques sont finalement distinguées dans le tri : « bauge », « quenouilles », « torchis », les « caillebotis » n'étant distinguable qu'a partir des photos. Pour chacune

de ces trois techniques, le tri est réalisé sur les champs textuels de la base de données, en repérant les expressions évoquant ces techniques.

On améliore l'algorithme par répétitions de la séquence suivante :

- Modification de l'algorithme de tri
- Lancement du tri
- comparaison des résultats du tri aux résultats précédents via des indicateurs (ci-dessous)

Pour chaque technique, on calcule 5 indicateurs. « positif/négatif » désigne le tri automatique, « vrai/faux » désigne la valeur vérifiée systématiquement:

- le nombre total de bâtiments où la technique a été identifiée automatiquement
- valide-positif (« vrai positif ») : bâtiments pour lesquels le filtre automatique détecte la technique, et la vérification manuelle aussi
- invalide-positif (« faux positif ») : bâtiments pour lesquels le filtre automatique détecte la technique, mais la validation manuelle l'invalide
- invalide-négatif (« vrai négatif ») : bâtiments pour lesquels le filtre automatique ne détecte pas la technique, et la vérification manuelle non plus
- valide-négatif (« faux négatif ») : bâtiments pour lesquels le filtre automatique ne détecte pas la technique, mais la vérification manuelle la valide.

Deux ratios sont aussi calculés pour faciliter la comparaison :

- valide-positif/tout positif (« qualité »): il représente la fraction de bâtiments qui sont effectivement de la technique, parmi tous les bâtiments positifs. Ce ratio est à maximiser si l'on souhaite que les données soient les plus « pures » possibles.
- valide-positif/tout vrai (« quantité ») = il représente la fraction de bâtiments de la technique qui ont été détectés par le tri, relativement à tous les bâtiments validés par vérification systématique. Ce ratio est à maximiser si l'on souhaite éviter de « perdre » des données de bâtiments en terre crue, quitte à avoir quelques faux positifs.

Pour chaque modification des critères de tri automatique, on vérifie ces indicateurs. Le critère de tri est gardé lorsqu'il augmente les ratios de qualité (valide-positif/tout positif) et/ou de quantité (valide-positif/tout vrai). Si ces deux critères évoluent inversement, l'appréciation est faite au regard de l'usage des données triées : dans le cas d'un tri visant à intégrer ces bâtiments dans la base de données collaborative BDD-terre-crue, les données devront être parfaitement triées, on maximisera l'indicateur de qualité ; dans le cas présent, il s'agit d'un traitement statistique : la qualité du tri peut être légèrement réduite si cela permet d'augmenter significativement la quantité de données.

Ainsi, on optimise les critères de tri textuels de manière intelligente et récursive. Il est à noter que des algorithmes dits « d'intelligence artificielle » pourraient également réaliser ce type de travail, mais ici, un tri sur des critères expert semble efficace et plus rapide à mettre en œuvre.

Les scores finaux de ces indicateurs sont les suivants :

RESULTS: bauge

Total number of bauge samples : 7254

valide-positif : 760

invalide-positif : 64

invalide-négatif : 242

valide-négatif : 30

valide-positif/tout positif = 0.92

valide-positif/tout valide = 0.96

RESULTS: torchis

Total number of torchis samples : 425

valide-positif : 28

invalide-positif : 15

invalide-négatif : 1035

valide-négatif : 18

valide-positif/tout positif = 0.65

valide-positif/tout valide = 0.61

RESULTS: quenouilles

Total number of quenouilles samples : 33

valide-positif : 3

invalide-positif : 0

invalide-négatif : 1088

valide-négatif : 5

valide-positif/tout positif = 1.0

valide-positif/tout valide = 0.38

Pour la bauge, 92 % des données identifiées comme « bauge » le sont réellement. C'est un gage de qualité pour l'utilisation de ces données dans les traitements suivants, car peu de bâtiments « erronés » viennent « polluer » les données. D'autre part, moins de 4 % des bâtiments en bauge sont « ratés » par le tri.

Il est à noter que le ratio valide-positif/tout positif était presque de 100 % lorsque le tri s'effectuait uniquement sur les termes « bauge », « pisé » et « tangue ». Cependant, c'est le nombre de bâtiments « ratés » qui était trop élevé. Ajouter des critères de tri faisant intervenir le terme « terre » a permis d'augmenter sensiblement la quantité de bâtiments repérés sans fortement faire décroître la qualité moyenne des données finales.

Pour le torchis, l'algorithme de tri n'a pas permis de séparer correctement les vrais positifs des faux positifs : le ratio de qualité n'est que de 65 %. Cela est probablement dû au fait que souvent, le terme

« torchis » est utilisé pour décrire de la bauge. 39 % des bâtiments composés de torchis ont été ratés par l'algorithme. L'expression « terre » ayant été attribuée à la bauge, il est possible qu'une partie significative des bâtiments composés de torchis ait été attribuée à la bauge. Cela est confirmé plus tard par l'observation cartographique des données triées : pour la bauge, les points « aberrants » sont vérifiés, et quelques uns sont effectivement identifiés comme du torchis.

Pour les quenouilles, les termes « quenouilles » et « barasseaux » recherchés dans les descriptions permettent une identification de très bonne qualité : 100 % des échantillons positifs sont effectivement des quenouilles. Cependant, la majorité des édifices composés de quenouilles ne sera pas repérée par le tri. Ici encore, une partie des quenouilles a pu être attribuée à la bauge ou au torchis, car pour décrire les quenouilles, les termes « terre » ou « torchis » ont pu être employés.

Le principal biais de ce travail est que la vérification systématique a été réalisée sur un échantillon déjà « pré-trié » des données Vernaculaires (afin de ne pas avoir à vérifier plusieurs milliers de bâtiments pour effectivement valider une centaine de bâtiments en terre). Les indicateurs de qualité ont pu être influencés par ce biais, mais nous estimons que celui-ci est peu conséquent.

Le fait d'avoir pu vérifier un plus grand nombre de bâtiments en terre a permis d'augmenter le nombre de bâtiments « certains » de la base de données générale de bâtiments en terre crue, qui seront déjà disponibles pour de prochaines études.

5.3.2.4 Fusion avec données vérifiées

Une fois l'algorithme de tri optimisé, la base de données complète est triée par l'algorithme. Pour les bâtiments qui ont été vérifiés pendant la vérification systématique, ce sont les valeurs de techniques vérifiées qui sont gardées. Les variables «Tn_INCERT » des techniques de ces bâtiments prennent la valeur « certain ». Pour les autres bâtiments, les variables prennent la valeur « incertain ».

Les 7 594 bâtiments composés d'une ou plusieurs techniques de terre crue (dont bauge : 7 254, torchis : 425, quenouilles : 33) sont enregistrés au format BDD-terre-crue puis ajoutés à la base de données.

Les 49 515 données Vernaculaires (bâtiments terre inclus) sont enregistrées pour être utilisées comme données de *densité bâtie.*

5.3.3 Données de densité : sources et transformations

Les données dites *de densité* sont des points géolocalisés représentant l'ensemble des bâtiments vernaculaires historiques, qui permettent la quantification de la densité des bâtiments composés de terre crue *relativement* à l'ensemble des bâtiments de la zone géographique, ou selon une propriété pédologique. En Bretagne, nous disposons des bâtiments Vernaculaires, dans le cas des données issues de bases de données patrimoniales comme le Service du Patrimoine de Bretagne. En revanche, en dehors de ce territoire nous n'avons pas accès à ces données et nous évaluons donc sur le territoire Breton le potentiel d'emploi d'autres données de *densité* : les données OpenStreetMap (OSM) contemporaines, brutes, ou triées par une analyse de visibilité dans le cadre des transects de terrain (5.3.3.3), et des points aléatoires sur la zone d'étude.

5.3.3.1 Toutes sources de densité : délimitation de la zone d'étude, distance de connaissance « D »

La première étape de sélection des points-bâtiments Vernaculaires, quelle que soit la source, est la délimitation dans l'espace de la zone d'étude. En effet, on a vu qu'un des facteurs de choix technique préférentiel est la connaissance de la technique localement, et son intégration potentielle dans les

schémas culturels locaux. Or, si l'on s'éloigne fortement d'une zone où l'on trouve effectivement des bâtiments d'une technique de terre crue, on peut supposer que leur absence n'est pas liée qu'aux sols mais à l'absence d'une culture constructive.

Il faut donc limiter la zone d'étude, d'où l'on extrait les données de densité bâtie *tous matériaux,* les données OSM et les points aléatoires. En pratique, la définition *a priori* d'une zone représentant la présence de la culture constructive est impossible : elle découle de facteurs sociologiques divers, et variables dans le temps et l'espace. D'autre part, elle n'est probablement pas la même pour toutes les techniques-types de construction en terre crue.

Parce qu'il faut bien faire un choix de délimitation préliminaire, nous faisons l'hypothèse d'une délimitation par une zone tampon autour des points-bâtiments composés de terre crue géolocalisés de la technique considérée, d'une distance D=30km. Cette distance pourrait correspondre à une journée à cheval ou à pied: au-delà de cette distance, il est difficile d'imaginer une transmission par l'exemple et la participation au chantier ou la visite de fermes (3.5.1). Nous réaliserons cependant une analyse de sensibilité sur ce paramètre, ce qui permettra éventuellement de l'optimiser (Chapitre 2B, 4.4.3).

Par ailleurs, la zone d'étude est limitée par les limites administratives du territoire français, afin de ne pas considérer de zone maritime. Pour l'analyse en Bretagne, toutes les données sont également limitées à la limite de la Bretagne administrative.

En pratique, cette zone limitera les données de densité bâtie *tous matériaux* provenant des bases SPbretagne ou OSM. Pour les données de « densité aléatoire », celles-ci seront directement échantillonnée dans la zone tampon définie.

5.3.3.2 Données OpenStreetMap (OSM)

Les données de la base de données cartographiques participative et en accès libre OpenStreetMap sont obtenues depuis les dépôts en ligne[45]. La couche de polygones vectoriels géoréférencée représentant les bâtiments sur le territoire français (couche « buildings ») est enregistrée localement sur un disque dur externe.

Pour l'emploi direct des données OSM comme données de densité, la couche vectorielle est transformée en couche de points en prenant le centroïde des polygones comme localisation pour chaque bâtiment. Puis, les entités sont filtrées selon la zone d'étude définie préalablement. Enfin, un échantillonnage aléatoire des bâtiments peut avoir été réalisé dans certains traitements, afin de ne pas manipuler des millions de points-bâtiments. En gardant un nombre d'échantillons conséquents (n = 25000), on pense que cet échantillonnage n'a pas d'impact statistique.

L'avantage principal des données OSM est leur disponibilité internationale et leur accessibilité. En revanche, ces données ont deux inconvénients majeurs pour notre étude :

- elles ne représentent pas directement les bâtiments vernaculaires historiques, mais les bâtiments contemporains. Or, nous avons vu que non seulement la construction de nouveaux édifices s'est considérablement accélérée depuis le début du 21ème siècle, et d'autre part l'installation des populations suit de moins en moins des critères liés à l'environnement non-artificialisé. En ce sens, les bâtiments OpenStreetMap sont composés d'une fraction de bâtiments pré-industriels dont la distribution dans l'espace et selon les variables pédologiques a pu être impactée par l'installation préférentielle (3.3) ; additionnée d'une fraction de bâtiments disposés plus aléatoirement par rapport

45 https://download.geofabrik.de/ (https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Planet.osm)

à ces règles d'installation initiales. On peut alors s'attendre à ce que les données OSM soient finalement un intermédiaire entre les données V*ernaculaires* et les données A*léatoires*.

- elles ne suivent pas la méthode d'échantillonnage des bâtiments en terre. Dans le cadre des bases de données issues des services du patrimoine, on peut considérer qu'il y a peu d'études ayant cherché à relever spécifiquement le patrimoine bâti en terre et que de ce fait, l'échantillonnage des bâtiments en terre suit les mêmes biais que les autres bâtiments et est éliminé dans le calcul d'un rapport de densité *relative*. En revanche, dans le cas des données OSM ou aléatoire, il n'y a aucun lien entre l'échantillonnage des données terre et des données de densité, donc pas de suppression *de fait* des biais potentiels.

5.3.3.3 OpenStreetMap : analyse de visibilité depuis le transect

Puisque OSM ne permet pas une prise en compte de l'échantillonnage du territoire comme le permettent les données *Vernaculaires*, nous avons développé une méthode permettant, à partir de l'enregistrement un parcours GPS des transects de collecte de données terre, de prédire numériquement quels bâtiments OSM ont été « vus » sur le terrain.

Grâce à cette méthode, nous disposons d'une densité bâtie relative qui représente plus finement la proportion de bâtiments en terre dans l'espace exploré, et selon les variables pédologiques de la zone, sans avoir à pointer sur le terrain l'ensemble des bâtiments observés (ce qui prendrait un temps considérable). Mais cela ne prend pas en compte la première limite des données OSM qui est la faible prise en compte de l'installation préférentielle.

Par exemple, dans une rue de village aux bâtiments mitoyens, seule les bâtiments ayant une façade donnant sur la rue sont considérés, et non l'ensemble des bâtiments des rues alentours ce qui change considérablement le nombre de bâtiments finaux. Cette analyse évite que l'ensemble des données collectées en zone urbaine soient considérées comme de « faible densité » alors qu'il s'agirait d'un « faible échantillonnage ».

5.3.3.3.1 méthode

Pour chacune des 3 techniques-types de construction en terre crue étudiées (bauge, pisé, adobes), après délimitation de la zone à la distance D=5km des bâtiments composés de la technique de terre étudiée, nous réalisons un traitement de « visibilité » des données OSM.

(1) Nettoyage des transects

Les transects GPS sont enregistrés sur le terrain dès lors que l'on décide d'entamer l'analyse exhaustive d'une zone. Un nettoyage est réalisé sur cette donnée afin de les préparer pour le traitement. Notamment, des « saSTU » du transect dans l'espace, rectilignes et en dehors du réseau routier, sont liés à un manque de réseau ou autre problème technique de l'enregistrement de la trace. Nous devons retracer le transect selon le parcours effectivement réalisé.

(2) Les bâtiments OSM sont limités à la zone d'étude définie, soit D=5km. Cela a l'avantage de réduire la quantité de données à traiter par l'algorithme.

(3) Une couche de données représentant l'altitude du sol est obtenue depuis la BD Alti[46]. Les différentes « tuiles » couvrant la surface d'étude sont sélectionnée manuellement en les projetant dans le logiciel, puis fusionnés en gardant la résolution initiale (5x5m).

(4) La couche de bâtiments OSM est rasterisée : chaque pixel dont le centre est situé sur un polygone bâtiment prend la valeur de hauteur théorique des bâtiments, initialement de h = 5m. Cette couche

46 https://geoservices.ign.fr/bdalti

raster est sommée au raster d'altitude. La résolution est choisie à cette étape, initialement de 5x5m. Plus la résolution est fine, plus les polygones de bâtiments sont représentés de manière réaliste par le raster.

(4) La trace GPS du parcours (trace orange) sert de point de référence pour un calcul de visibilité. En pratique, la trace au format vectoriel doit être transformée en un alignement de points permettant l'analyse de visibilité de l'algorithme depuis chacun de ces points. La distance entre les points est fixée à 5m, permettant une résolution suffisante pour un temps de calcul de visibilité raisonnable.

(5) L'analyse de visibilité est lancée, et produit un fichier raster dont la valeur binaire indique si le pixel est « vu » ou non depuis la trace GPS (Figure 63). Directement derrière les pixels qui ont reçu la hauteur d'un bâtiment, le raster n'est pas visible. Certains effets de la topographie peuvent également limiter le champ de vision.

(6) L'analyse de visibilité est ré-appliquée aux polygones OSM. Lorsqu'un bâtiment OSM a son centroïde sur un pixel « vu », alors le bâtiment est considéré comme vu ; et inversement.

Enfin, la couche de bâtiments OSM « vus » est sauvegardée sous forme de points afin de pouvoir être traitée comme donnée de densité pour les transects.

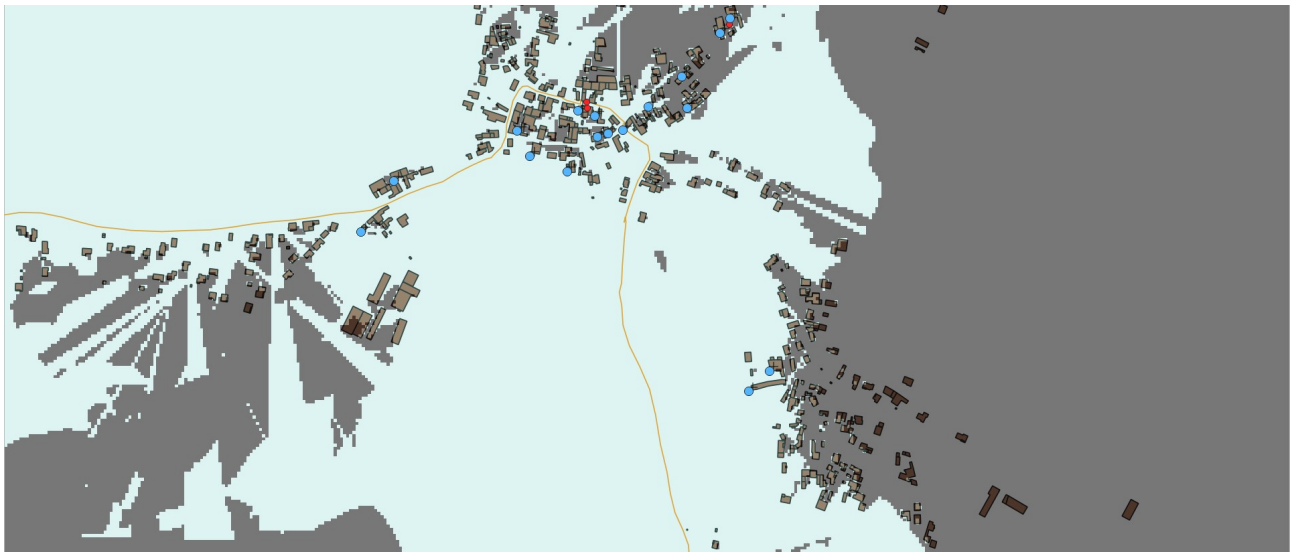


Figure 63 : résultats de l'analyse de visibilité des polygones OSM dans l'interface QGIS. La trace GPS est la ligne orange, les bâtiments OSM sont en gris, ceux composés de terre sont identifiés avec des points bleus (pisé) et rouges (adobes). La zone claire est le « champ de vision depuis le transect », la zone grise correspond aux zones invisibles. Les bâtiments dans la zone sombre sont ceux que l'analyse de visibilité identifie comme « invisibles » depuis le transect.

5.3.3.3.2 Analyse de sensibilité de l'analyse de visibilité

Plusieurs paramètres ont été choisis au cours de la création de cette méthode d'analyse de visibilité. Certains pouvant avoir un impact sur la qualité de l'analyse et sur ses résultats, une analyse de sensibilité et une optimisation de ces paramètres est réalisée.

Pour cette analyse, il a été nécessaire d'identifier quels bâtiments OSM accueillent effectivement un point géolocalisé de bâtiment en terre. Sur le terrain, nous avons volontairement placé les points GPS des bâtiments étudiés sur ces polygones afin de faciliter le traitement. Cependant, certains points, notamment positionnés sur des bâtiments en ruine, ne présentent pas de polygone OSM correspondant. Ces points sont donc d'une part, exclus de l'analyse de sensibilité ; d'autre part, dans

l'analyse de densité relative nous n'utiliserons pas la couche de bâtiments en terre filtrés par l'analyse de visibilité mais la couche de bâtiments relevée sur le terrain complète. La couche OSM-visible sera donc utilisée uniquement en tant que donnée de densité bâtie généraliste.

Notons également que la distance « D » délimitant la zone d'étude a peu d'impact sur les données OSM-visibilité, car ces données sont ensuite limitées en largeur par la distance de visibilité, qui varie entre 300 et 2000m. En revanche, dans la longueur des transects, cette distance limite s'appliquera. Par exemple, en Occitanie nous avons réalisé des transects de plus de 30km sans repérer de bâtiments composés de terre crue : dans ce cas ce n'est plus l'analyse de visibilité qui limite les donnés mais la distance « D » au dernier point « terre » repéré.

Le déroulement et les résultats de l'analyse de sensibilité sont décrits directement dans la partie résultats (5.1).

5.3.3.4 Bâtiments aléatoires

Une fois la zone d'étude délimitée par la *distance de connaissance*, un nombre N de points y est distribué aléatoirement. A l'étape d'extraction des données pédologiques, ces points seront traités comme des bâtiments, et au cours de l'analyse ces pseudo-bâtiments et leurs propriétés extraites permettront d'évaluer une densité relative de bâtiments en terre par rapport à la fréquence des sols rencontrés.

Cette évaluation permet :

- de représenter la distribution réelle des propriétés des sols sur la zone,

- d'évaluer le potentiel d'emploi de la seule source pédologique comme « donnée de densité », ne permettant pas de réduire le biais d'installation préférentielle mais au moins de représenter la distribution relative aux propriétés du sol, et non une simple occurrence de bâtiments.

Le nombre de bâtiments aléatoires est choisi afin de ne pas trop alourdir les calculs mais de permettre un échantillonnage n'apportant pas d'aléa statistique visible. Le nombre N=25000 est choisi dans la plupart des cas.

5.4 BDD-terre-crue : une base de données destinée à la localisation du patrimoine bâti en terre crue

Les informations collectées dans les bases de données rencontrées, relatives aux bâtiments composés de terre crue, concernent différentes échelles architecturales : environnement du bâtiment, bâtiment, élément du bâtiment (mur, plancher), techniques de l'élément. Agréger ces données représente un travail d'homogénéisation conséquent.

D'autre part, ce travail de thèse nous a permis de constater la dispersion des données décrivant le patrimoine bâti en terre crue en France hexagonale. Afin d'initier un travail d'agrégation des données existantes dans un format commun qui puisse être réemployé par la suite, un format de base de données a été développé pour héberger les échantillons employés dans cette thèse : BDD-terre-crue (V0.2). La présentation des champs de cette base de données est proposée en Annexe II.

Sa structure a permis la collecte et la gestion des données pour ce travail de thèse. Mais celle-ci est pensée pour assurer son usage futur dans un maximum de contextes d'étude du patrimoine bâti en terre crue. Ce fut l'occasion d'initier la création d'une base de données collaborative d'étude du patrimoine bâti en terre crue, projet d'utilité collective dans le cadre des axes « socio-culture » et « durabilité » du Projet National Terre Crue, et qui a suscité l'intérêt d'autres acteur.ices qui

souhaiteraient mettre à disposition leurs données patrimoniales et utiliser la structure commune: Parc Naturel Régionaux, services de l'inventaire du patrimoine architectural, passionné.es et professionnels de la construction en terre crue, etc. Par exemple, les premières versions de cette base de données ont pu servir dans le cadre des travaux de Aras-Gaudry (2023), et de Cannat (2022).

Le format de la base de données est décrit en Annexe II. Il permet notamment d'associer à un point géolocalisé une variété d'informations concernant le bâtiment (datations, typologie architecturale, images, etc.) et de détailler les éléments d'architecture (murs, sols, plafonds, etc.) composés de terre crue présents dans le bâtiment (technique, dimensions, etc. Enfin, au sein de chaque élément du bâtiment peuvent être décrites une ou plusieurs techniques de construction en terre crue (type de technique, caractéristiques de mise en œuvre, état de dégradation, etc.), ainsi que les éventuelles relations entre ces différentes techniques au cœur de l'élément (situation spatiale : au dessus, en dessous, etc).

Les travaux réalisés au cours de cette thèse ont permis d'éprouver la méthode de catégorisation des bâtiments et techniques, mais de nombreuses questions restent difficiles à trancher et nécessiteront des échanges, notamment avec des spécialistes de l'étude du patrimoine vernaculaire, ou avec d'autres expert.es ayant réalisé des travaux similaires dans d'autres pays, par exemple Hueto-Escobar et al. (2022) dans la péninsule Ibérique. A titre d'exemple, la notion de « bâtiment » reste floue : quand un corps de ferme mesure 30m de long, construit sur plusieurs générations, est-ce un bâtiment ? Que dire des alignements de maisons mitoyennes dans les rues d'un bourg ? Par simplicité, nous avons défini un « bâtiment » par l'unicité d'un polygone sur la carte OpenStreetMap, mais il paraît évident que la réalité sociale de ce qui définit un « bâtiment » est plus complexe.

Nous avons souligné au Chapitre 2 (7) l'intérêt de la mise en commun de données d'analyse et d'essais sur des échantillons d'éléments composés de terre crue (Rojat et al. 2020). Penser des bases de données collaboratives permettant une compatibilité entre les données de description des bâtiments et des données d'analyse des échantillons permettrait peut-être de développer des méthodes de compréhension des choix techniques vernaculaires.

6 Croisement des données

Après préparation des données pédologiques et patrimoniales, un croisement spatial est réalisé via le logiciel QGIS. Celui-ci est manipulé via des algorithmes python publiés en accès libre (Verron-Guillemot 2025).

6.1 Extraction des valeurs des BDD pédologiques

Chaque source de données « terre » et de « densité », sous formes de points géolocalisés dans l'espace, est croisée avec les bases de données pédologiques.

Le processus suivant est répété pour chaque analyse :

(1) délimitation des données de densité

- les bâtiments en terre de(s) source(s) souhaitée(s) et de(s) technique(s) souhaitée(s) sont filtrés et enregistrés en tant que couche « terre »

- la zone d'étude est délimitée par une zone tampon autour des bâtiments « terre » de D km (initialement 30km) et par les limites administratives (Bretagne ou France hexagonale).

- les données aléatoires sont échantillonnée dans cette zone (25000 points) ; les données OSM ou OSM-transect sont découpées pour la zone et échantillonées aléatoirement (25000 points) ; les données Vernaculaires sont découpées dans la zone.

Note : on voit que les données de densité sont donc spécifiques à chaque filtrage source-technique-zone. Pour chaque nouvelle analyse, le procédé de délimitation spatiale des données de densité doit être réitéré.

(2) chargement des données pédologiques

- la couche vectorielle vecteur-SMU est ajoutée. Chaque polygone contient le numéro de la SMU et les données pédologiques agrégées à l'échelle de la SMU.

- les données SoilGrids et GlobalSoilMaps de la profondeur désirée sont ajoutées. Une couche raster par propriété pédologique.

- En Bretagne, les données raster-STU de la profoneur désirée sont ajoutées. Une couche par propriété pédologique.

(3) Extraction des données pédologiques

Pour chaque fichier de points-bâti (terre, Vernaculaire, OSM/OSM-transect, aléatoire) :

- chaque propriété pédologique raster est extraite pour chaque point-bâtiment et ajouté à la table du fichier point-bâti

- l'ensemble des propriétés de la SMU correspondant au point sont ajoutées à la table du fichier point-bâti

- les fichiers sont sauvegardés indépendamment. Notons qu'en Bretagne, le fichier de données de densité V*ernaculaire* contient en fait également les données *terre* issues de la même base de données.

6.2 Post-traitement des données croisées : calcul de variables secondaires

Certains variables de notre étude sont calculées à partir de variables préexistances dans les bases de données pédologiques. Elles sont calculées après le croisement de données, au niveau de chaque point-bâtiment, selon les données pédologiques etraites pour ce point.

6.2.1 Passant à 80µm

Le passant à 80µm (P80µm) est une variable souvent référencée dans la littérature. Dans les données pédologiques, les *fractions* granulométriques sont distribuées selon les classes de textures pédologiques classiques. On peut en déduire facilement les *passants* correspondants : P2µm, P50µm, P2000µm.

Afin d'obtenir une estimation de P80µm, des courbes log-linéaires sont optimisées sur les trois passants connus via le modèle BEST (Beerkan Estimation of Soil Transfer), un des modèles les plus adaptés lorsque peu de points d'étalonnage sont disponibles (Bayat et al. 2015). Puis, P80µm est calculé à partir du modèle étalonné.

6.2.2 Distance à la courbe de Fuller

La distribution de Fuller est une distribution granulométrique sensée représenter un empilement granulaire de densité optimale dans les formulations granulaires des bétons de ciment. Cet

empilement n'est pas représentatif d'une terre idéale pour plusieurs raisons décrites en annexe (Annexe I, 3.2.3.3). Mais en l'absence d'autres propositions de calcul de distribution granulométriques compactes, on peut supposer que des sols dont la distribution granulométrique se rapproche de celle de Fuller sont plus aptes à être compactés.

Une variable secondaire est alors calculée à partir du modèle de Fuller. Les passants granulométriques « de Fuller » correspondant à chacun des 3 passants granulométriques dont nous disposons les estimations (P0002um – P2000um) sont calculés à partir de l'équation de Fuller :

$$Pi = 100 \times \left(\frac{Di}{Dmax}\right)^{w}$$

Où Pi est le passant cumulé pour un diamètre Di, Dmax est le diamètre du plus gros grain et *w* est un coefficient indiquant la « forme » de la courbe. Dans les modélisations initiales dimensionnées pour les mélanges de bétons de ciment formulés, Fuller propose initialement w = 0.5. Des travaux indiquent que ce coefficient est pertinent pour la terre (Oquendo-Patiño & Estrada 2022) tandis que d'autres auteur.ices conseillent d'utiliser d'autres valeurs de w (0.20-0.25) pour la construction en terre crue (Houben & Guillaud 1994).

Dans notre modélisation, le paramètre D_{max} est fixé à 5cm, et le paramètre w à 0.5, valeur initiale proposée par Fuller et qui s'avère performante dans les modélisations de Oquendo-Patiño et Estrada (2022). Puis, pour chaque terre, la valeur des passants est comparée à celle de Fuller selon la méthode des moindres carrés : la distance des passants issus des données pédologiques est calculée et le carré de cette distance est sommé pour l'ensemble des passants. Plus la somme des carrés est importante, plus la distribution peut être considérée « éloignée » de celle de Fuller.

7 Incertitudes de la méthode de croisement de données pédologiques et patrimoniales

7.1 *Incertitude 1 : distance au sol extrait. Le sol sous-jacent au bâtiment correspond-il au sol employé pour construire ?*

Lorsque l'on extrait la valeur d'une propriété pédologique à la localisation d'un bâtiment comme représentation de la terre employée pour construire, on suppose que les constructeur.ices ont employé la terre sous le bâtiment où à proximité immédiate pour construire, ou au moins d'un sol aux propriétés proches. La question du transport potentiel du matériau depuis une autre unité pédologique doit donc être posée.

En contexte pré-industriel vernaculaire où les systèmes de transports et l'énergie externe* sont contraints, la ressource est prélevée à proximité. La constructeur.ice cherche une terre favorable « à proximité du chantier » (Simon & Soulié 1991; Costi de Castrillo et al. 2017), où à quelques dizaines, centaines de mètres ou au maximum à quelques kilomètres du chantier (Le Garrec et al. 1978; Ford et al. 2005; Hamard, Cazacliu, et al. 2016; Hamard 2017) lorsque qu'aucune terre à proximité n'est satisfaisante, éventuellement à l'aide de moyens de transport à traction animale (Schroeder 2016; Hamard 2017).

Plusieurs équipes de recherche ont tenté de localiser la provenance de la terre employée dans les éléments de terre crue de bâtiments historiques*, en comparant la composition des éléments d'ouvrage avec celle des sols alentours. Pour le pisé, Hamard et al. (Hamard, Cammas, et al. 2016) identifient le matériau d'un bâtiment à une distance inférieure à 1km et concluent sur la probable hyper-localité de la ressource employée par les constructeur.ices des siècles passés. Mille (2023)

atteste que le matériau employé dans les édifices urbains Lyonnais provient généralement du sol sous-jacent où à proximité immédiate du site de construction, contrairement à l'idée que l'environnement urbain aurait forcé l'emploi de matériaux extraits hors de la ville. Les matériaux importés de l'extérieur étant plutôt d'autres matières : brique cuite, pierre, bois. Les mêmes conclusions sont suggérées par (Ford 2002; Hamard et al. 2018) relativement à la bauge. Dans le cas des bâtiments composés de techniques de mise en œuvre sans préfabrication, la proximité immédiate de la source de sol semble systématique. Souvent, une mare à proximité immédiate trahit le site d'excavation des terres utilisées pour un ou plusieurs bâtiments.

Pagliolico et al. (2010) ont également analysé les propriétés granulométriques et minéralogiques de 6 échantillons d'adobes issues du patrimoine du nord-ouest Italien. Pour deux d'entre eux, des sols aux propriétés concordantes ont été identifiés à moins de 5km du bâtiment. Pour deux autres, à moins de 10km. Les sols correspondant aux deux derniers échantillons n'ont pas été identifiés dans la zone. D'autre part, une analyse visuelle des briques est réalisée, et les auteur.ices indiquent que les briques dont les sols d'origine n'ont pas été localisés sont aussi celles ayant les dimensions les plus standardisées et régulières. Les auteur.ices concluent que ces dernières proviennent probablement de briquetteries. Il est à noter que contrairement aux études précédentes (Ford 2002; Hamard, Cammas, et al. 2016; Hamard et al. 2018), des bases de données pédologiques n'ont pas été utilisées pour pré-localiser les zones d'échantillonnage de matériaux à comparer avec les briques les plus proches des bâtiments. Ainsi, les sols d'origine sont identifiés à des distances entre 1 et 10km, mais l'origine du matériau pourrait en réalité être issu de sols encore plus proches. Cette étude ne diffère donc pas de celles réalisées sur des matériaux non préfabriqués, attestant de la localité de la ressource. Cependant, elle indique qu'une fraction significative des adobes (seule technique de terre crue préfabriquée à l'époque) a pu être transportée depuis des briqueteries plus ou moins proches du site de construction.

Le matériau terre peut également provenir du réemploi d'éléments broyés et re-mis en œuvre, ou directement réemployés (Aras-Gaudry et al. 2023). Nous avons ainsi observé des morceaux de pisé remaçonnés en Limagne (Cannat 2022). Il est cependant probable qu'il s'agisse d'éléments réemployés d'un bâtiment déjà sur place, et l'emploi de ces matériaux suppose leur extraction dans la fabrication première.

La disponibilité ultra-locale du matériau terre est en effet un avantage significatif de cette technique de construction en termes d'économie de moyens. Même si dans le cas Lyonnais, la terre semble avoir été extraite localement, en contexte d'habitat urbain dense, il est possible que l'approvisionnement local fut plus complexe qu'en contexte rural extensif*. A partir du moment où la ressource doit être transportée sur une distance conséquente, et que les moyens de transports disponibles sont peu favorables (cas du contexte énergétique et technique pré-industrialisation), son avantage comparatif par rapport à la pierre, et surtout le bois, plus léger, se réduit.

Si une ressource est transportée sur de grandes distances en contexte énergétique et de transport contraint, c'est que la technique mise en œuvre est particulièrement désirable relativement à celles pouvant être mises en œuvre avec des matériaux plus locaux. L'effort de transport, donc la distance de transport et la quantité nécessaire de la ressource pourrait donc indiquer le degré de désirabilité de la technique, par exemple préférée pour sa productivité à la construction ou les représentations* que les constructeur.ices de l'époque s'en faisaient. La rationalité paysanne sélectionnait un procédé efficace en considérant l'intégralité des étapes, et le transport semble en être une composante centrale.

L'échelle de dimension des SMU de DoneSol3 est de l'ordre du kilomètre ; mais dans les paysages marqués par des vallées la plus petite dimension d'une SMU peut atteindre la dizaine de mètres. Un bâtiment ne sera donc pas forcément situé exactement au dessus de l'unité pédologique dont est

extrait la terre employée pour l'édification. On peut supposer que les sols situés en amont d'un versant où est construit le bâtiment peuvent avoir été transportés plus facilement par les constructeur.ices, bénéficiant de la gravité. Pour GlobalSoilMaps et SoilGrids, l'unité pédologique est un pixel raster (un carré) de 90m de côté. C'est donc encore moins certain que le sol sous-jacent au bâtiment corresponde à la terre employée pour bâtir. Cependant ces deux cartes pédologiques raster présentent un « lissage » des limites entre unités pédologiques ce qui fait que deux pixels voisins partagent des valeurs semblables. Finalement, dans un traitement statistique sur un grand nombre d'édifices, on s'attend à ce que la qualité des résultats dépende surtout de la qualité de l'information pédologique plus que sa précision géographique. Par l'observation d'anomalies sur des cartes nous espérons mieux caractériser les incertitudes sur de transport de la ressource.

7.2 Incertitude 2 : profondeur d'extraction. Quel horizon considérer dans l'extraction des données pédologiques ?

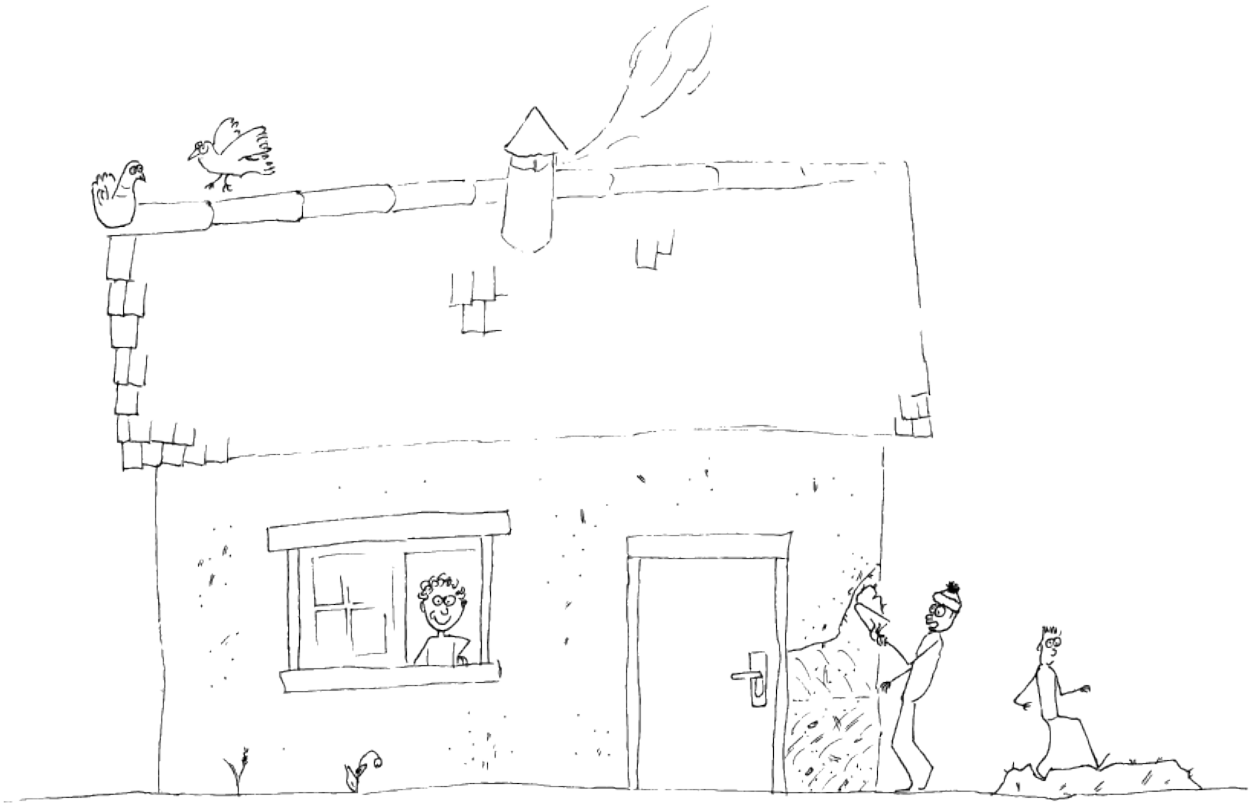
La plupart des recommandations contemporaines de choix de terres suggèrent le choix d'un horizon situé sous les éventuels horizons organiques de surface (Wolfskill et al. 1970; Houben & Guillaud 2006; CCTC 2018), car les composés humifères du sol naturel pourraient présenter des propriétés défavorables à leur emploi pour construire en terre crue – quoique cela n'ait jamais été clairement démontré. Hamard et al. (2018) proposent ainsi de considérer les données pédologiques des horizons non organiques directement par un tri sur les types d'horizons pédologiques des bases de données.

Dans le contexte contemporain, il n'y a pas de recommandations sur la profondeur maximale d'excavation du sol, car généralement l'excavation réalisée par des moyens mécanisés n'est pas vraiment limitée par cette variable. En revanche, en contexte pré-industriel on suppose qu'une extraction manuelle est fortement facilitée par l'emploi d'horizons peu profonds (Hamard 2017; Hamard, Cammas, et al. 2020). Hamard et al. (2018) suggèrent donc de choisir les horizons inférieurs à 60cm de profondeur dans les bases de données pédologiques pour la réalisation de croisements entre données pédologiques et données patrimoniales.

Pour GSM, SoilGrids et raster-STU, on prendra donc la couche 30-60cm. Pour vecteur-SMU et vecteur-STU, on extraira la valeur de l'horizon présent à -45cm.

Une analyse de sensibilité sera réalisée sur ce paramètre afin d'analyser cette incertitude (Chapitre 3B, 2).

Chapitre 3B : Bâti historique et facteurs environnementaux – résultats



Résumé :

Le choix de construire en terre crue, et le choix de la technique de construction employée, est influencé par les propriétés des terres à disposition des constructeur.ices pré-industriel.les*. Par la localisation d'un grand nombre de bâtiments de plusieurs techniques-type de construction en terre, et par l'extraction des données pédologiques décrivant les sols sur lesquels reposent ces bâtiments, nous cherchons à observer des tendances de choix préférentiel de techniques de terre crue selon les propriétés du sol local. Une attention est donnée dans l'analyse des densités bâties en terre pour éviter les biais potentiels identifiés au Chapitre 3A.

Quatre régions de France hexagonale* sont parcourues : Ouest, Champagne-Ardennes, Limagne, Occitanie. Quatre techniques-type sont étudiées : pisé, bauge, torchis, adobes. Une analyse des corrélations entre propriétés pédologiques et choix technique* est réalisée pour chaque région, puis pour l'ensemble du territoire hexagonal. Sont identifiées les techniques qui ont été privilégiées par les constructeur.ices pré-industriel.les en fonction de différentes propriétés physico-chimiques des sols (granulométrie, CEC, profondeur du sol). La méthode est évaluée, et les différentes sources de données pédologiques et patrimoniales sont comparées.

On constate que peu de type de terres semblent défavorables à la construction en terre crue. Certains sols permettent l'emploi de plusieurs techniques, voir l'ensemble des techniques-types considérées.

1 Introduction

Le choix d'une technique de construction est multifactoriel, avec des influences allant bien au-delà des ressources* disponibles. Le Chapitre 2 a mis en lumière que l'approche *in vitro* de l'analyse des propriétés de la terre ne permet pas de prédire leur performance d'usage. Pour saisir l'implication réelle des paramètres de la terre à disposition dans les choix techniques*, il faut réaliser des traitements statistiques sur de nombreux phénomènes *in vivo*, c'est à dire des choix effectivement réalisés. Dans le Chapitre 3A, on a suggéré qu'une analyse statistique des choix de techniques dans les bâtiments historiques permet d'accéder à de nombreux « échantillons » de choix techniques, tout en plaçant l'analyse dans le cadre relativement frugal du contexte pré-industriel*. Dans cette perspective, une méthode de croisement de données patrimoniales et pédologiques a été présentée, ainsi que les données collectées pour le territoire français hexagonal*.

Dans ce chapitre, une analyse préalable de quelques paramètres du modèle est proposée. Puis, la méthode de croisement est réalisée en deux temps, d'abord sur le territoire de la région Bretagne pour la technique de la bauge, puis sur l'ensemble des régions d'étude (Bretagne, Champagne-Ardenne, Occitanie, Limagne). On espère ainsi clarifier les relations entre occurrence de techniques-types* et propriétés des sols locaux.

2 Comparaison de la composition de murs avec les propriétés pédologiques des sols sous-jacents

Utiliser des bases de données pédologiques pour réaliser un traitement statistique sur les choix des techniques de terre crue repose sur plusieurs hypothèses. En comparant d'une part les données décrivant la composition granulométrique de la terre issue des murs de bâtiments en terre avec d'autre part les propriétés des sols locaux, on peut évaluer la pertinence de la méthode de croisement de données. On espère clarifier les incertitudes de modélisation précédemment décrites et les comparer à l'impact d'autres biais issus de la méthode et des données disponibles.

2.1 Incertitudes de modélisation

Les propriétés du sol varient dans l'espace, horizontalement et verticalement. Dans la méthode de croisement de données pédologiques/bâti, ces deux variabilités conduisent à deux incertitudes.

Premièrement, il est souvent difficile de localiser la provenance exacte de la terre employée pour bâtir les édifices historiques. Il n'est donc pas certain que le matériau ait été extrait exactement sous le bâtiment ou a proximité immédiate, ou du moins, qu'il ait des propriétés équivalentes au sol sous-jacent au bâtiment. Pour le croisement spatial avec les données pédologiques, on extraira le sol décrit à la localisation exacte du bâtiment.

Deuxièmement, la ou les intervalles de profondeur d'extraction de la terre choisies à l'époque ne sont pas connues. Dans les bases de données pédologiques, afin de sélectionner les descriptions de couches de sol représentatives des horizons de sols effectivement extraits, on doit supposer une profondeur d'extraction du sol. On suppose qu'elle correspond aux horizons situés sous les horizons organiques, cependant à une profondeur autorisant une excavation manuelle (Chapitre 3A, 7.2).

2.2 Résumé de la méthode et des données employées

Ces deux incertitudes sont évaluées en employant une base de données publiée par Rojat et al. (2020) décrivant 22 échantillons de pisé extraits de bâtiments pré-industriels Rhône-Alpins (voir Chapitre 1,

1.1). Pour chaque échantillon, on dispose d'une analyse granulométrique complète (voir Figure 22) et d'une mesure de VBS. On dispose également de la géolocalisation du bâtiment d'origine, ce qui permet d'extraire les valeurs de composition estimée des sols sous-jacents par croisement avec les bases de données pédologiques. On peut ainsi comparer les propriétés du matériau des murs avec celles des sols sous-jacents aux bâtiment.

A l'aide de l'algorithme de croisement de données patrimoniales/environnementales spatialisées (Chapitre 3A, 6), les propriétés pédologiques spatialisées issues des trois bases de données couvrant l'ensemble de la France hexagonale* (DoneSol vecteur-SMU et vecteur-STU, GlobalSoilMaps (GSM), SoilGrids (SG)), donc la région Rhône-Alpes, sont extraites à la localisation de chaque bâtiment et comparées aux propriétés analysées. Dans un premier temps pour l'évaluation de l'incertitude sur la distance d'extraction de la terre, on définit une profondeur supposée d'extraction de la terre. Les propriétés extraites sont celles des horizons -30 à -60cm pour GSM et SG, et celles de l'horizon présent à -45cm pour vecteur-SMU. Cette plage de profondeurs est identifiée par Hamard et al. (2017) comme généralement située sous l'horizon organique et suffisamment peu profonde pour être réaliste dans le cadre une extraction non mécanisée (Chapitre 3A, 7.2).

2.3 Représentation des résultats

Les fractions granulométriques de 0 à 2, 2 à 50 et 50 à 2000 µm (F2µm, F50µm, F2000µm) de chaque échantillon de pisé sont directement comparées sur des graphiques ayant en abscisse la valeur mesurée sur les échantillons et en ordonnée la valeur extraite de la base de données pédologique. Ils sont présentés en $g.kg^{-1}$ de fraction fine*, c'est à dire que F2µm + F50µm + F2000µm = 1000 $g.kg^{-1}$. La fraction supérieure à 2000 µm (F2000µm_D) est également comparée directement et présentée en $g.kg^{-1}$ de la masse totale du sol. La bissectrice (y=x) est représentée pour faciliter la lecture : si les propriétés extraites de la base de données pédologiques sont les mêmes que celles mesurées dans les murs, les échantillons devraient se trouver au niveau de cette droite.

Nous supposons ici que la VBS et la CEC sont deux propriétés corrélées, cependant non équivalentes : la fixation des deux molécules mesurant les charges accessibles du sol ne suit pas les mêmes dynamiques (Annexe I, 2.2.4.3). Ainsi, nous comparons la VBS ($\underline{mmol+.kg^{-1}}$)[47] mesurée sur les échantillons de pisé à la CEC ($\underline{mmol+.kg^{-1}}$) de la base de données pédologiques, mais la bissectrice (y=x) n'est pas représentée, car il est peu probable que la relation soit une équivalence. En revanche, la relation est sensée être relativement proportionnelle (Vinceslas 2019).

Pour chaque propriété, on représente la valeur de la propriété mesurée en fonction de la valeur identifiée pour chaque source de données pédologiques (Figures 64 à 67). La représentation est dédoublée : sur les figures 64 et 65, une régression linéaire est calculée et représentée. Le coefficient de corrélation (r^2) est calculé conjointement. Sur les figures 66 et 67, une régression linéaire dont l'ordonnée à l'origine est forcée sur 0 est proposée, et la somme des moindres carrés obtenus est calculé. Les équations des régressions sont calculées et indiquées dans la légende.

2.4 Résultats des comparaisons

De manière générale, les nuages de points des représentations de corrélation sont très dispersés pour les propriétés granulométriques, quelle que soient les propriétés. Les corrélations linéaires (Figures 64 et 65) présentent de faibles coefficients, ne dépassant pas r^2=0.3 sauf pour SoilGrids-F2000µm_D (0.6). Cependant, malgré le faible nombre d'échantillons, les pentes de régression sont toujours positives

47 Nous soulignons les unités lorsqu'elles ne correspondent pas aux unités communément employées. Nous avons ici choisi les unités du système international dans les puissances d'unité multiples de 3 (n, µ, m, -, k, M, B) comme référence pour l'ensemble des unités de la thèse.

(sauf pour SoilGrids) ce qui suggère qu'il y a au moins une bonne proportionnalité entre les propriétés des terres des murs et des sols sous-jacents, donc un minimum de corrélation. Pour SoilGrids, on peut conclure de pentes nulles qu'il n'y a aucune corrélation significative, même faible, pour le jeu de données étudiées.

Par ailleurs, les droites de régressions linéaires passent rarement proche de l'origine, avec des pentes généralement inférieures à 0.5, alors qu'une mesure d'égalité donnerait une pente de 1 (y=x). Seules les propriétés F50µm pour vecteur-STU et vecteur-SMU (Figure 64), F2000µm pour vecteur-SMU (Figure 64) et F2000µm_D pour vecteur-STU (Figure 65) dépassent un coefficient de 0.5 ce qu'on peut tout de même interpréter comme une bonne proportionnalité.

On note également que la distance de la pente à l'unité varie selon la source de données : vecteur-STU ≈ vecteur-SMU < GlobalSoilMaps < SoilGrids. SoilGrids (SG) présente une absence de proportionnalité manifeste avec des pentes proches de 0. C'est pourquoi il est important d'avoir les deux indicateurs de pente et de coefficient de corrélation : même si le coefficient de corrélation est élevé, par exemple r^2 = 0.6 pour SoilGrids-F2000µm_D (Figure 65), la pente est quasi-nulle, donc on peut dire que cette propriété n'est pas corrélée entre les deux jeux de données. Si l'aléa dispersant les données est bien moindre pour SoilGrids, c'est essentiellement parce qu'un biais y « lisse » les données granulométrique, par exemple avec F2000µm_D qui varie seulement de 100 à 150 $g.kg^{-1}$ quand les données mesurées dans les murs s'étendent de 0 à 400$g.kg^{-1}$ (Figure 65). A l'inverse, les données sont bien plus dispersées pour GlobalSoilMaps (GSM) et vecteur-SMU que pour SG. L'aléa est conséquent, mais leurs pentes sont plus représentatives.

En ce qui concerne la relation entre VBS mesurée et la CEC extraite (Figure 65), on peut considérer ces deux propriétés comme presque décorrélées dans le jeu de données : la droite de régression linéaire montre une proportionnalité absente, voir négative pour SG. Pour Vecteur-STU et vecteur-SMU, la présence de valeurs de CEC extrêmes influence fortement la régression linéaire et ne permet pas de conclure sur un réel sens de proportionnalité.

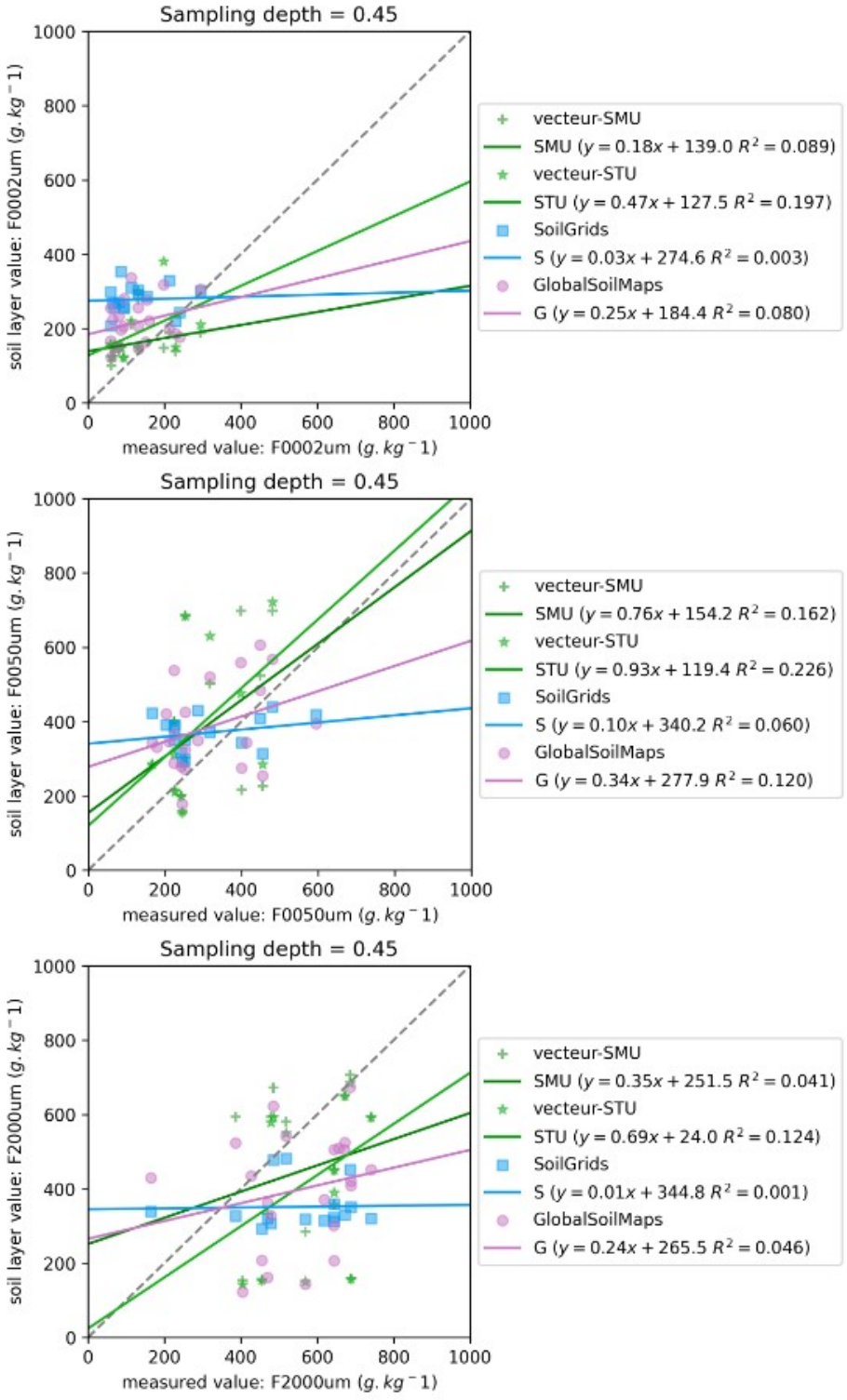


Figure 64 : Comparaison des propriétés de granulométrie de la fraction fine (F2µm, F50µm, F2000µm) mesurées sur des éléments de pisé à leur équivalent extrait des bases de données pédologiques. La profondeur de la couche de données pédologiques considérée est de -45cm (couche 30-60cm pour les données raster). La droite d'égalité y=x est représentée pour comparaison. Une régression linéaire affine est réalisée entre données mesurées et données pédologiques, dont la fonction de corrélation et le coefficient de corrélation r² sont fournis dans la

légende.

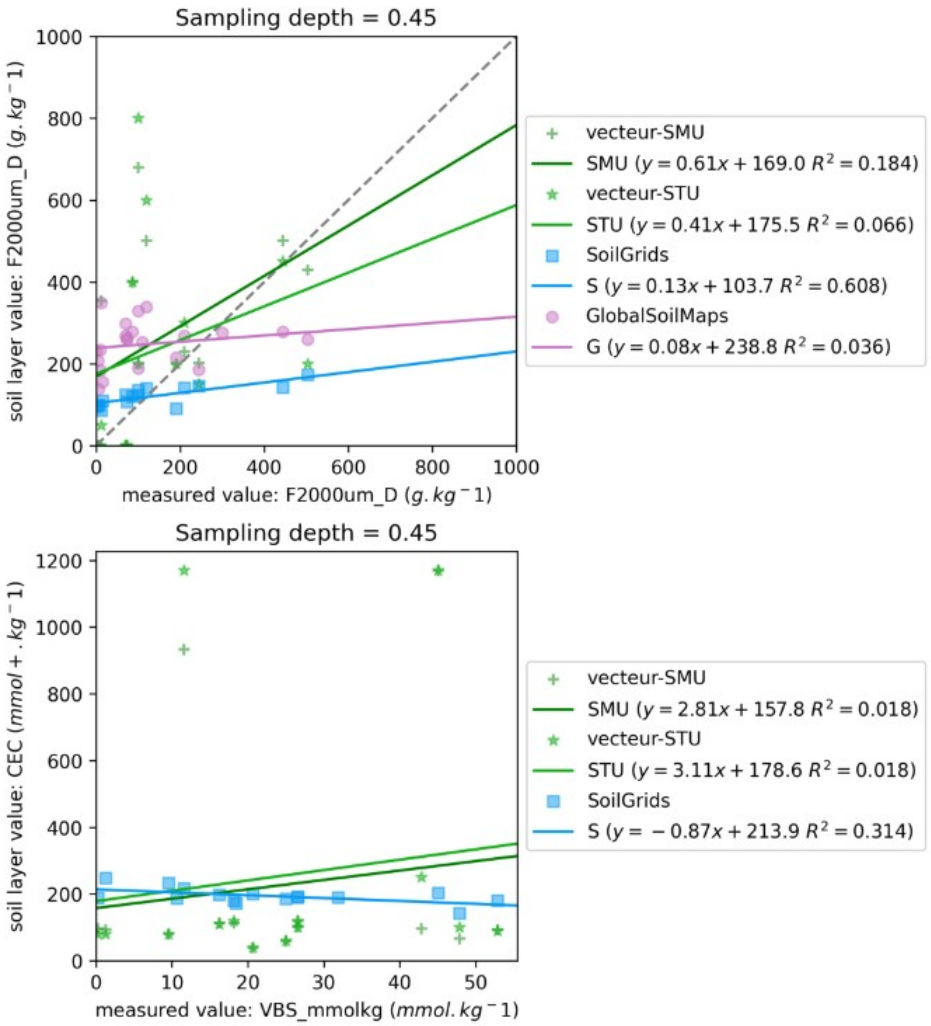


Figure 65 : Comparaison de la teneur en éléments grossiers (F2000µm_D) et de la VBS mesurées sur des éléments de pisé à leur équivalent extrait des bases de données pédologiques (F2000_D et CEC). La profondeur de la couche de données pédologiques considérée est de -45cm (couche 30-60cm pour les données raster). La droite d'égalité y=x n'est pas représentée pour la relation VBS-CEC, supposée proportionnelle mais non équivalente. Une régression linéaire affine est réalisée entre données mesurées et données pédologiques, dont la fonction de corrélation et le coefficient de corrélation r² sont fournis dans la légende.

En forçant une relation de proportionnalité (droite passant par l'origine), on peut observer pour chaque source la distance à la bissectrice (y = x). F2µm est surestimé par SG et GSM (droites au dessus de y=x), un peu par vecteur-SMU et la proportionnalité est atteinte pour vecteur-SMU (Figure 66). F50µm est légèrement surestimé, F2000µm est sous-estimé. F2000µm_D (Figure 67) est sous-estimé par SG. Dans tous les cas pour la granulométrie, c'est les données issues de DoneSol3 (vecteur-SMU et vecteur-STU) qui dévient le moins de l'égalité, suivi de GSM puis de SG.

En revanche, lorsque la pente de la régression linéaire était proche de zéro, cette représentation n'a pas beaucoup d'intérêt, comme dans le cas de la VBS-CEC (Figure 67).

Il faut rappeler que les résultats ponctuels de vecteur-STU sont issus d'un choix aléatoire pondéré d'une Unité Typologique de Sol (STU) dans une Unité Cartographique de Sol (SMU) (Chapitre 3A, 4.3.1.3.2). De ce fait, entre deux extractions de données, il y a une variabilité des résultats d'observation ponctuels sur les graphiques et donc dans les régressions linéaires. Après plusieurs essais, ces variations semblaient négligeables, tant quantitativement que dans relativement aux autres sources de données pédologiques.

2.5 Discussion

2.5.1 Qualité des corrélations

De faibles corrélations ne sont pas étonnantes, car en plus des incertitudes apportées par la présente méthode de croisement de données, l'influence de plusieurs facteurs apporte de l'aléa dans la relation : incertitudes de mesure des propriétés mesurées du pisé, incertitudes de prédiction des données pédologiques, influence de facteurs « culturels » anthropiques (transport, modification du matériau terre…). On se rapproche plus de dynamiques caractérisant les écosystèmes biologiques aux influences multifactorielles que de systèmes géophysiques à quelques variables bien caractérisables. C'est pourquoi nous choisissons une interprétation des corrélations « indulgente » qui permet de comparer les variables de modélisation entre elles (source de données pédologiques, paramètres) malgré des coefficients de corrélation inférieurs à ce qui est généralement considéré comme nécessaire en géophysique.

Deux informations renseignent sur la qualité des corrélations entre les données des murs et des bases de données pédologiques. Le coefficient de corrélation représente l'aléa de dispersion des données autour de l'éventuelle corrélation. Un fort aléa disperse les données de manière croissante pour respectivement SG, GSM et les données DoneSol3 (SMU, STU).

Puisque l'on compare des variables sensées être équivalentes, en plus du coefficient de corrélation, la pente de la droite de régression renseigne également sur la proportionnalité entre les sources de données. Plus la pente de la corrélation linéaire affine (Figures 64 et 65) est proche de 0, moins les données peuvent être considérées comme corrélées. Cela nous a permis de clarifier la mauvaise représentativité du jeu de données SoilGrids malgré un coefficient de corrélation élevé. Ainsi, à l'inverse de la dispersion des données, la proportionnalité est de plus en plus faible pour DoneSol3, GSM et surtout SG. Vecteur-STU présente ainsi des pentes très proches de l'unité pour l'ensemble des variables de texture de la fraction fine* (Figure 64), meilleures que vecteur-SMU : cette source de données présente une très bonne proportionnalité avec les données mesurées, malgré un fort aléa.

Un fort aléa, représenté par de faibles coefficients de corrélation, n'est pas inquiétant pour les traitements statistiques d'ampleur avec des centaines de points de données patrimoniales, car son influence sur les dynamiques de corrélations observées réduit avec la quantité de données. En revanche, la pente de la régression linéaire est capitale, puisqu'elle démontre l'existence ou non d'un lien de proportionnalité. Si la proportionnalité existe entre le matériau des murs des bâtiments et les données pédologiques extraites, alors il y a bien une représentativité, et on peut s'en servir pour caractériser l'influence des sols sur les choix techniques par croisement spatial bâti/pédologie. A l'inverse, des proportionnalités faiblement décelables comme celle observée pour SoilGrids pourraient ne pas permettre de déceler des préférences techniques.

Dans l'ensemble, la fraction granulométrique « argileuse » (F2µm) présente des valeurs issues des données pédologiques supérieures aux les données extraites que dans les données mesurées dans les murs pour SG et GSM (environ x1.5). C'est l'inverse pour la fraction « sableuse » (F2000µm) pour l'ensemble des sources (x0.5 pour SG et GSM, x0.8 pour vecteur-SMU et vecteur-STU) (Figure 66). Pour

les « graviers » (F2000_D), la proportionnalité est bonne mais la dispersion conséquente pour les données DoneSol3. Pour GSM et SG la corrélation est presque nulle (Figure 65), ce qui fait que l'existence d'une proportionnalité est essentiellement un hasard lié à la correspondance entre la valeur quasi-constante extraite pour toutes les données et l'étendue des valeurs mesurées qui font que les données sont de part et d'autre de la bissectrice y=x.

L'absence totale de corrélation entre la VBS et la CEC peut s'expliquer par le fait que ces deux propriétés, souvent considérées équivalentes, ne mesurent pas exactement la même chose (Annexe I, 2.2.4.3). Cela s'ajoute à la faible qualité des données pédologiques comme pour les autres variables, d'autant plus faible que les mesures de CEC sont moins nombreuses dans les bases de données pédologiques que la granulométrie, et que les biais liés à la qualité ou la méthode de mesure sont plus conséquents.

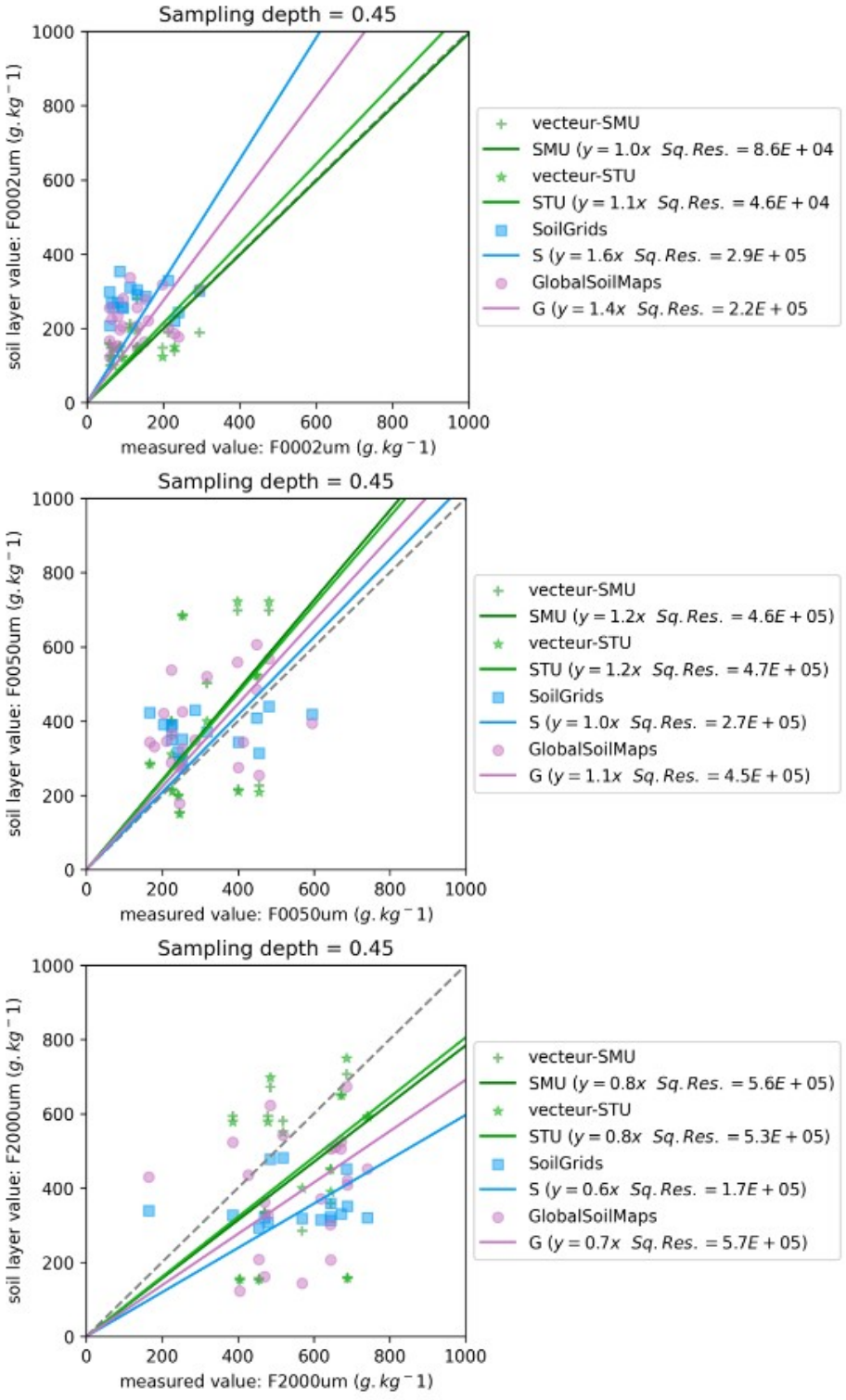


Figure 66 : Comparaison des propriétés de granulométrie de la fraction fine (F2µm, F50µm, F2000µm) mesurées sur des éléments de pisé à leur équivalent extrait des bases de données pédologiques. La profondeur de la couche de données pédologiques considérée est de -45cm (couche 30-60cm pour les données raster). La droite d'égalité y=x est représentée pour comparaison. Une régression linéaire dont on force le passage par l'origine est proposée. La somme des carrés résiduels de la corrélation est calculée.

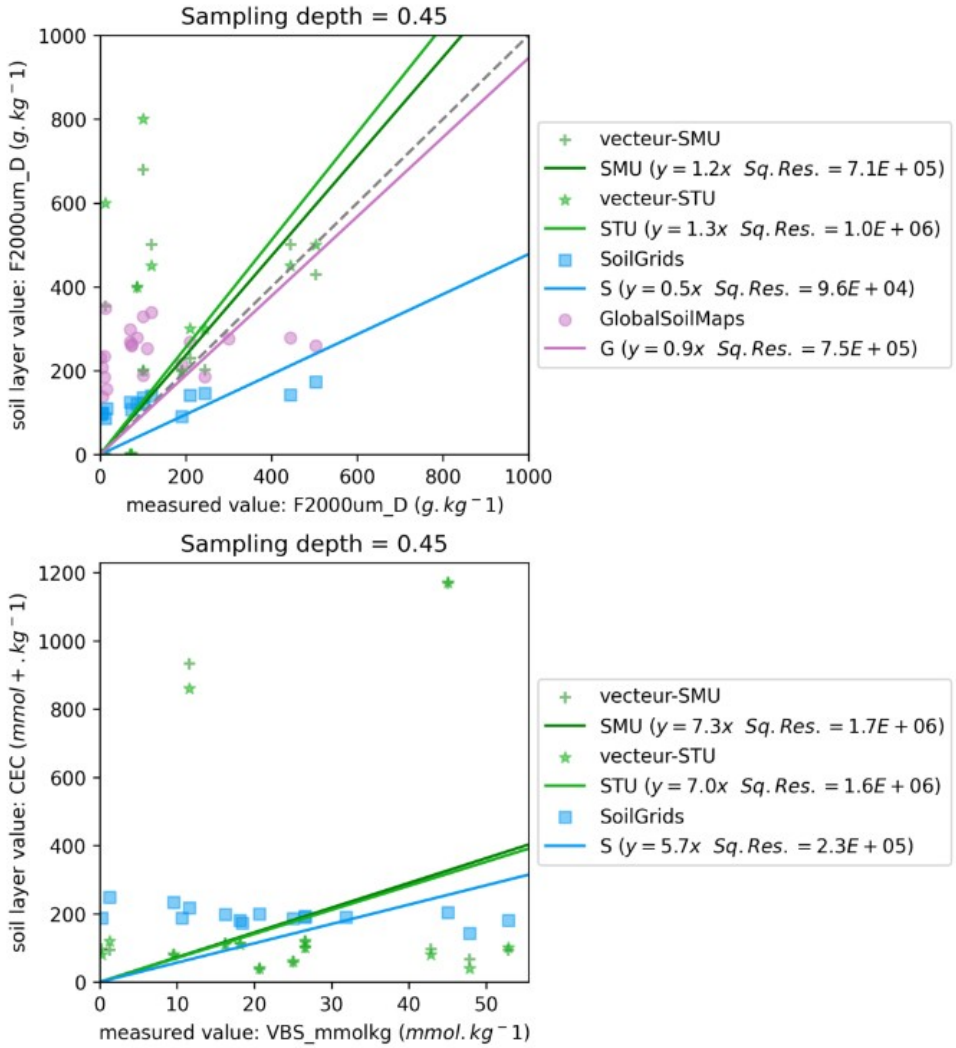


Figure 67 : Comparaison de la teneur en éléments grossiers (F2000µm_D) et de la VBS mesurées sur des éléments de pisé à leur équivalent extrait des bases de données pédologiques (F2000_D et CEC). La profondeur de la couche de données pédologiques considérée est de -45cm (couche 30-60cm pour les données raster). La droite d'égalité y=x n'est pas représentée pour la relation VBS-CEC supposée proportionnelle mais non équivalente. Une régression linéaire dont on force le passage par l'origine est proposée. La somme des carrés résiduels de la corrélation est calculée.

Enfin, la faible variabilité que nous avons observée au cours de la production des figures dans les résultats de vecteur-STU lorsque le choix aléatoire est répété nous rassure car 22 échantillons suffisent à ne pas observer de forte variation causées par l'aléa statistique de choix des STU (Chapitre 3A,Erreur : source de la référence non trouvée). Dans le détail, par exemple pour F2000_D sur la Figure 67, on voit que les deux seules valeurs extraites correspondant *exactement* aux valeurs mesurées, donc sur la bissectrice, sont issues de vecteur-SMU (étoiles vertes). Il s'agit peut-être d'un hasard ; mais nous suggérons que cela puisse être un exemple de cas où c'est la bonne STU qui a été sélectionnée aléatoirement, avec exactement la bonne teneur en éléments grossiers. C'est en tout cas ce que nous espérons avec la source vecteur-STU : au lieu de moyenner les données comme vecteur-SMU, et de ne jamais avoir la vraie combinaison de valeurs des variables pédologiques du sol sous-jacent mais toujours une moyenne des sols locaux, nous pensons qu'il est préférable d'avoir parfois exactement la

bonne combinaison de valeurs du sol sous-jacent, parmi d'autres combinaisons potentiellement vraiment éloignées.

2.5.2 Provenance des biais

2.5.2.1 Qualité des données

Les biais « lissants » de SG et dans une moindre mesure de GSM sont peut être liés à leur échelle de définition spatiale, ou du fait que ces données soient issues de modèles numériques de prédiction (Chapitre 3A, 4.2.2). Une étude sur une seule région n'est probablement pas adaptée pour l'emploi des données pédologiques définies à l'échelle nationale comme GSM et internationale comme SG, là où les données DoneSol sont issues d'études locales (Chapitre 3A, 4.2.4). À l'échelle d'un territoire comme la région Rhône-Alpes, la variation des propriétés pédologiques de ces bases de données de grande échelle serait sous l'influence des grands domaines pédogénétique alentours plus que des variations topographiques et géologiques locales. L'étude de Lemercier et al. (2022) a montré que selon les régions testées - n'incluant pas la zone Rhône-Alpine - GSM avait plutôt tendance à surestimer les données de teneurs en argile comparé à DoneSol3-vecteur-SMU ; ce qui est le cas ici, mais la tendance est variable selon les régions et aucune étude comparative n'a été réalisée dans cette zone.

Un autre facteur apportant potentiellement de la variabilité ou des biais est que les méthodes de mesures ne sont pas les mêmes dans la base de données DoneSol3 et pour les matériaux issus des bâtiments en pisé. Pour la granulométrie, elle est mesurée par la méthode de la pipette pour les analyses granulométriques des fractions inférieures à 50µm de DoneSol3 ; tandis qu'elle est réalisée par sédimentométrie pour cette fraction granulométrique (normes NF P 94) des échantillons de pisé.

2.5.2.2 Hypothèses de modélisation

Les incertitudes décrites en 2.1 introduisent deux biais potentiels dans les résultats : le choix préférentiel d'un sol qui ne serait pas le sol sous-jacent, et le choix préférentiel de profondeurs d'extraction de la terre qui ne seraient pas celle sélectionnée (environ -45cm, Chapitre 3A, 5.3.1).

Il est très probable que dans certains cas, un autre sol que le sol sous-jacent au bâtiment ait été choisi préférentiellement pour construire les bâtiments étudiés. Lorsque c'est le cas, les données pédologiques extraites ne correspondent pas au sol extrait. Si le choix d'un autre sol pour construire était aléatoire par rapport aux propriétés granulométrique, alors seul un aléa serait introduit et pas de biais. Mais il est également probable que ce choix préférentiel soit effectué au regard de propriétés pédologiques spécifiques, par exemple la recherche d'un sol plus cohésif donc plus argileux, ou encore moins riche en éléments grossiers, etc. Ainsi, il se pourrait que des sur et sous-estimations aient lieu sur ces propriétés. Dans cet exemple, du fait de ce biais de sélection de sols plus « favorables », les données extraites des bases de données pédologiques pourraient apparaître plus sableuses et graveleuses que les échantillons analysés des bâtiments. Ce biais n'est pas explicite sur les résultats, il est en tout cas impossible en l'état de le distinguer de biais liés à la qualité des données pédologiques. Surtout, si des typologies de sols étaient préférées, alors on assisterait à une « concentration » des valeurs de granulométrie mesurées dans des plages plus restreintes que celles des sols sous-jacents. Ici, c'est l'inverse qui est remarqué : les données de granulométrie mesurée sont plus étalées, ce qui induit dans l'ensemble des cas des pentes de régressions linéaires inférieures à 1. Si le biais de sélection des sols existe, alors il est peut-être invisibilisé par d'autres biais, comme la moindre qualité des données pédologiques. On ne peut conclure ici sur un choix préférentiel de sol pour construire en pisé.

Les mêmes questionnements sont valables relativement à la profondeur d'extraction du sol, choisie par les constructeur.ices. Dans l'extraction des données pédologiques, si une profondeur plus

profonde que la profondeur d'extraction réelle est choisie, les données pédologiques extraites pourraient présenter par exemple une granulométrie plus « grossière » que les données mesurées des échantillons, car la teneur en éléments grossiers est fréquemment corrélée avec la profondeur. Ici également, difficile de distinguer d'éventuels biais de choix préférentiels de ceux précédemment identifiés. Mais en faisant varier la profondeur considérée dans la modélisation, on peut vérifier la qualité de l'hypothèse de profondeur et éventuellement optimiser le modèle.

2.6 Variation et optimisation de la profondeur d'extraction

Afin de clarifier l'impact de ce choix de modélisation sur les résultats, on évalue l'impact de la valeur de la profondeur d'horizon choisie pour l'extraction des données sur la qualité de la corrélation entre valeurs mesurées et valeurs extraites. On fait varier la profondeur d'extraction des données autour de sa valeur initiale (0.45m de profondeur), sur 5 valeurs : 0.025, 0.10, 0.225, 0.45, 0.80. Ces profondeurs correspondent à la médiane de chacune des strates-types utilisées dans les bases de données SoilGrids et GlobalSoilMaps (Chapitre 3A, 4.2.2). L'impact de la variation de profondeur de modélisation est mesuré par la variation du r^2 de la corrélation linéaire entre les valeurs mesurées et extraites, pour les 5 variables. Seule la base de données DoneSol3 est employée, car c'est celle qui présentait les meilleures corrélations avec les propriétés mesurées. L'extraction vecteur-SMU est choisie afin que les résultats ne subissent pas d'aléa lié au choix aléatoire des STU.

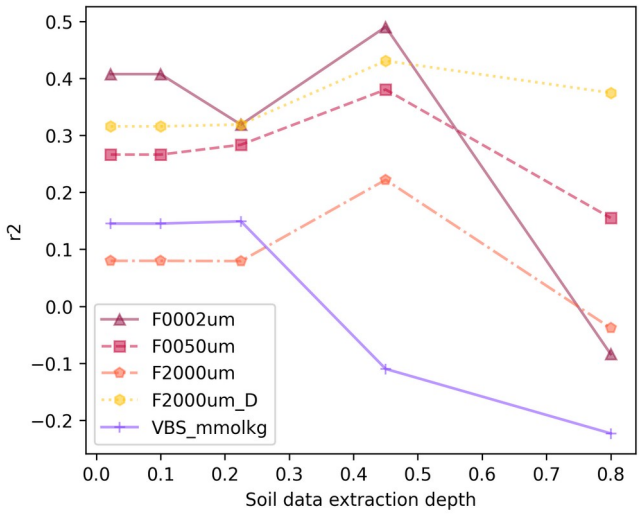


Figure 68: Variation du coefficient de corrélation entre les variables mesurées et extraites des 22 bâtiments de pisé, selon la profondeur d'extraction des données pédologiques. La source de données est DoneSol Vecteur-SMU. 4 fractions granulométriques sont considérées ainsi que la corrélation VBS-CEC.

Pour l'ensemble des données granulométriques, on observe un « pic » de r^2 à la profondeur de 0.45m. Cet optimum représente la profondeur pour laquelle les données extraites sont les plus cohérentes avec les données mesurées. Cette corrélation suggère en première approche que c'est autour de cette profondeur, dans l'intervalle 0.30-0.60cm, que sont généralement extraites les terres employées dans les bâtiments échantillonnés.

Dans le détail, on observe que la variation de qualité de la corrélation ne suit pas la même dynamique selon la fraction granulométrique considérée. Plus la fraction est « fine » (p. ex. F2µm) plus la corrélation avec les horizons de surface est comparativement plus forte qu'avec les horizons profonds ; plus elle est grossière (p. ex. F2000_D) plus les horizons profonds sont mieux corrélés que les horizons de surface. Par exemple, pour F2000_D, la corrélation à -0.8m est supérieure à celle pour -0.2m, tandis que c'est l'inverse pour F2µm. Il y a un « décalage » de l'optimum vers la profondeur. La corrélation VBS-CEC pourrait même prolonger cette tendance, en représentant l'extrême côté « fin », avec une corrélation uniquement décroissante avec la profondeur.

Il est difficile d'interpréter cette variation granulométrie-dépendante de la corrélation. Elle pourrait avoir pour origine une corrélation de la variation de la qualité des données pédologiques avec la profondeur et/ou les passants granulométriques. Mais elle pourrait aussi présenter des indices du choix préférentiel de sols aux propriétés plus intéressantes que le sol sous-jacent, par exemple des sols choisis en moyenne plus fins ou plus grossiers, ou plus ou moins bien « distribués ».

Dans les sols naturels, et particulièrement dans les contextes de plateau et de sols issus de matériaux parentaux durs, la fraction granulométrique fine baisse généralement avec la profondeur au profit de la fraction grossière (Annexe I, 1.1.2). Si les constructeur.ices avaient choisi des terres plus fines que les terres sous-jacentes, alors la corrélation serait décalée vers la surface, car les terres employées ressembleraient plus aux terres de surfaces sous-jacentes qu'aux terres profondes. Dans ce cas, l'interprétation de l'optimum de profondeur est influencée par ce choix de sol. L'optimum observé de -45cm est peut-être proche de la « profondeur d'excavation initiale », mais on ne peut négliger que le fait que les constructeur.ices aient pu choisir un sol par exemple plus riches en cailloux (F2000_D) pourrait avoir fait artificiellement baisser la profondeur de l'optimum dans le calcul de corrélation. A l'inverse, si ce sont des sols pauvres en éléments grossiers qui ont été choisis, la profondeur de l'optimum de r2 est peut-être sous-estimée.

L'optimum de corrélation à la profondeur de -45cm indique que cette profondeur représente la « profondeur d'excavation moyenne de l'horizon sous-jacent au bâtiment » avec l'influence du fait que certains horizons supérieurs ou inférieurs *ressemblent plus* à la terre extraite *ailleurs*, choisie préférentiellement.

Comme pour les sur et sous-estimations des données mesurées (Figures 66 et 67), il est ainsi difficile de trancher entre un impact de choix préférentiel de sol autre que le sol sous-jacent ou un biais inhérent aux données.

2.7 Analyse : comparer des granulométries mesurées et les sols des bases de données pédologiques

Comparer sur un jeu de bâtiments les données de granulométrie mesurées dans les murs avec les données extraites des bases de données pédologiques permet de vérifier la qualité de la méthode de prédiction de composition des murs. Les données issues des bases de données DoneSol3 (vecteur-STU et vecteur-SMU) présentent de bonnes corrélations avec les données mesurées, au regard de la complexité du système étudié. On peut conclure de cette première analyse que la terre employée dans les murs est souvent extraite à proximité immédiate du bâtiment, mais il est très probable que ce ne soit pas toujours le cas. Par ailleurs, les résultats sont en accords avec la profondeur d'excavation suggérée dans la littérature. Ainsi l'intervalle 30-60cm semble être la plus représentative des strates des bases de données pédologiques.

Malgré la qualité moyenne des corrélations, aucun biais identifié ne semble suffisant pour effacer la corrélation entre sol sous-jacent et terre employée dans les murs lorsque les données employées sont

adéquates, pour les données DoneSol3 par exemple. Pour les autres sources de données pédologiques (GlobalSoilMaps et SoilGrids), c'est essentiellement une moindre acuité des données qui affecte la qualité des corrélations mesures/prédiction. Pour une analyse des choix techniques, il faudra en tenir compte pour GlobalSoilMaps, tandis que l'emploi de SoilGrids paraît compromis, du moins à l'échelle spatiale d'une région ou moins. Dans la suite des travaux, on peut espérer que l'augmentation du nombre d'échantillons et de la diversité des contextes pédologiques permettra de réduire l'aléa et certains biais.

L'objectif de la méthode de croisement de données est d'analyser les préférences de choix de techniques de construction en terre crue selon les propriétés de la terre à disposition. Les résultats de la comparaison mesure/prédiction ont été également analysés au regard de cet objectif, en cherchant la trace de choix préférentiels comme biais dans les corrélations. On a supposé que les incertitudes de modélisation (distance et profondeur d'extraction) pourraient introduire des biais dans les corrélations justement du fait que le sol et la profondeur d'extraction seraient choisis au regard de propriétés pédologiques comme la granulométrie. A l'échelle de nos 20 échantillons de pisé, nous n'avons cependant pas pu conclure sur la présence de ce type de biais, probablement dominés par les autres sources de biais identifiées ; et nous n'avons donc pas identifiés de choix préférentiels de terres pour le pisé sur ce jeu de données.

3 La densité relative pour représenter le choix préférentiel des techniques de construction

Après avoir validé la présence d'un minimum de corrélation entre les propriétés des échantillons de terre issus du patrimoine et les sols sous-jacents, nous pouvons espérer qu'un traitement statistique sur de nombreux échantillons permettent de visibiliser les éventuelles tendances de choix préférentiels de propriétés des terres pour construire en terre crue. Avant d'analyser les corrélations entre choix techniques et propriétés du sol, rappelons l'essentiel de la méthode employée et décrivons les choix de représentation graphique des résultats.

3.1 Rappels de la méthode

Lorsque l'on cherche à déceler l'impact des propriétés des terres locales sur les choix des techniques de construction, il est nécessaire de faire un échantillonnage de bâtiments représentatif de la diversité des sols locaux (Chapitre 3A, 3.3). Par exemple, si l'on sélectionne plus de bâtiments en terre sur un type de sol particulier que sur les autres, celui-ci paraîtra démesurément « adapté » alors qu'il s'agit d'un simple biais d'échantillonnage. On a nommé ce biais *représentativité pédologique.*

D'autre part, si dans la région d'étude, les populations humaines se sont installées préférentiellement sur des sols d'un type pédologique particulier, pour des raisons agricoles par exemple, une forte densité de bâtiments en terre crue sur ces sols ne serait pas liée à la préférence du matériau terre pour construire mais à un biais que l'on a qualifié *d'installation préférentielle des populations*. Dans la méthode de Hamard et al. (2018), les biais de *représentativité pédologique* et d'*installation préférentielle*, sont normalisés par l'utilisation de données de densité bâtie en matériaux préindustriels « tous matériaux confondus ». La base de données employées recense à la fois des bâtiments composés de terre crue (bauge) mais également des bâtiments construits en pierre ou en brique cuite. Pour chaque propriété pédologique étudiée, c'est une donnée de *densité relative* bâtie en terre qui est calculée,

plutôt qu'une donnée d'*occurrence simple* des bâtiments. S'il y a *installation préférentielle*, elle est également impactante sur le reste du patrimoine pré-industriel. S'il y a un échantillonnage inégal des bâtiments par rapport à une ou plusieurs typologies de sols, on suppose qu'il est le même pour les bâtiments en terre et pour les autres bâtiments. La *densité relative* bâtie en bauge est donc représentative d'un choix préférentiel *a priori* libéré de ces deux biais.

Dans cette étude, comme pour Hamard et al. (2018), c'est la base de données du Service du Patrimoine de Bretagne qui est utilisée pour obtenir des données de distribution du patrimoine bâti en bauge et autres matériaux préindustriels. Cependant, puisque cette donnée se limite au territoire de la région Bretagne et que nous souhaitons par la suite poursuivre cette étude à l'échelle nationale, nous analysons en parallèle le potentiel de deux autres sources de données dites *de densité* qui pourraient permettre de s'affranchir de bases de données décrivant le patrimoine bâti « tous matériaux » tout en réduisant au maximum les biais *d'installation préférentielle* (données OpenStreetMap) et de *représentativité pédologique* (données dites « échantillonnage aléatoire », données OpenStreetMap).

3.2 Rappel des données employées

La méthode consiste en l'extraction des données pédologiques à la localisation de chaque point-bâtiment, pour quatre bases de données :

- bauge (bauge): les bâtiments issus de la base de données du Service du Patrimoine de Bretagne identifiés comme composés de bauge (Chapitre 3A, 5.3.2.2).

- bâti Vernaculaire (SPbretagne): tous les bâtiments issus de la base de données du Service du Patrimoine de Bretagne identifiés comme issus du bâti préindustriel « vernaculaire* » (Chapitre 3A, 5.3.2.1), y compris ceux composés de bauge. C'est la donnée « de densité » de référence, permettant de calculer une densité relative bâtie en terre.

- bâti contemporain (OSM) : la localisation d'un échantillon aléatoire des bâtiments de la base de données OpenStreetMap sur la zone d'étude. Cette base de données « de densité » est testée comme alternative à Vernaculaire.

- Échantillonnage aléatoire (Aléatoire): un échantillonnage aléatoire dans l'espace de points. Les propriétés pédologiques extraites au niveau de ces points représentent la distribution générale des propriétés des sols de la zone. Cette base de données « de densité » est testée comme alternative à Vernaculaire.

Pour *OSM* et *Aléatoire*, le nombre d'échantillons est choisi comme égal à celui de *SPbretagne*, afin que les représentations de densités relatives bauge/Vernaculaire, bauge/OSM et bauge/Aléatoire aient des valeurs d'échelle semblable et puissent être représentées sur un même graphique. Les points issus de bâti OSM sont échantillonnés aléatoirement pour que leur nombre soit réduit.

Les 5 sources de données pédologiques décrites au Chapitre 3A (4.2) sont employées successivement pour le croisement de données. Pour chaque bâtiment, on extrait chaque propriété pédologique :

- raster-STU (fig. 69, 71) : La STU sous-jacente au bâtiment est directement identifiée. Les horizons de la base de données sont « reclassifiés » pour correspondre à la norme de classes de profondeurs des couches GlobalSoilMaps et SoilGrids, et la valeur de la couche 30-60cm est extraite et attribuée au bâtiment. Par le fait que cette représentation est issue de la base de données DoneSol3, base de données de référence en Bretagne, et que la représentation raster permette la localisation directe des STU, **raster-STU est la source de données de référence dans cette étude sur le territoire Breton.**

- vecteur-SMU (fig. 69, 71) : la SMU sous-jacente au bâtiment est identifiée. Dans cette SMU, on *moyenne* les valeurs de la propriété pédologique recherchée des horizons à -45cm de profondeur de l'ensemble des STU la composant, en pondérant par la surface de chaque STU dans la SMU. On attribue cette valeur moyennée au point-bâtiment situé sur la SMU.

- vecteur-STU (fig. 69, 71) : la SMU sous-jacente au bâtiment est identifiée. Dans cette SMU, un STU est sélectionné *aléatoirement* parmi ceux de la SMU sur laquelle il repose. La valeur des propriétés de l'horizon à -45cm de profondeur de la STU sélectionnée est attribuée au bâtiment.

- GlobalSoilMaps (GSM, fig. 70, 72) : la valeurs de la couche 30-60cm est extraite et attribuée au bâtiment.

- SoilGrids (SG, fig. 70, 72) : la valeurs de la couche 30-60cm est extraite et attribuée au bâtiment.

L'*occurrence* de chaque source de points-bâtiments (figure supérieure), puis la *densité relative* des bâtiments en terre (figure inférieure) sont représentées selon 5 variables :

- F2µm : passant granulométrique « argileux », en $g.kg^{-1}$ de la fraction fine* ;

- F50µm : passant granulométrique limoneux, en $g.kg^{-1}$ de la fraction fine ;

- F2000µm : passant granulométrique sableux, en $g.kg^{-1}$ de la fraction fine ;

- F2000µm_D : fraction d'éléments grossiers, en $g.kg^{-1}$ de la masse totale des solides ;

- CEC (sauf pour GSM): la capacité d'échange cationique du sol, en $mmol+.kg^{-1}$.

- Activité (sauf pour GSM): CEC/F2µm en $mmol+.g^{-1}$, représentant l' « activité argileuse » du sol (Annexe I, 2.2.4.3).

- profondeur (uniquement pour DoneSol3 : raster-STU, vecteur-SMU et vecteur-STU): la profondeur du profil de sol (profondeur de la STU), en m.

3.3 Données et mise en forme des résultats

3.3.1 Graphiques d'occurrence et de densité relative : lecture et remarques générales

Les résultats des croisements de données sont présentés sous forme de deux type de graphiques. Le premier type est un ensemble de paires de diagrammes en barres, proposé pour chaque propriété et chaque source de données pédologiques (5x7 paires de graphiques par zone d'étude) (Figures 69, 70, 71 et 72). Chaque graphique est identifié dans le texte par la source (p. ex. vecteur-SMU) et la propriété (p. ex. F2µm).

Pour chaque source-propriété, un premier graphique représente l'occurrence directe du nombre de bâtiments (en ordonnée), par intervalles de valeurs de la propriété pédologique (en abscisse). Par exemple, pour vecteur-SMU-F2µm, les intervalles de valeur représentent $50g.kg^{-1}$. Un deuxième graphique, sous le premier et partageant son axe d'abscisse ainsi que les intervalles de valeurs, représente la *densité relative* de bâtiments en terre crue, relativement à chacune des sources dites *de densité* (SPbretagne, OSM, Aléatoire) pour chaque intervalles de valeurs de la variable pédologique. Dans un intervalle de valeurs d'une propriété, on peut ainsi voir l'occurrence du nombre bâtiments en terre (en haut), ainsi que leur représentativité (en bas) parmi les bâtiments Vernaculaires (SPbretagne) ou relativement aux bâtiments contemporains (OSM) ou aux sols de la zone d'étude (Aléatoire).

La largeur de l'ensemble des intervalles a été choisie de telle sorte que la variabilité entre deux intervalles ne soit pas trop importante, permettant de lisser les tendances et facilitant la lecture. En Bretagne, pour les données issues de DoneSol3 (Figures 69 et 71), lors de la production des figures nous avons observé que la variabilité est plus forte que pour les autres sources de données (SG, GSM) comme observé en 2.5 pour la région Rhône-Alpes. Nous avons suggéré qu'il s'agissait d'un effet de lissage de la variabilité des sols locaux liée aux modèles de prédiction des données raster GSM et SG. D'autre part, les données texturales de DoneSol3 sont plus nombreuses pour les valeurs multiples de 50g.kg^{-1}, peut-être lié au fait qu'une partie d'entre elles soient issues d'estimations de terrain. Il était alors nécessaire d'agréger les données au moins à cette échelle d'intervalle. Malgré cela, la plus forte variabilité reste visible pour ces sources de données. Pour SG et GSM, les intervalles sont de 20g.kg^{-1} (Figures 70 et 72).

Enfin, afin d'éviter de fortes variabilités peu représentatives dans les intervalles avec peu de données, le nombre de bâtiment en terre nécessaires au calcul d'une valeur de densité relative (figures du bas pour chaque source-propriété) pour chaque intervalle est fixé à n=5.

Remarquons que les densités relatives bauge/Vernaculaire (courbes oranges sur les figures du bas) sont des densités « réalistes », car il s'agit des bâtiments en terre relativement à tous les bâtiments vernaculaires* pré-industriels (y compris la terre) de la même base de données: une densité de 1 indique que 100 % des bâtiments Vernaculaires de la zone sont en terre. Cela n'est pas atteint ici, mais certaines densités relatives s'en approchent, comme sur la Figure 72 pour GSM-F2000µm dans l'intervalle 80-100g.kg^{-1}. En revanche, OSM est composé de bâtiments contemporains, et pour Aléatoire le nombre de bâtiments est artificiel : la densité n'est pas « réaliste », et elle peut dépasser l'unité localement si le nombre de bâtiments en bauge est supérieur aux échantillons OSM et Aléatoire. C'est le cas pour GSM-F2000µm sur ce même intervalle, où bauge/OSM (courbe grise) dépasse l'unité. Nous avons ainsi limité la zone visible sur les graphiques à une densité de 1.25, mais la zone supérieur à 1 est hachurée pour rappeler qu'elle n'est pas « réaliste ».

L'occurrence de bâtiments composés de bauge est plus faible que l'occurrence de bâtiments Vernaculaires puisque les premiers sont inclus dans les seconds. De fait, l'occurrence de bauge est bien distinguable des trois sources de données *de densité* sur les graphiques d'occurrence (p. ex. voir vecteur-SMU F50µm): il s'agit souvent de la courbe d'occurrence la plus basse, en rouge. En revanche, l'occurrence n'évolue pas de manière directement proportionnelle aux occurrences des données *de densité*, comme en témoignent certains graphique de densité relative comme par exemple GSM-F50µm (Figure 70), qui présente une augmentation progressive de la *densité relative* selon la teneur en « limons » (F50µm) des sols. **C'est cette variation de densité relative que nous cherchons à visibiliser dans l'étude** : si la densité relative de bauge n'est pas la même quelle que soit la valeur de la propriété pédologique, c'est qu'un choix technique préférentiel relatif a lieu en *corrélation* avec cette variable. C'est à dire, que la technique de la bauge a été préférée ou évitée en corrélation avec la propriété pédologique étudiée. Ce qui peut présager d'une relation de causalité comme une plus grande aisance de mise en œuvre s'il ne s'agit pas d'un biais de corrélation indirecte (Chapitre 3A, 3.2).

3.3.2 Diagrammes des textures

Le deuxième type de graphique est un diagramme ternaire des textures (Figures 75-78, 106-110). Couramment employé en sciences pédologiques, il permet de représenter dans un seul diagramme les résultats obtenus pour l'ensemble des trois passants granulométriques de texture fine (F2µm, F50µm, F2000µm) (Chapitre 2, 2.2.2). Comme pour les diagrammes en barre, ils sont produits pour l'ensemble des sources de données pédologiques, soit 5 graphiques par zone d'étude.

Pour rappel, l'axe des abscisses indique la teneur en « argiles » (F2µm) en $g.kg^{-1}$ et l'axe des ordonnées celle en « limons » (F50µm) en $g.kg^{-1}$. Puisque la somme des fractions F2µm, F50µm et F2000µm est constante ($1000g.kg^{-1}$), la teneur en sable est proportionnelle à la distance à la proximité d'un point à l'origine du graphique. Un point situé à l'origine indique un sol composé à 100 % de « sable » (F2000µm) ; à l'extrême de l'abscisse 100 % d'« argile » (F2µm) ; à l'extrême de l'ordonnée à 100 % de « limons » (F50µm).

Pour représenter la *densité relative bâtie en terre* sur les triangles de texture, on délimite des classes de texture au sein desquelles on somme l'occurrence de bâtiments « terre » que l'on compare à l'occurrence de bâtiments *de densité* (SPbretagne, OSM, Aléatoire). Précisons que les classes sont délimitées par des intervalles sur les variables F2µm et F50µm, ce qui dans une représentation « triangle rectangle » du diagramme des textures équivaut à des zones carrées ; dans une représentation « triangle équilatéral », il s'agirait de losanges orientés dans la dimension F2000µm (sable). Sur chaque classe de texture, la densité relative est indiquée par un code couleur (nuances de rouges). Sont précisés le nombre de bâtiments en terre (au centre de la zone, en gros), et le nombre de bâtiments *de densité* (en haut à droite, en petit).

4 Relations entre sol et densité bâtie en bauge : données Vernaculaires en Bretagne

Dans un premier temps, sur les traces d'un travail semblable réalisée par Hamard et al. (2018), nous étudions les liens entre le patrimoine bâti en bauge en Bretagne et les propriétés des sols sous-jacents et à proximité. C'est l'occasion de tester puis optimiser la méthode, car ce n'est que sur le territoire de la région bretagne que nous disposons des données pédologiques « de référence », raster-UTS, et des données *de densité* idéales, SPbretagne.

4.1 Résultats par variable : graphiques d'occurrence et de densité

4.1.1 Données de densité « idéales » : bâti Vernaculaire SPbretagne

Observons la densité relative bauge/Vernaculaire (courbes oranges):

- F2µm (fig. 69, 70) : pour la plupart des sources de données pédologiques, la densité relative bâtie en terre prend la forme d'un « optimum » dans une courbe en cloche. Cependant, généralement la chute de densité relative est souvent située à l'extrémité des zones couvertes par les données, avec peu de données représentatives. Il s'agit donc peut-être d'un artefact lié au modèle, un « effet de bord ». SG présente cette dynamique, mais également les valeurs de l'ensemble des échantillons sont sensiblement supérieures et plus concentrées que pour les autres sources. En Bretagne, comme en Rhone-Alpes où l'on a pu l'observer pour les bâtiments de pisé (2.5), SG surestime la granulométrie « argileuse » (F2µm). Par ailleurs, vecteur-SMU restreint aussi les données à une plage plus étroite que les autres sources DoneSol3.

- F50µm (fig. 69, 70): On observe pour toutes les sources pédologiques une augmentation progressive de la densité relative bâtie en bauge avec la teneur en limons (F50µm). Par exemple, pour GSM-F50µm (Figure 70), la densité est faible entre 200 et 350 $g.kg^{-1}$, elle se stabilise à 0.2 entre 400 et 600 avant de monter rapidement à 0.5. Raster-STU et vecteur-STU (Figure 69) montrent les mêmes tendances. Ici aussi, SG (Figure 70) et SMU (Figure 69) « condensent » les données entre 400 et 700 $g.kg^{-1}$ là où les autres sources s'étalent sur une plage de valeurs deux fois plus grande.

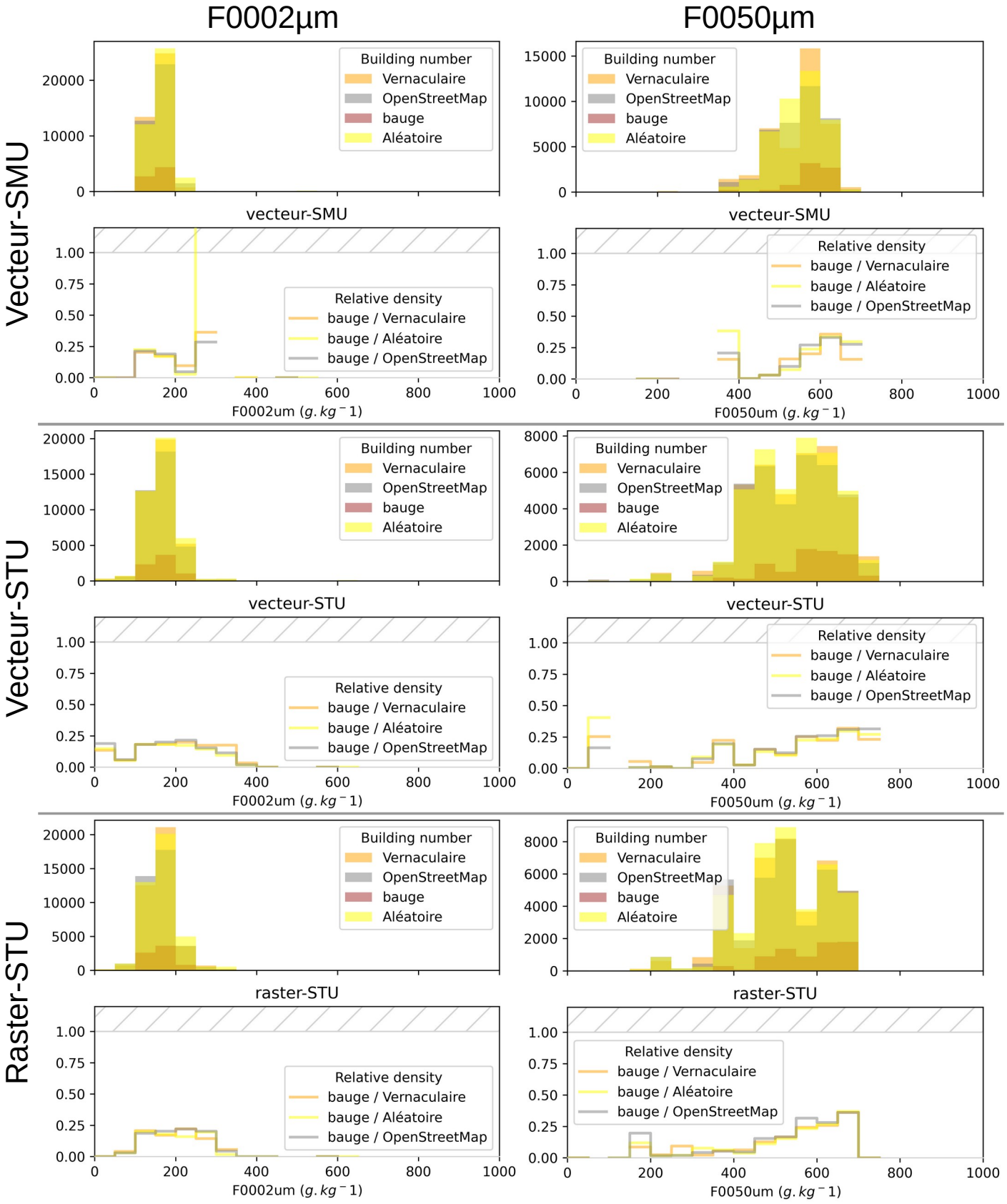


*Figure 69 : Occurrence de bâtiments en terre, vernaculaires, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en terre relativement aux bâtiments vernaculaires, OSM et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques **F2µm** (« argiles », colonne de gauche) et **F50µm** (« limons », colonne de droite) pour les sources de données pédologiques **vecteur-SMU**, **vecteur-STU** et **raster-STU**.*

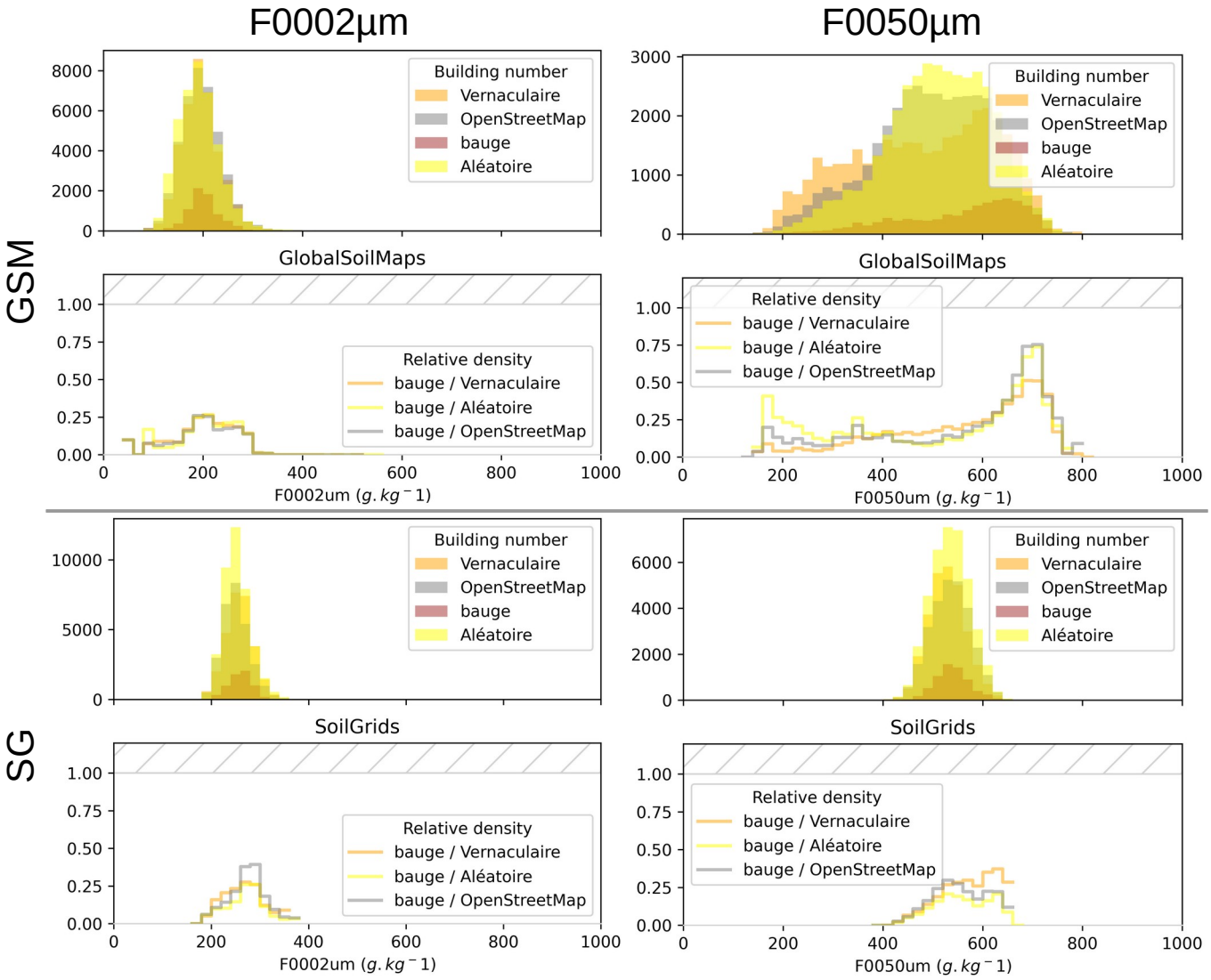


*Figure 70 : Occurrence de bâtiments en terre, vernaculaires, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en terre relativement aux bâtiments vernaculaires, OSM et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques **F2µm** (« argiles », colonne de gauche) et **F50µm** (« limons », colonne de droite) pour les sources de données pédologiques GlobalSoilMaps (**GSM**) et SoilGrids (**SG**).*

- F2000µm (« sable », fig. 71 et 72) : la progression de la densité relative et cette fois-ci décroissante : plus la teneur en sables est faible, plus la densité bâtie est forte. En fait, elle semble assez symétrique à celle observée pour F50µm : c'est assez clair pour GSM-F50µm (Figure 71), avec cette même tendance à deux plateaux (700-500, puis 500-200) puis une forte augmentation jusqu'à 0.8 de densité autour de 100g.kg^{-1}. En ce qui concerne la « concentration » des résultats pour SoilGrids et vecteur-SMU, on peut donner les mêmes conclusions que pour F2µm et F50µm.

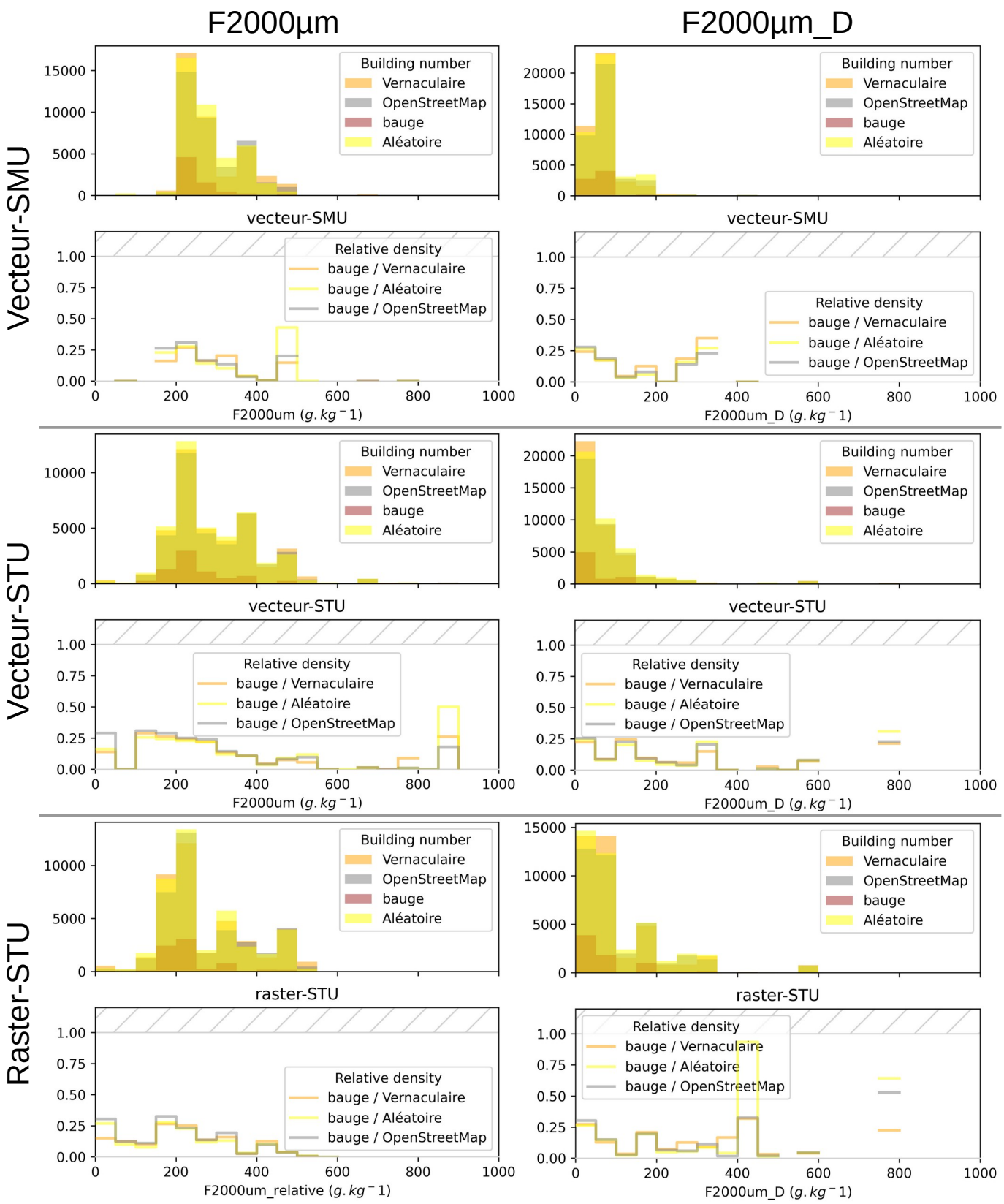


*Figure 71 : Occurrence de bâtiments en terre, vernaculaires, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en terre relativement aux bâtiments vernaculaires, OSM et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques **F2000µm** (« sable », colonne de gauche) et **F2000µm**_D (« graviers », colonne de droite) pour les sources de données pédologiques **vecteur-SMU**, **vecteur-STU** et **raster-STU**.*

- F2000µm_D (« éléments grossiers », fig. 71 et 72)) : la teneur en éléments grossiers (EG) de la plupart des sols étudiés est comprise entre 0 et 200 $g.kg^{-1}$. Au delà, les données sont moins fiables et sujettes à aléas. Sur cette plage de valeurs, une décroissance de la densité bâtie en bauge relativement à la teneur en EG est visible pour vecteur-SMU, vecteur-STU (Figure 71) et GSM (Figure 72). Cette tendance est moins claire pour raster-STU (Figure 71). Ils semblent globalement surestimés et concentrés pour SG en comparaison avec les sources DoneSol3 (Figure 72), alors que pour la comparaison d'échantillons de pisé en Rhone-Alpes, la teneur en EG de SG semblait plutôt sous-estimée par rapport aux autres sources pédologiques (Figure 65). Relevons cependant que les teneurs en EG moyennes de SG sont concentrées autour de $150g.kg^{-1}$ en Bretagne comme déjà observé en Rhône-Alpes : peut-être que SoilGrids donne une valeur relativement constante à cette propriété pédologique sur les deux régions, et peut-être ainsi sur l'ensemble du territoire Français hexagonal.

Par ailleurs, de manière surprenante, GSM ne présente aucune valeur inférieure à $50g.kg^{-1}$ (Figure 72), alors qu'il est très probable que la zone bretonne présente au moins quelques sols dans cette plage de valeurs (par exemple, limons éoliens épais). Vecteur-SMU (Figure 71) ne présente pas de concentration exagérée des données pour cette propriété contrairement à ce qui a été observé pour les autres propriétés granulométriques.

- CEC (fig. 73) : Les valeurs de CEC sont essentiellement distribuées entre 0 et 150 $mmol^{+}.kg^{-1}$. SoilGrids surestime complètement la CEC au point de ne pas présenter de sols aux CEC inférieures à 100 $mmol+.kg^{-1}$, ce qui est assez peu probable au vu des valeurs des données DoneSol3 raster-STU. Dans l'ensemble, on n'observe pas vraiment de tendance préférentielle sur les densités relatives. Pour raster-STU et vecteur-STU, il semble y avoir une baisse de densité assez marquée autour de $75mmol+.kg^{-1}$, mais c'est également la zone à partir de laquelle il n'y a plus beaucoup de données, ce qui constitue peut-être encore un « effet de bord ».

- Activité (fig. 73) : L'activité est la CEC divisée par la fraction granulométrique argileuse (F2µm). Elle est considérée comme indicateur potentiel de l'activité électronique des minéraux argileux du sol et donc de leur minéralogie (Annexe I, 2.2.4.3). La densité relative bâtie en terre semble décroître lorsque l'activité augmente à partir d'environ 0.50 $g.mmol+^{-1}$ (Vecteur-SMU, Vecteur-STU, raster-STU). Ce pourrait être directement l'effet de la baisse de CEC observée. La baisse est également observée dans des zones ou la quantité de données est peu représentative. Obtenir plus de données dans la zone d'activité 0.50-1.00 serait intéressant pour conclure.

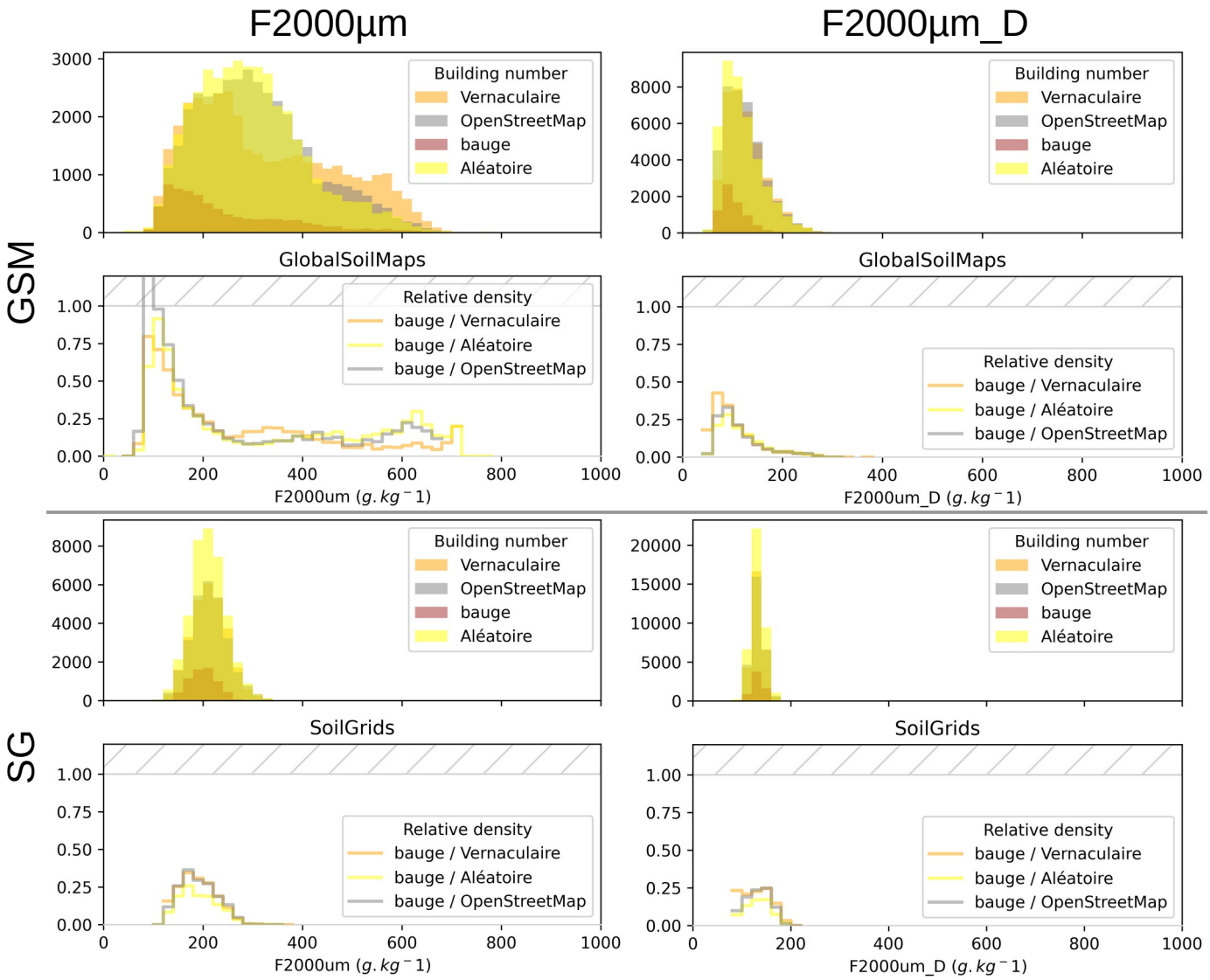


Figure 72 : Occurrence de bâtiments en terre, vernaculaires, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en terre relativement aux bâtiments vernaculaires, OSM et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques F2000µm (« sables », colonne de gauche) et F2000µm_D (« graviers », colonne de droite) pour les sources de données pédologiques GlobalSoilMaps (GSM) et SoilGrids (SG).

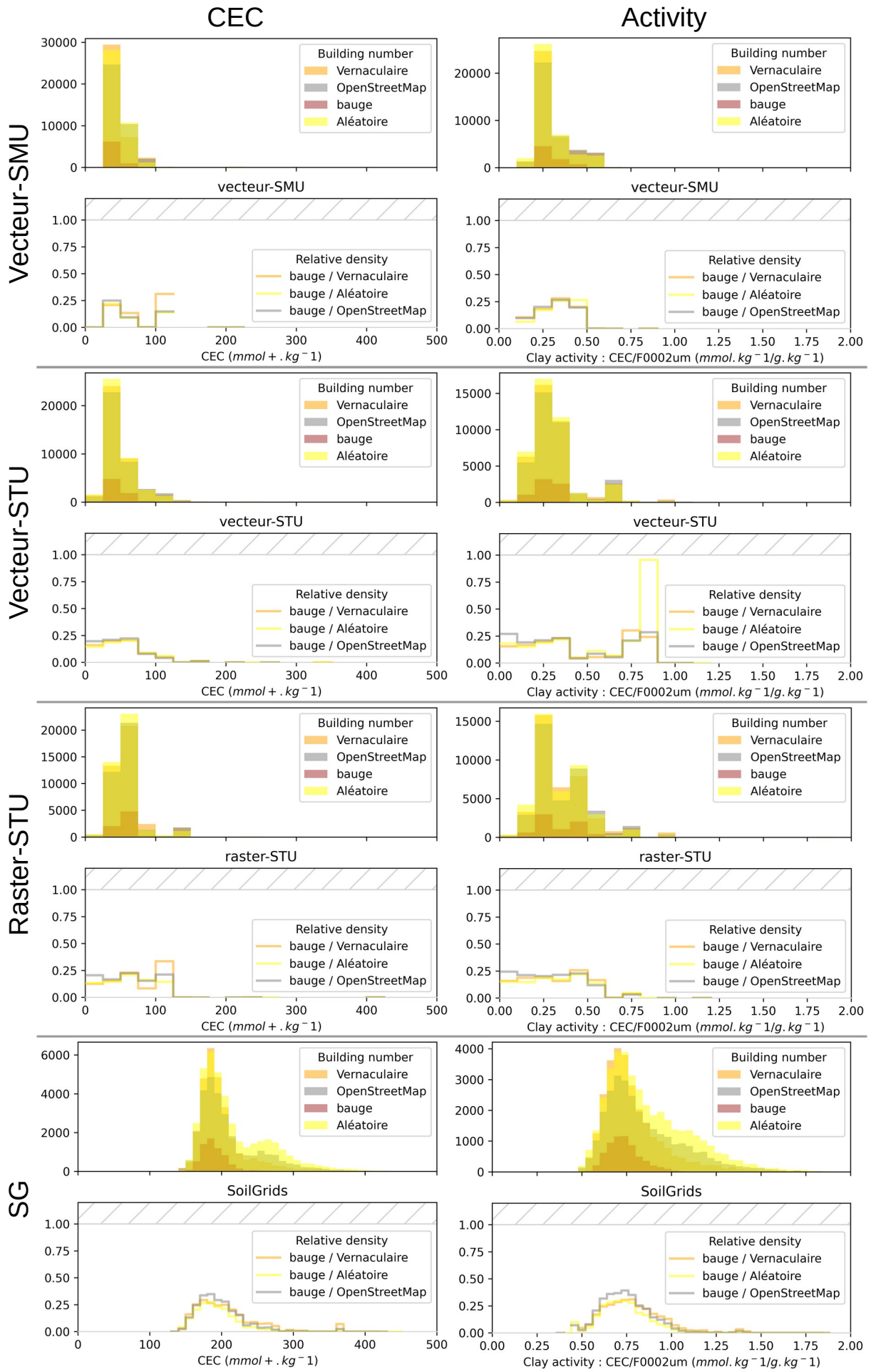


Figure 73 : Occurrence de bâtiments en terre, vernaculaires, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en terre relativement aux bâtiments vernaculaires, OSM et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques CEC (colonne de gauche) et Activité (CEC/F2µm, colonne de droite) pour les sources de données pédologiques vecteur-SMU, vecteur-STU, raster-STU et SG.

- Profondeur du sol (fig. 74) : La variable considérée comme représentant l'épaisseur du sol, ou la « profondeur du profil de sol », est la profondeur maximale renseignée dans la base de données DoneSol du dernier horizon de chaque STU. La plupart des profils de sol ont une profondeur située entre 0.5 et 1.5m. C'est en effet la profondeur de pédogenèse classique dans le climat hexagonal (Chapitre 2, 3). Sur Vecteur-STU, on observe une croissance de densité relative bâtie en bauge avec l'augmentation de la profondeur du sol entre 0 et 1m. Au delà, la profondeur ne semble plus avoir d'impact. La tendance est plus variable pour vecteur-SMU. Surtout, vecteur-SMU, comme pour les autres propriétés pédologiques, rassemble les données autour de la moyenne : il n'y a plus de sols inférieurs à 0.5m de profondeur. Au-delà de 2m de profondeur, quelques artefacts sont présents avec de fortes variations. Mais le faible nombre de bâtiments concernés (graphique supérieur) nous suggère de négliger ces données.

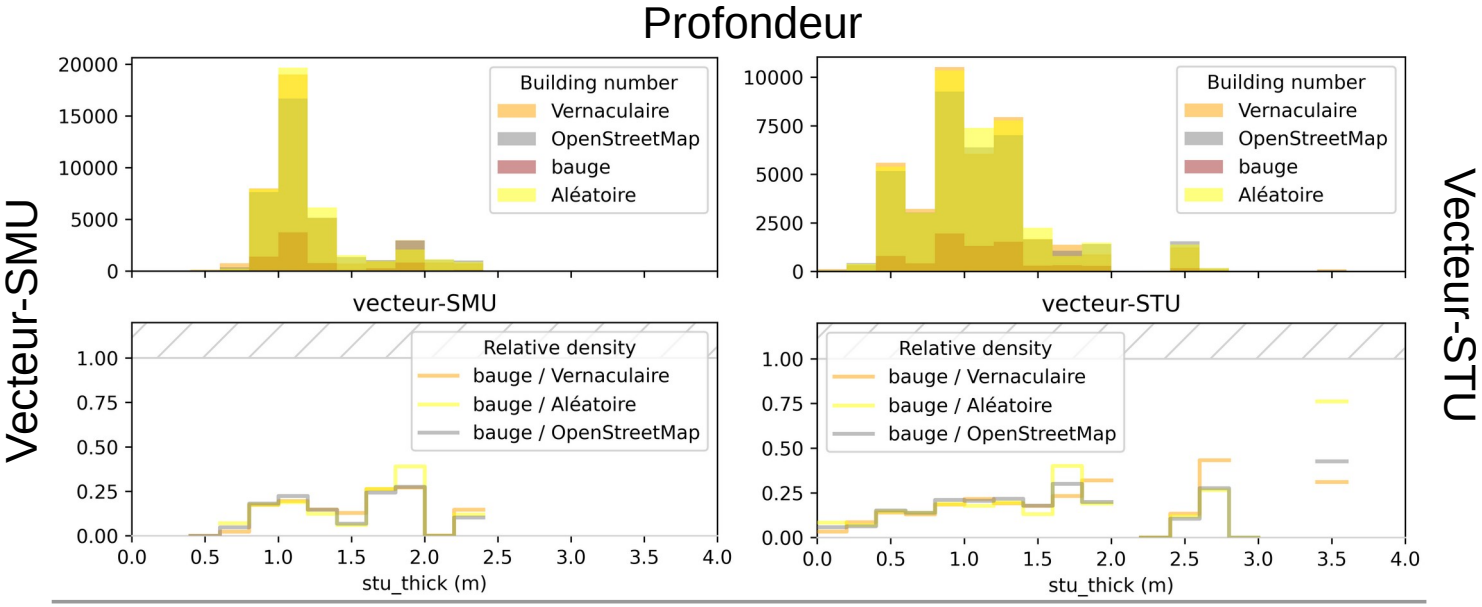


Figure 74 : Occurrence de bâtiments en terre, vernaculaires, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en terre relativement aux bâtiments vernaculaires, OSM et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon la profondeur du sol pour les sources de données pédologiques vecteur-SMU et vecteur-STU.

4.1.2 Autres sources de données « de densité » : Vernaculaire, OSM, Aléatoire

Le paragraphe précédent décrit les résultats de l'évolution de la densité relative de bauge par rapport aux bâtiments Vernaculaires (courbe orange sur les graphiques de densité). Sur les graphiques sont également représentées les occurrences directes (graphiques supérieurs) et les densités relatives par rapport aux données de densité OpenStreetMap (courbe grise) et Aléatoire (courbe jaune).

En ce qui concerne les occurrences directes (graphiques supérieurs), on remarque que les occurrences des trois données *de densité* (Vernaculaire, OSM et Aléatoire) se superposent relativement bien pour la plupart des variables pédologiques étudiées. Cependant, pour certaines variables comme GSM-F50µm (Figure 70) et GSM-F2000µm (Figure 72), les données extraites aux points-bâtiments Vernaculaires ne sont pas parfaitement superposées aux données OSM et Aléatoire.

Cette différence est parfois assez marquée comme pour GSM-F50µm (Figure 70), où les données Aléatoire sont largement inférieures en occurrence (graphique du haut, courbe jaune) avant 400g.kg^{-1} puis deviennent largement supérieures ensuite. Les données OSM (courbe grise) semblent avoir une position légèrement intermédiaire, mais tout de même relativement proches d'Aléatoire.

Dans l'ensemble, on peut retrouver cette tendance sur d'autres figures. Il est impossible de le voir clairement pour les données DoneSol3 qui présentent une trop grande variabilité. Pour GSM et SG, on peut retrouver localement cette tendance, mais parfois OSM n'est pas en position intermédiaire entre Aléatoire et Vernaculaire.

4.2 Projections dans le diagrammes ternaires des textures

4.2.1 Données de densité « idéales » : bâti Vernaculaire SPbretagne

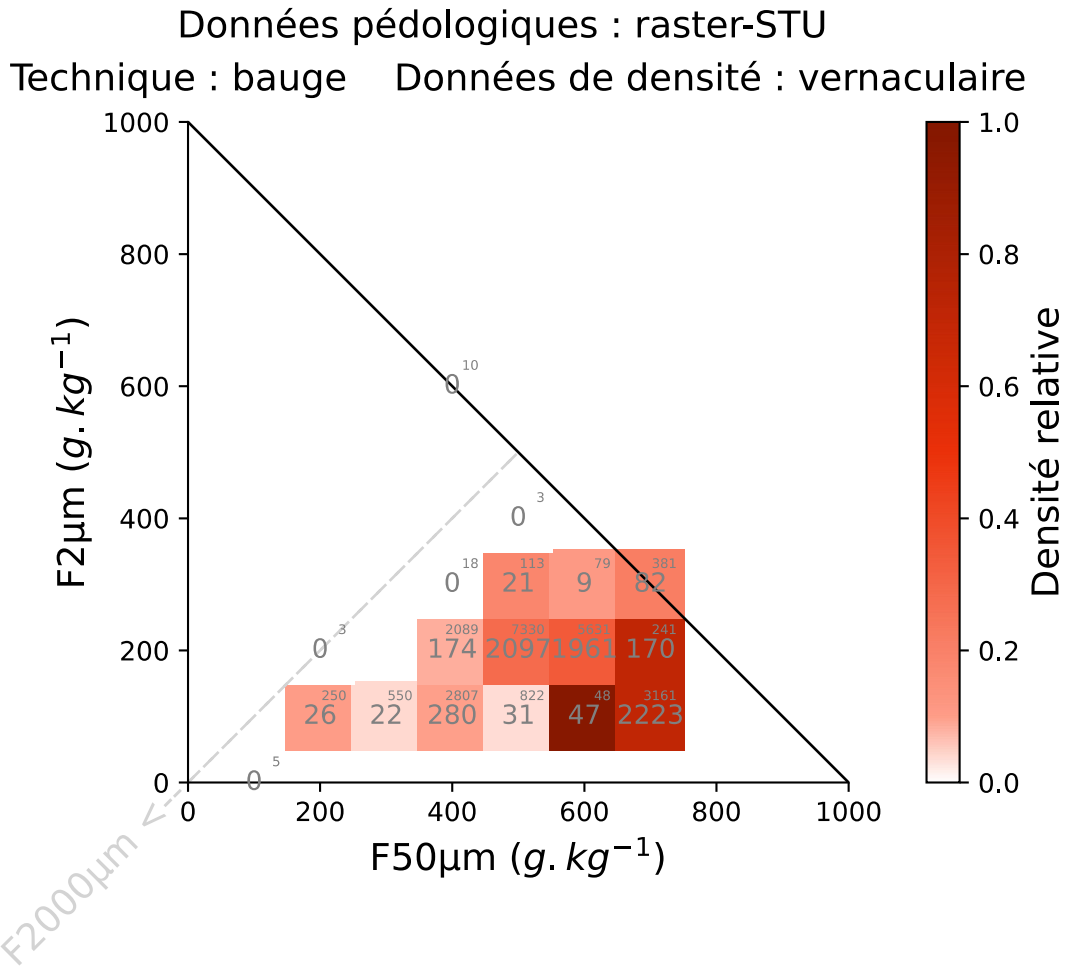


Figure 75 : Densité bâtie en bauge relativement au bâti Vernaculaire en Bretagne, par classe de texture du sol. Données pédologiques raster-STU.

La projection de la densité relative par classes texturales permet d'observer une augmentation de la densité relative des classes texturales à mesure que la fraction F50µm augmente, comme déjà observé sur les figures 69 et 70. Le pôle « limoneux » apparaît ainsi plus favorable à l'occurrence de bâtiments en bauge en Bretagne.

4.2.2 Variation des données pédologiques

Les résultats obtenus en employant les quatre autres sources de données pédologiques (vecteur-STU, vecteur-SMU, GlobalSoilMaps et SoilGrids) sont présentés en Figure 76.

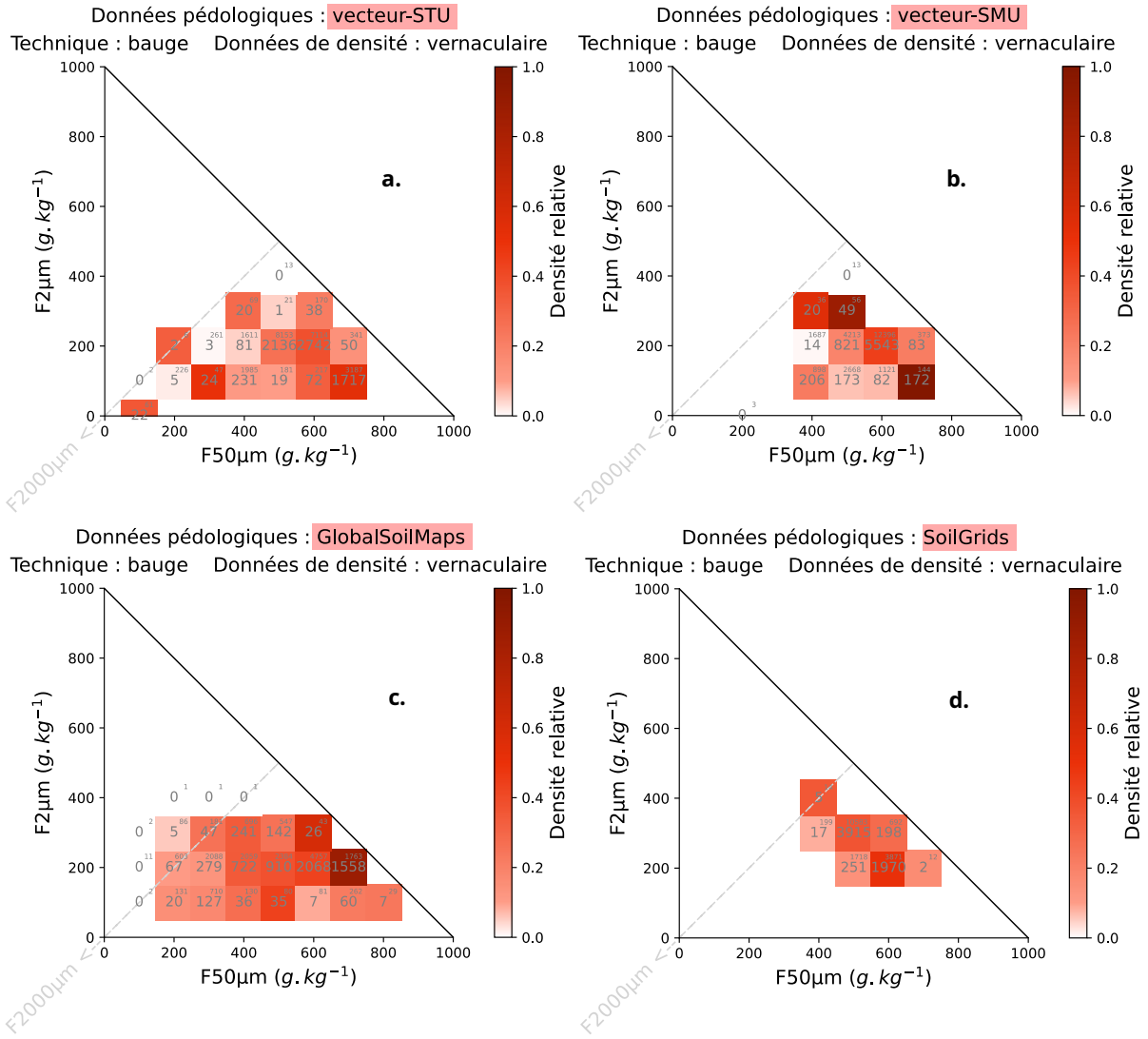


Figure 76 : Densité bâtie en bauge relativement au bâti Vernaculaire en Bretagne, par classe de texture du sol. Données pédologiques : a. vecteur-STU, b. vecteur-SMU, c. GSM, d. SG.

La croissance de densité à mesure du rapprochement du pôle limoneux est toujours visible pour vecteur-STU (Figure 76, a.), mais cependant moins claire, avec quelques « pics » de densité relative éloignés du pôle limoneux : par exemple à 200;200, 300;100 ou 400;300 (F50µm;F2µm). Ces données pédologiques sont moins précises que raster-STU, pour lesquelles le sol sélectionné dans le choix aléatoire-pondéré d'une STU n'est pas toujours le bon, ce qui pourrait être la source de ces pics.

GlobalSoilMaps présente une variation très progressive de la densité relative (Figure 76, c.), comme observé sur les représentations « mono-variables ».

L'effet de « concentration » des données déjà observé pour vecteur-SMU et SoilGrids sur les représentations mono-variable est ici bien illustré dans la représentation texturale (Figure 76, b. et d.). Les échantillons sont concentrés dans la fraction 400-700 g.kg^{-1} alors qu'ils sont distribués sur la quasi-totalité du spectre limoneux pour GSM et vecteur-STU.

4.2.3 OpenStreetMap comme donnée de densité

En dehors du territoire breton, nous ne disposons pas des données de densité *Vernaculaire*. Nous avons pu tester les données OpenStreetMap comme alternative. Nous observons les résultats obtenus pour la densité relative OpenStreetMap sur la Figure 77. Du fait de la faible qualité des résultats observés pour vecteur-SMU et SoilGrids, nous ne présentons ici que les résultats produits à partir des données pédologiques raster-STU (a.), vecteur-STU (b.) et GlobalSoilMaps (c.).

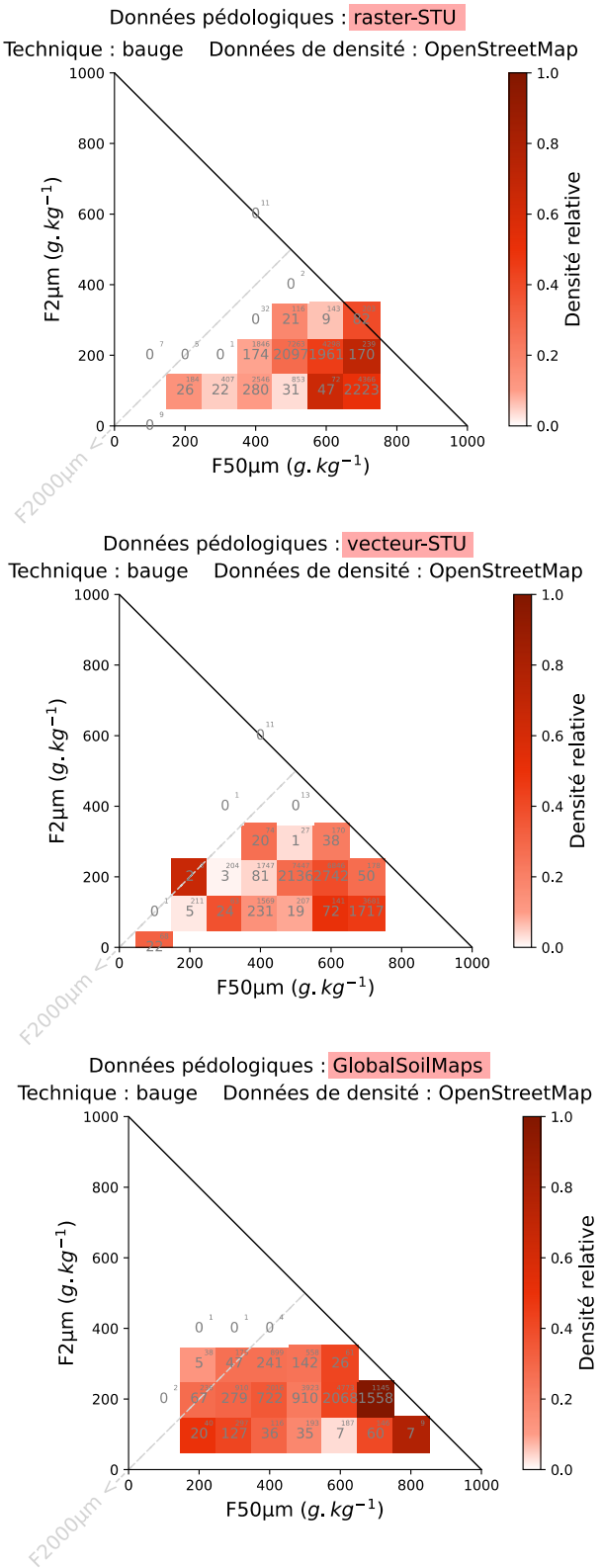


Figure 77 : Densité bâtie en bauge relativement au bâti OpenStreetMap en Bretagne, par classe de texture du sol. Données pédologiques : a. raster-STU, b. vecteur-STU, c. GSM.

En ce qui concerne raster-STU et vecteur-STU, on ne constate pas de changement majeur dans les résultats obtenus. La tendance progressive vers les fortes teneurs en limons est toujours présente, et les pics de densité de vecteur-STU sont globalement les mêmes.

En revanche, pour GlobalSoilMaps, on observe une augmentation bipolaire avec un nouveau pôle de fortes densités qui se distingue sur les sols plus sableux. Ce pic était déjà remarqué sur la Figure 68 pour GSM-F50µm ; mais il apparaît encore plus clairement ici du fait de l'étalement des valeurs selon F2µm.

4.3 Discussion

4.3.1 Comparaison à la littérature existante : reproductibilité ?

La Figure 75b. est produite avec les mêmes sources données *bauge* et *de densité* que celles employées par Hamard et al. (2018), ainsi que les mêmes données pédologiques (vecteur-STU, Chapitre 3A, 4.3.1.3.2). Lorsque l'on compare les résultats de densité relative avec ceux proposés par Hamard et al., on constate qu'ils coïncident, malgré la différence dans les méthodes d'analyse et de visualisation des résultats. Il y a donc une bonne reproductibilité de cette méthode à l'usage de données similaires. Il est intéressant de remarquer que raster-STU, en apportant plus de précision, confirme également la tendance croissante de densité avec la teneur en limons, très claire sur le territoire breton.

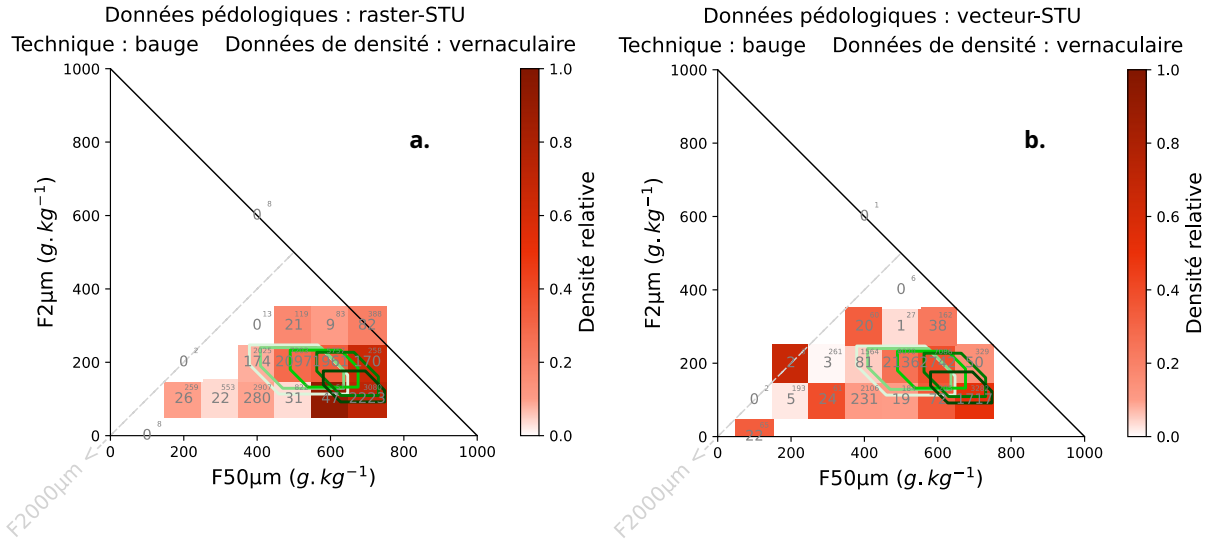


Figure 78 : Densité bâtie en bauge relativement au bâti OpenStreetMap en Bretagne, par classe de texture du sol. Données pédologiques issues de DoneSol3 : raster-STU, vecteur-STU. En teintes de vert : zones de densité relative croissante, par Hamard et al. (2018) (voir Chapitre 1, Figure 24)

4.3.2 Qualité des données pédologiques

La donnée pédologique « de référence » sur la région Bretagne est le RRP rasterisé raster-STU (Chapitre 3A,Erreur : source de la référence non trouvée). L'extraction vecteur-STU semble avoir une assez bonne corrélation avec raster-STU : malgré un échantillonnage aléatoire des STU sélectionnées dans la SMU, la quantité de données permet un lissage convenable de l'aléa, comme nous l'avions observé dans la production des figures de comparaison des données de pisé (2.5). GlobalSoilMaps montre également une bonne adéquation avec raster-STU, à l'exception de la teneur en EG (Figure 72). La teneur en EG est probablement plus variable et difficile à capturer par l'algorithme de prédiction de GSM, d'autant plus si l'on considère que GSM est dérivé des données de DoneSol3 (Chapitre 3A, 4.2.4). Surtout, la forme rasterisée de GSM apporte un lissage des données car les valeurs sont continues

entre les différents pixels du raster alors que les limites sont abruptes entre les SMU ou le raster des STU. Dans notre cas, comparée aux formes vecteur de DoneSol3 (vecteur-STU et vecteur-SMU), la version raster de GSM a non seulement facilité le traitement mais également la lecture des résultats. L'inconvénient est peut-être que cela lisse la réalité de la variabilité locale des propriétés des sols.

SG et vecteur-SMU « concentrent » les données de la plupart des variables sur des plages de valeurs plus restreintes que les autres sources pédologiques. Cela est particulièrement le cas pour les données granulométriques.

Pourtant, vecteur-SMU collecte les données dans la même base de données (DoneSol3) que vecteur-STU et raster-STU. La différence est qu'à l'extraction, Vecteur-STU et raster-STU prennent des valeurs réelles de profils de sols; tandis que vecteur-SMU moyenne les valeurs des STU préalablement au croisement. Ce moyennage ne fait pas que lisser les occurrence des différents types de sols mais supprime les valeurs extrêmes. Par exemple, prenons une SMU théorique composée de deux STU dont chacune couvre 50 % de la surface, sur laquelle nous extrayons les données pour 10 points-bâtiments. Si la première présente une texture très « grossière » sablo-limoneuse, et la seconde une texture très fine, alors dans le cas de l'extraction « moyennée » (vecteur-SMU) l'ensemble des points prend une valeur de texture « équilibrée » ; tandis que dans le cas d'une extraction aléatoire environ la moitié des points prend la valeur grossière, et l'autre la valeur fine. Dans le premier cas, on a des échantillons distribués aux extrêmes d'un triangle des textures ou des axes des graphiques de densité et d'occurrence ; dans l'autre les échantillons sont regroupés à la moyenne des valeurs, éventuellement plus « centrées ». La médiane d'une propriété pédologique pour un groupe de bâtiments (en terre, ou données de densité) est semblable dans les deux cas, mais l'étalement des données est réduit dans le second. Les résultats, et leur interprétation, ne sont alors pas du tout les mêmes.

Le caractère « relatif » des données granulométrique entre elles est particulièrement impacté par ce mode d'extraction : l'effet est de rapprocher l'ensemble des données au « centre » du triangle des textures, dans un moyennage qui au lieu de « lisser » la lecture pour la facilité, finit par invisibiliser la variabilité et déplacer les valeurs vers des zones peu représentatives.

Ainsi, nous pensons que l'approche d'agrégation des propriétés à l'échelle des SMU par moyennage pondéré des propriétés des STU, proposée par (Lemercier et al. 2022) pour la comparaison des prédictions des bases de données pédologiques, n'est pas adaptée à une étude comparant des données dans le détail de la distribution des valeurs de chaque propriété pédologique comme c'est le cas ici. Nous suggérons qu'une extraction aléatoire pondérée est plus pertinente. Toutefois, pour un très faible nombre d'échantillons, aucune des méthodes ne saurait être satisfaisante et la présence d'une base de données comme raster-STU ou éventuellement GSM serait indispensable pour éviter les biais de sélection de la STU.

Nous ne connaissons pas les méthodes de production des données SoilGrids, probablement produites également à partir des Référentiels Pédologiques et DoneSol3, mais on peut suggérer que c'est une méthode de moyennage qui est utilisée et qui donne donc cette même dynamique de « moyennage » des données.

Les données vecteur-SMU et SoilGrids ne semblent pas adaptées à une évaluation des liens entre propriétés pédologiques et occurrence d'un phénomène relatif à une distribution des valeurs de propriétés du sol, comme la densité relative bâtie en terre crue. En l'absence de données raster-STU sur le reste du territoire hexagonal, nous emploierons les données GlobalSoilMaps et vecteur-STU : les premières permettant de saisir les tendances d'un coup d'œil grâce à un lissage facilitant la lecture, les

secondes permettant de valider ou non les tendances observées sur les premières, car les données DoneSol3 restent les données pédologiques de référence pour les sols du territoire hexagonal.

4.3.3 Choix technique

L'existence de corrélations marquées entre les densités relatives bâties en bauge et les propriétés pédologiques F50µm et F2000µm indiquent une vraie corrélation de ces variables avec le choix préférentiel de la technique de construction bauge. A ce stade, la compréhension de la causalité reste encore difficile, mais nous suggérons qu'elle peut être issue de :

1) l'amélioration de la facilité de mise en œuvre de la bauge avec l'augmentation de la teneur en limons, matériau aisément modelable (Chapitre 2, 6.1)

2) la corrélation entre la teneur en limon et la profondeur des sols, qui défavoriserait l'accès à la pierre pour construire. Cela est très probable en Bretagne car les sols les plus limoneux sont issus de dépôts de limons éoliens épais qui recouvrent des substrats rocheux et les rendent inaccessibles.

3) La décroissance de la densité bâtie en bauge lorsque la teneur en éléments grossiers augmente (p. ex. Figure 72, GSM-F2000µm_D) peut s'expliquer par une moindre qualité de la terre pour bâtir en bauge.. En effet, la teneur en éléments grossiers est parfois considérée comme défavorable à l'emploi de la terre pour bâtir en bauge : elle complexifie le façonnage par modelage, éventuellement le piétinement, et rend pénible le tranchage. Mais du patrimoine bâti comprenant de gros éléments existe, et des stratégies d'adaptation sont possibles : retrait des plus gros éléments, pas de tranchage, etc..

4) Mais la décroissance de densité avec l'augmentation de la teneur en EG pourrait également être liée à la réduction de l'accès aux « pierres volantes » pour bâtir en pierre (Chapitre 3A, 3.4.6). C'est peut être également une corrélation avec la profondeur du sol, car la teneur en éléments grossiers augmente à l'approche du matériau parental : à -45cm, plus le sol est profond, moins il est pierreux en moyenne.

5) la réduction de densité bâtie en bauge liée à l'augmentation de la teneur en sable est probablement liée aux trois autres explications, par inter-corrélations entre ces variables toujours fortement intercorrélées.

L'augmentation de la densité bâtie en bauge avec l'augmentation de la profondeur du sol entre 0 et 1m tend a confirmer les secondes et quatrièmes hypothèses, selon lesquelles c'est l'accès à la pierre – comme matériau parental du sol, ou la teneur en pierre des horizons de surface – qui gouverne le choix relatif de la technique de la bauge.

Rappelons par ailleurs que les données issues des bases de données DoneSol3 (vecteurs et raster-STU) sont des données mesurées *in situ* tandis que GSM est un modèle de prédiction (4.2.4) : il est probable que les corrélations entre variables pédologiques (par exemple profondeur et teneur en éléments grossiers) soient des variables de calcul dans les modèles employés pour produire les données GSM. De ce fait lorsque des données manquent, les modèles de prédiction des données GSM appliquerait mécaniquement ces corrélations. Elles apparaîtraient finalement comme encore plus exacerbées dans la cartographie finale; alors que la variabilité naturelle et décorrélée des autres variables soit encore présente pour les données directement issues de DoneSol3. Par exemple, une mesure peut montrer de fortes teneurs en EG en surface dans les données DoneSol3 dans un sol à pédogenèse particulière ; là où GSM ne prendra pas en compte ce détail. Les producteur.ices des données GSM indiquent que la variabilité de la variable « teneur en EG » est particulièrement mal appréhendée par GSM du fait de sa variabilité locale assez imprédictible.

Dans l'observation des résultats de densité relative, nous notons un certain « effet de bord » pour chacune des variables pédologiques : dès lors qu'il n'y a plus beaucoup de données, la tendance montre plutôt une baisse de la densité relative plutôt qu'une simple augmentation de la variabilité. Il y a donc, en périphérie des zones pédologiques où la densité de données est forte, une sur-représentation des données de densité relativement aux données terre.

Cette tendance donne la fausse impression d'une densité relative « en optimum ». C'est pourquoi, dès lors que ce type de corrélation est observé il est nécessaire de vérifier si le nombre de bâtiments concernés est bien significatif sur le graphique sus-jacent. En pratique, il existe probablement des relations d'optimums entre les propriétés pédologiques et les choix techniques, mais sur les résultats précédents nous pensons qu'il s'agit essentiellement d'un artefact liée à la modélisation.

Cette tendance est peut-être liée aux choix de modélisation : la distance de délimitation de la zone d'étude autour des bâtiments en terre, appelée distance de diffusion D (Chapitre 3A, 5.3.3.1) est peut-être trop grande, ajoutant un trop grand nombre de bâtiments Vernaculaires en dehors de la zone de déploiement de la technique. Peut être également qu'une meilleure sélection du nombre d'échantillons minimums pour afficher une densité relative dans un intervalle sur les graphiques de densité relative (ici n=5) réduirait ces « effets de bord ».

4.3.4 Données « de densité » et installation préférentielle

La différence de distribution des occurrences entre Vernaculaire et Aléatoire, observée assez clairement pour GSM-F50µm (Figure 70), peut être liée au biais d'*installation préférentielle des populations* : les bâtiments vernaculaires préindustriels ne sont pas disposés aléatoirement sur le territoire mais peuvent présenter des biais et aléas de distribution qui peuvent affecter leur distribution relativement à certains propriétés du sol, par exemple si certains sols plus favorables à l'agriculture et que la densité bâtie générale y est plus concentrée (Chapitre 3A, 3.3). Cela peut être également une autre raison corrélée logiquement ou accidentellement aux données pédologiques, par exemple l'occurrence d'une plus grande densité de population sur une zone pédologique particulière sans impact direct du sol sur ce phénomène.

Ainsi, en ayant uniquement la donnée de densité Aléatoire, nous n'aurions pas observé la croissance bien régulière de densité relative observée pour bauge/Vernaculaire sur GSM-F50µm (Figure 70). Il aurait été difficile d'interpréter les quelques pics de densité observés pour bauge/Aléatoire ou bauge/OSM. La source de données Vernaculaire apporte donc une normalisation relative à la densité bâtie tous matériaux, qui est appréciable dans la compréhension des densités relatives et donc éventuellement des choix techniques préférentiels.

Sur cette même figure (Figure 70), et globalement dans l'ensemble des données, la distribution des occurrences de la donnée de densité OSM semble montrer une dynamique intermédiaire entre Vernaculaire et Aléatoire, cependant bien plus proche de la tendance Aléatoire. Cette comparaison directe nous montre que la distribution des bâtiments contemporains se rapproche d'une disposition aléatoire, là où les bâtiments vernaculaires historiques avaient une distribution spatiale corrélée aux propriétés des sols. Les sols contemporains ne présente alors presque pas de phénomènes d'installation préférentielle relativement aux sols. On suppose que c'est parce que la construction des édifices en contexte industrialisé est décorrélée des conditions environnementales car les modes de vie ne sont plus guidés par l'environnement, n'y sont plus *enracinés* (Chapitre 3A, 3.3). La distribution des bâtiments n'est pas aléatoire dans l'espace car elle se fait principalement à proximité des métropoles, mais elle est devenue aléatoire relativement aux propriétés pédologiques. Cette observation suggère que le biais d'installation préférentielle observé pour Vernaculaire est bien lié à une causalité environnementale : au moins corrélée aux propriétés pédologiques, par exemple

l'installation à proximité du réseau hydrique qui favoriserait des sols alluvionnaires particuliers ; sinon directement causée par les propriétés des sols, par exemple par préférence agricole. Ici, la *cause* de la plus grande densité de bâtiments vernaculaire observée sur des sols pauvre en limons est difficile à interpréter sans une analyse géographique et historique plus détaillée.

Nous espérions que la donnée de densité OSM soit une équivalence correcte d'une donnée Vernaculaire, afin de pouvoir l'employer sur des zones où nous ne disposons pas de données Vernaculaires comme en Bretagne. Cependant, ce résultat n'est pas vraiment observé : OSM est distribué relativement aléatoirement selon les sols. Parfois, la dynamique d'OSM est légèrement intermédiaire à Vernaculaire et Aléatoire, comme on a pu le constater pour GSM-F50µm (Figure 70); mais cela reste assez variable. OSM ne peut donc être utilisé en l'état comme donnée de densité équivalente à Vernaculaire, mais seulement comme une approximation.

Du fait de son statut « intermédiaire », nous pouvons seulement suggérer que parfois, le fait qu'OSM soit différent de Aléatoire laisse penser qu'une donnée « Vernaculaire » montrerait une position « encore plus différente » qu'OSM. Cela fonctionne pour GSM-F50µm (Figure 70) aux faibles teneurs en limons, là où les pics de densité relative bauge/Aléatoire sont gênants pour la visibilité de la tendance : la densité relative bauge/OSM, inférieure, montre qu'ils devraient être plus petits. Cette hypothèse nous sera utile pour l'interprétation des résultats sur le reste du territoire hexagonal où nous ne disposons pas de données de densité « Vernaculaire ». Lorsque nous verrons des différences entre OSM et aléatoire, nous pourrons suggérer que la tendance « Vernaculaire » aurait été du côté OSM.

Notons tout de même que même en l'absence de densité Vernaculaire, ou même OSM, la densité « aléatoire » présente l'avantage de montrer qu'une absence de patrimoine peut être simplement liée à l'absence de sols pour une propriété donnée. Dans l'exemple de GSM-F50µm (Figure 70), l'absence de bâtiments en bauge au-delà de 800g.kg^{-1} est visiblement liée à l'absence de tels sols sur la zone d'étude. La raréfaction des données permet aussi d'expliquer l'« effet de bord » entre 750 et 800 g.kg^{-1}. Sans aucune donnée de densité, on pourrait croire que 750g.kg^{-1} serait un optimum pour la bauge, alors qu'avec les données de densité (même « aléatoire ») l'hypothèse est plutôt que la densité relative pourrait continuer à augmenter au-delà de cette valeur si ces sols étaient plus représentés sur la zone.

Nous avons employé l'exemple de GSM-F50µm (Figure 70) car c'est le plus facile à interpréter. Les tendances observées sont cependant remarquables sur d'autres variables, mais souvent de manière plus ténue. Notamment, l'installation préférentielle est peu visible pour les autres sources de données pédologiques que GSM. L'aléa conséquent des données DoneSol3 n'est pas assez « lissé » par le regroupement en intervalles de 50g.kg^{-1}. Pour SG, il s'agit probablement du fait que les données ne soient pas assez précises à l'échelle régionale.

4.4 Optimisation des paramètres de modélisation

La méthode d'extraction et de croisement des données patrimoniales et pédologiques est complexe et plusieurs sources d'incertitudes sont présentes et nécessitent une optimisation des paramètres. Une analyse de sensibilité est donc nécessaire afin de s'assurer que le choix des valeurs de ces paramètres est adéquat, ou que leur variation a une influence négligeable sur les résultats d'analyse.

Prenons d'abord le temps de bien comprendre les dynamiques observées sur les courbes de densités relatives. Lorsque l'on cherche à repérer une influence des propriétés de la terre sur les choix techniques dans l'analyse visuelle des graphiques de densité relative bâtie en terre (graphiques inférieurs), un critère retient particulièrement notre attention : le fait que la courbe de densité relative ne soit pas constante, et présente des tendances de variations claires, et reproductibles entre les sources de données pédologiques. Lorsque la densité relative n'est pas constante, c'est que

l'occurrence du nombre de bâtiments en terre et celle des points-bâtiments *de densité* ne sont pas proportionnelles (graphique supérieurs). Par exemple, pour GSM-F50µm (Figure 70), la courbe d'occurrence de bâtiments en terre est « décalée » vers les plus fortes teneurs en limons que celle des autres sources (graphique supérieur), résultant en une densité relative plus forte lorsque F50µm est maximale (graphique inférieur).

4.4.1 Indicateur d'acuité

La présence d'un tel décalage montre que le modèle de croisement est suffisamment précis pour laisser apparaître des dynamiques de corrélation entre densité relatives bâties en terre et variables pédologiques, et ainsi que les paramètres de modélisation sont suffisamment bien choisis. On appellera donc *acuité* la capacité du modèle à discriminer les sources de données selon une variable, favorisant l'existence de corrélations entre densité bâtie en terre et une propriété du sol.

Pour évaluer cette acuité par des critères quantitatifs, on calcule la différence entre la valeur à la médiane des occurrences de bâtiments en bauge et celle de la médiane des occurrences des données Vernaculaires (Figure 79a.), pour chacune des sources de données pédologiques. On normalise ensuite par l'intervalle contenant 90 % des valeurs des bâtiments en terre (Figure 79b.).

$$acuité = \frac{Q50_{terre} - Q50_{vernaculaire}}{Q95_{terre} - Q5_{terre}}$$

Où Qn_{terre} et $Qn_{vernaculaire}$ sont les n-ièmes quantile de la variable étudiée pour les bâtiments en terre et Vernaculaires.

Ainsi, lorsqu'une variable est positivement corrélée à la densité bâtie en terre, l'acuité sera positive, lorsqu'elle sera négativement corrélée, l'acuité sera négative. La valeur absolue prise par l'acuité, c'est à dire son éloignement de 0, représente l'intensité de l'acuité. Plus l'acuité s'éloigne de 0, plus la différence entre la propriété pédologique des terres des sols sous-jacents aux bâtiments en terre et sous-jacents aux bâtiments Vernaculaires est importante, et plus la variable pédologique manifeste un choix préférentiel.

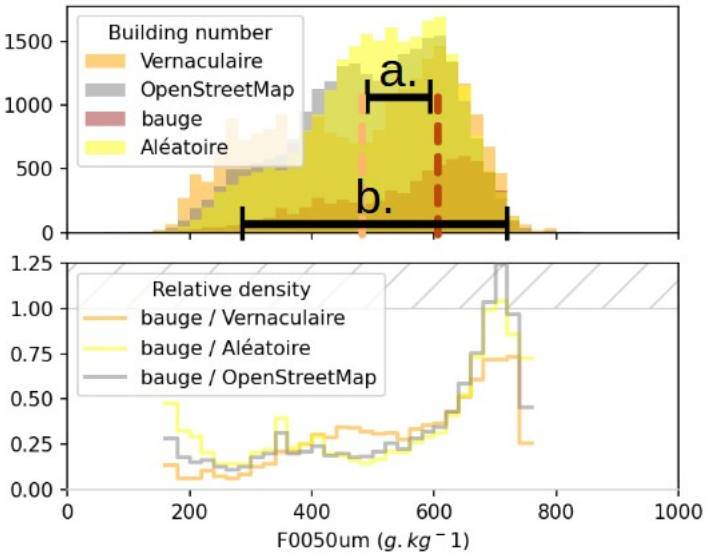


Figure 79: Représentation de la différence entre les médianes d'occurrence des données de bauge et vernaculaires (a.) et de l'intervalle entre les quantiles à 5 et 95% des données bauge (b.) pour les résultats d'analyse de GlobalSoilMaps - F50µm.

Notons qu'une telle acuité ne représente que les corrélations monotones. Une relation aux propriétés pédologiques en optimum ne sépare pas les médianes et ne modifie pas l'acuité. On fait donc l'hypothèse que les corrélations entre propriétés pédologiques et densité relative bâtie en terre sont monotones.

4.4.2 Base de données pédologiques pédologiques

La variation de l'acuité est d'abord évaluée en fonction de la base de données pédologique, pour les fractions granulométriques et la CEC (Figure 80).

La variation d'acuité est très variable selon les propriétés. Comme observé sur les figures 69 à 74, ce sont les propriétés F50µm et F2000µm qui ont le plus grand décalage entre densité de bâti en terre et densité Vernaculaire, donc la plus grande variation d'acuité : positive pour F50µm qui favorise la densité bâtie en terre, négative pour F2000µm dont les fortes valeurs sont corrélées à une faible densité. Surtout, l'acuité est bien meilleure pour les sources raster-STU (R), GSM (G) et vecteur-STU (STU) que pour les sources SG et vecteur-SMU, déjà identifiées comme peu adéquates pour ce traitement de données (Chapitre 3A, 4.4.2).

GSM présente également une acuité conséquente pour les éléments grossiers (F2000µm_D). Pour les autres variables (F2µm, CEC), il n'y a pas de grand décalage entre les médianes d'occurrence bauge et Vernaculaire, donc l'acuité est plus faible et peu différente selon les sources de données.

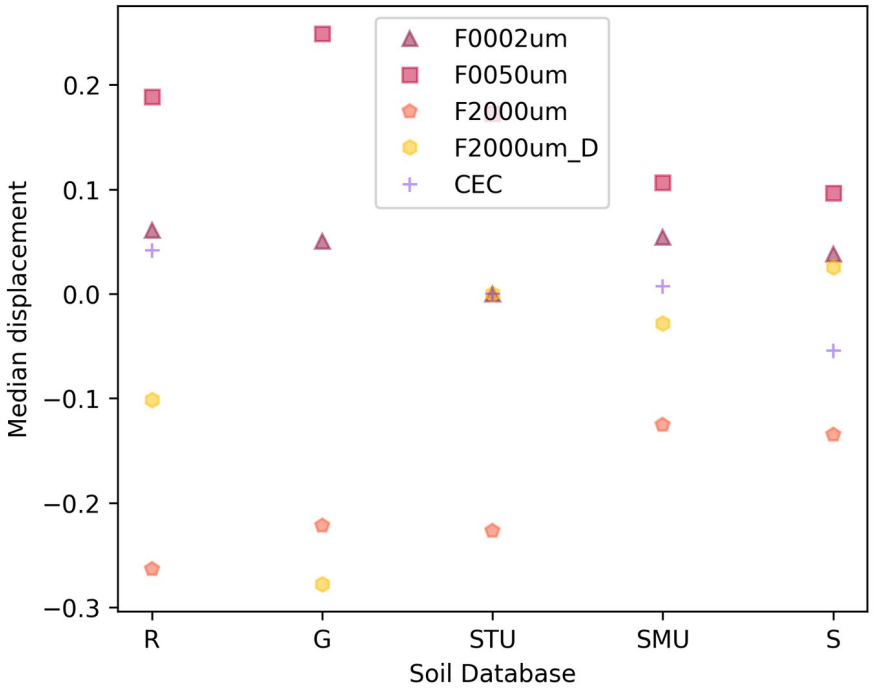


Figure 80 : Acuité de discernement de la corrélation « propriété pédologique-densité relative de bâtiments en bauge » (Median displacement = déplacement relatif de la médiane*) selon la base de données pédologiques et pour plusieurs propriétés pédologiques. R = raster-STU ; G = GlobalSoilMaps ; STU = vecteur-STU ; SMU = vecteur-SMU ; S = SoilGrids.*

L'augmentation de l'acuité peut représenter une baisse de l'aléa lié à la qualité des données pédologiques. Mais elle peut également être liée à une augmentation d'un biais des données. Difficile de faire la part de ces deux possibilités pour les bases de données pédologiques. Raster-STU étant la base de données de référence, c'est par rapport à elle que nous pouvons conclure : la « très bonne » acuité de GSM-F2000µm_D est probablement un biais des données pédologiques, car il a été remarqué dans la littérature que GSM capture difficilement la variabilité de cette propriété (Chapitre 3A, 4.2.4).

Le fait que vecteur-STU présente une acuité strictement nulle pour CEC, F2µm et F2000µm_D est surprenant et difficile à expliquer, d'autant plus que l'extraction aléatoire-pondérée des données pédologiques de cette propriété devrait apporter au moins un léger aléa.

Nous garderons les trois bases de données raster-STU, vecteur-STU et GlobalSoilMaps pour la suite de l'étude. Pour la suite de cette phase d'optimisation, c'est raster-STU qui sera la référence pour l'évaluation de l'acuité des autres paramètres.

4.4.3 Distance de connaissance

Si la technique de la bauge n'est pas connue sur un territoire de la zone d'étude, alors les données Vernaculaires, OSM ou aléatoire pourraient voir leur occurrence augmenter pour les propriétés pédologiques représentées dans cette zone, sans augmentation relative de la donnée « terre », même si les sols y auraient été favorables. Cela apporterait un certain aléa au résultat, pouvant prendre la forme d'un biais si la zone présente une certaine homogénéité pédologique. Si l'on souhaite visibiliser l'impact des propriétés de la terre sur le choix technique, il faut alors s'assurer que la zone d'étude se limite à un territoire où l'on sait que la *culture constructive* a pu se diffuser.

Nous limitons donc la zone d'étude à un rayon de D kilomètres autour des bâtiments en terre localisés. Pour les résultats présentés pour la bauge, nous avons pris la distance de D=10km (Chapitre 3A, 5.3.3.1). Nous la faisons désormais varier et observons sont impact sur l'acuité des variables que nous avons relevées comme discriminantes. D prend successivement les valeurs 0.1, 1, 2, 5, 10, 30, 60, 100, et 200km.

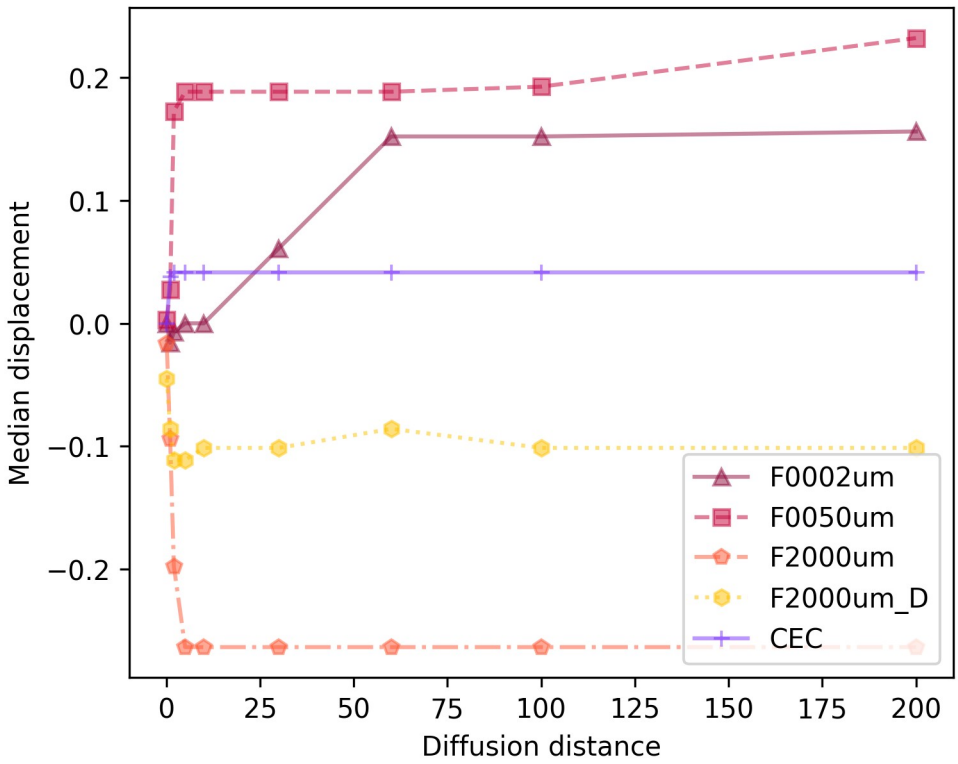


Figure 81 : Variation de l'acuité du discernement entre l'occurrence de la bauge et l'occurrence de bâtiments vernaculaires selon la distance maximale au bâtiments en bauge d'inclusion des données de densité vernaculaire. L'acuité de 5 variables pédologiques issue des données raster-STU est représentée.

La variation d'acuité selon la « distance de diffusion » choisie est représentée sur la Figure 81 . L'acuité observée pour raster-STU en comparaison des autres sources pédologiques est celle observée pour la

valeur D=30. On observe que pour toutes les variables sauf F2µm, l'acuité augmente rapidement avec la distance puis atteint un plateau. Cette dynamique peut s'expliquer ainsi :

- Lorsque D tend vers 0, les seuls bâtiments « Vernaculaires » sont les bâtiments en terre. Il n'y a donc pas de différence de médiane, l'acuité est nulle.

- Lorsque la distance limite aux bâtiments en terre augmente, l'extraction commence à intégrer des bâtiments Vernaculaires autres que les bâtiments en terre. Progressivement, des unités pédologiques où la densité Vernaculaire est plus importante que le nombre de bâtiments en terre, voire où ceux-ci sont absents, sont intégrés. La tendance préférentielle selon les propriétés de la terre commence à se dégager.

- Lorsque la distance de diffusion choisie est grande, des zones où la construction en bauge n'est pas connue sont intégrées. Cela apporte de l'aléa dans la distribution du bâti selon les variables pédologiques ce qui réduit l'acuité. On aurait donc pensé voir une décroissance de l'acuité pour de fortes valeurs de D, ce qui n'est pas le cas ici. En revanche, l'atteinte du plateau peut représenter l'échelle de distance à partir de laquelle l'augmentation du nombre de données Vernaculaires n'apporte pas de meilleure lecture des résultats de croisement, soit ici environ D=10km.

L'absence d'optimum pour D peut s'expliquer si la *distance de connaissance* est supérieure aux dimensions du territoire Breton. Sur le territoire la culture constructive a pu se déployer partout où les sols étaient favorables. Soit parce qu'il est suffisamment petit pour favoriser les échanges de savoir-faire, soit parce que la zone de sols favorable est effectivement limitée à la zone de déploiement réel de la technique. Le reste du territoire breton présentant des caractéristiques pédologiques effectivement défavorables à la bauge relativement aux autres techniques (p. ex. sols pierreux), l'acuité ne varie pas lorsqu'on l'intègre au calcul avec de grandes valeur de D.

Notons que l'analyse limite les données à la Bretagne administrative. L'étendue autour des bâtiments est donc limitée à l'est par la frontière administrative, et au nord et au sud par l'océan. A partir de quelques dizaines de kilomètres de distance de diffusion, l'extension de la zone ne se fait qu'à l'ouest, puis n'a plus d'impact du tout. Notons également que la base de données du Service du Patrimoine de Bretagne semble bien plus intensément renseignée dans l'ouest du territoire : l'augmentation de la distance D n'apporte peut être pas de quantités significatives de données.

Ainsi, atteindre la distance optimale de D n'est peut être pas possible sur un territoire de l'échelle de la Bretagne, et pourrait peut-être être mieux perçue dans une analyse à l'échelle nationale (non réalisée pour ce travail de thèse).

L'optimum de distance de diffusion de la technique recherché ici devait représenter l'équilibre entre l'apport de nouvelles zones « non convenables – non bâties en terre » permettant l'augmentation de l'acuité et l'apport de zones « convenables – mais non baties en terre » réduisant l'acuité. Il n'est pas atteint ici. Ce peut être expliqué par l'envergure du territoire qui n'est pas suffisante, ou car l'augmentation de l'étendue de l'étude peut apporter des biais liés à la distribution géographique des données sans liens avec le choix technique. Une étude à l'échelle nationale serait nécessaire pour conclure.

4.4.4 Analyse : optimisation du modèle spatial

Pour optimiser un modèle, on peut employer des méthodes comme l'analyse de Monte Carlo (Chapitre 4, 2.3.2) afin de faire varier l'ensemble des paramètres en même temps, ce qui procure une analyse plus robuste et permet de mieux identifier des optimums. La complexité du modèle de croisement mobilisant le logiciel QGIS et divers algorithmes python ne nous a pas permis de configurer une telle

analyse, c'est pourquoi nous avons fait varier un a un et manuellement l'ensemble des paramètres autour des paramètres initiaux estimés « acceptables ».

Les paramètres considérés optimaux pour le croisement des données pédologiques et de bâti historique en Bretagne sont :

- une distance D supérieure à 5km, et probablement la moins grande possible au-delà. On prendra 10km pour la suite des analyses ;

- les bases de données raster-STU, GSM et vecteur-STU sont les plus performantes. Raster-STU n'est pas disponible sur le reste du territoire hexagonal. GSM a tendance à « lisser » les données ce qui fausse peut-être sa performance mais a l'avantage de faciliter la lecture des résultats. Vecteur-STU représente bien les tendances de raster-STU mais avec un aléa conséquent. L'emploi conjoint de GSM et vecteur-STU peut permettre une bonne analyse globale des corrélations.

5 Relation entre sol et densité bâtie pour la bauge, le pisé, l'adobe et le torchis : transects dans quatre régions

Sur le territoire Breton, nous bénéficions à la fois d'une base de données conséquente d'échantillons de bâtiments composés de terre crue et Vernaculaires (Service du Patrimoine de Bretagne), et d'une base de données pédologiques de grande qualité (DoneSol3 Bretagne au format raster-STU). En revanche, sur le reste du territoire français, nous ne bénéficions pas de ces données.

Nous avons exploré les potentiels des bases de données alternatives : vecteur-SMU, vecteur-STU, GlobalSoilMaps et SoilGrids. GSM et vecteur-STU nous ont semblé les plus adéquates, et seront testées ici à l'échelle nationale.

Pour les données patrimoniales, un travail de cartographie du patrimoine bâti en différentes techniques de terre a été réalisé afin d'obtenir un échantillon de données statistiquement fiable (Chapitre 3A, 5.3.1). La cartographie a été réalisée par « transects » en évoluant en « limite de zone d'occurrence » de bâtiments en terre crue. En revanche, nous ne disposons pas des données de densité de patrimoine bâti vernaculaire, permettant de calculer des densités relatives bâties en terre crue. Les données OSM et Aléatoire, évaluées dans l'analyse sur le territoire Breton, n'ont pas montré sufisamment de corrélation avec les données *de densité* Vernaculaires et ne permettent pas de les remplacer. Aléatoire permet cependant une comparaison de la densité bâtie en terre relativement aux sols de la zone d'étude, n'éliminant pas le biais d'*installation préférentielle des populations* mais permettant de réduire les biais d'échantillonnage des sols. OSM est très proche d'Aléatoire, mais a montré une légère sensibilité à l'installation préférentielle des populations observée pour Vernaculaire et les bâtiments en bauge, ce qui fait que cette source de données réduit un peu ce biais. On restera attentifs à l'imperfection des données OSM dans la lecture des résultats. Cependant, on espère que l'élargissement de l'étude à une plus grande diversité de pédorégions contrebalancera l'aléa apporté par la perte de qualité de données *de densité*.

5.1 Données de densité OSM-visible : optimisation de la méthode d' « analyse de visibilité depuis le transect »

Ainsi, avec les données de densité OSM et Aléatoire, on ne peut éviter complètement les biais liés à l'échantillonnage ni ceux liés à l'installation préférentielle. C'est à dire qu'en employant les données brutes OSM, on ne peut savoir si une zone de faible densité bâtie apparente en terre est liée à une mauvaise cartographie de cette zone, à l'absence de bâtiments tous matériaux confondus (donc de terre), ou alors liée à son moindre potentiel pour la terre crue.

Sur le terrain, nous avons relevé la position des bâtiments en terre, mais pas celle des bâtiments d'autres techniques ce qui aurait demandé un travail considérable. En revanche, nous avons enregistré le tracé GPS des transects réalisés, afin de réaliser une méthode d'*analyse de visibilité depuis le transect* nous permettant d'estimer quels bâtiments du cadastre OSM ont été vus ou non (Chapitre 3A, 5.3.3.3). Ainsi, nous disposons d'une donnée *de densité* autour du transect, permettant de calculer la *densité relative* entre les bâtiments en terre « vus » et les bâtiments OSM « vus ». On appellera les bâtiments OSM ainsi sélectionnés « OSM-visible ». Nous espérons par cette méthode améliorer les données de densité OSM, au moins sur le plan de l'échantillonnage : ne sont considérés que les bâtiments « vus » pendant l'enquête, et non tous les bâtiments à 10km à la ronde. Par exemple, dans la traversée d'un centre urbain, ne sont considérés que les bâtiments des rues traversées et non l'ensemble des bâtiments à plusieurs centaines de mètres à la ronde, ce qui réduirait artificiellement la densité relative de bâtiments en terre crue.

Dans cette analyse, la distance D limitant la zone d'étude est fixée à 5km (voir 4.4.3 ou Chapitre 3A, 5.3.3.1). Les 5 transects réalisés ont été présentés au Chapitre 3A (5.3.1). Dans cette évaluation, on distingue le transect de Loire-Atlantique du transect Breton.

5.1.1 Rappel de la méthode

L'analyse de visibilité consiste en l'emploi d'un algorithme d'analyse de visibilité entre deux points d'un raster topographique disponible dans le logiciel QGIS (Chapitre 3A, 5.3.3.3.1). Une droite est « tracée » dans l'espace entre le pixel raster du point de vue et l'ensemble des autres pixels du raster. Dès lors que la droite est interceptée en route par un autre pixel, le pixel cible n'est pas « visible » depuis le point de vue.

Les bâtiments OSM au format polygone 2D sont convertis en pixels raster, auxquels la valeur de H=5m est attribuée, représentant une hauteur théorique des bâtiments. Puis, ce raster de bâtiments est sommé au raster d'altitude de la zone d'étude. Il en résulte un raster topographique « augmenté » de la hauteur des bâtiments localement, comme si ceux-cis étaient intégrés à la topographie. Ainsi, on peut faire une analyse de visibilité entre les points de l'espace en prenant en compte le fait que les bâtiments cachent la visibilité. Dans les villes par exemple, seule la rue prospectée est alors considérée comme vue : elle est située dans un « canyon » du raster d'altitude-bâtiments.

La trace GPS est converties en une suite de points de vue, depuis lesquelles l'analyse de visibilité est répétée. Dès lors qu'un pixel est visible depuis au moins un des points de vue, il est considéré comme « capté » dans l'analyse de visibilité ; donc *a priori* visible dans notre champ de vision sur le terrain.

Puis, la visibilité est réattribuée aux polygones OSM. Dès lors qu'un polygone de bâtiment est identifié sur le pixel « capté », ce bâtiment est considéré comme « capté » (capté-OSM). Si ce bâtiment capté est identifié comme composé de terre crue, il fait partie du groupe terre-captés ; sinon il fait partie du groupe tous-matériaux-captés.

5.1.2 Paramètres optimisés

L'analyse de visibilité employée pour sélectionner les bâtiments OSM-visible, vus sur le terrain à partir de la trace GPS, comprend de nombreux paramètres qu'il s'agit d'optimiser afin d'assurer que les bâtiments considérés comme « vus » sont bien ceux vus sur le terrain. Quatre paramètres-clefs du modèle sont analysés ici.

- **la distance maximale de visibilité (5.1.5)**: elle limite l'étendue de la carte OSM a considérer comme visible depuis le transect. Elle représente notre capacité à voir des bâtiments au loin dans un paysage dégagé (rappel : nous étions équipé.es de jumelles pour vérifier un bâtiment au loin attirant notre

attention - Chapitre 3A, 5.3.1). Une fois cette distance définie, la *distance de connaissance* D employée pour délimiter la zone d'étude n'a plus beaucoup d'impact, elle ne délimite seulement les données lorsqu'une trace GPS est présente à plus de 5 km d'un bâtiment où la technique-type* analysée a été repérée. Cela arrive lorsque l'on fait une analyse de visibilité *par technique-type*, comme c'est le cas pour les résultats du croisement de données par régions (Chapitre 3B, 5.2.1). Par exemple pour la bauge en Occitanie, où certaines zones traversées n'ont pas permis d'en déceler la présence. Si le transect est à plus de 5km d'un bâtiment en terre, les bâtiments Aléatoires et OSM n'y sont pas considérés. En revanche ici, l'analyse de visibilité considère l'ensemble des techniques de construction en terre crue pour délimiter la zone d'étude, ce qui fait qu'un transect à moins de 5 km de toute technique de terre crue est improbable au vu de notre méthode de transect « en créneau autour de la limite », cherchant à ne pas s'éloigner des zones d'occurrence de la terre (Chapitre 3A, 5.3.1.2). Le choix de D=30km plutôt que 5km aurait donc peu fait varier les résultats, ce que nous avons pu confirmer en cours de production des figures par un essai « à la volée ».

- **la hauteur supposée des bâtiments (5.1.7)**: les polygones OSM sont « ajoutés » à la carte topographique comme « bloc » d'une certaine hauteur. En l'absence d'une information sur la hauteur des bâtiments OSM, nous devons utiliser une valeur identique pour tous les bâtiments. Si le paramètre est choisi trop bas, l'« observateur » (l'algorithme) à la position du transect, positionné à 1.60m est « au-dessus » des bâtiments, dont « voit » les bâtiments derrière, ce qui n'est pas réaliste. A l'inverse, prendre des hauteurs trop importantes fait qu'un bâtiment invisible à cause d'une dépression topographique le devient. Selon les jeux de distance et de hauteurs relatives entre la route parcourue et les bâtiments alentours, l'optimisation de ce paramètre peut jouer sur le nombre de bâtiments « vus ».

- **la résolution des cartes topographiques raster (5.1.6)**: ce sont ces cartes qui permettent de prendre en compte la topographie, ainsi que les bâtiments qui y sont ajoutés. Si la résolution est grossière, la finesse du modèle 3D créé en superposant les bâtiments rend l'analyse de visibilité peu performante.

On fait varier les paramètres sur les valeurs suivantes (en mètres). Les valeurs entre crochets sont les valeurs du modèle de base: lorsqu'un paramètre varie, le autres sont sur les valeurs de base.

- distance maximale : 1000, 500, **[300]**, 200, 100

- hauteur batiments : 3, 5, **[7]**, 10 , 15

- résolution : 2, 3, **[5]**, 10

5.1.3 Variables d'acuité

Trois variables permettent l'évaluation de l'acuité du modèle (Chapitre 3A, 5.3.3.3):

- terre-captés/terre total: la fraction de polygones-bâtiments OSM identifiés comme composés de terre crue qui est capturée par l'analyse de visibilité. Plus cette fraction est proche de 1, plus l'analyse de visibilité capture efficacement les bâtiments effectivement vus sur le terrain.

- tous-matériaux-captés/OSM total : la fraction de polygones-bâtiments OSM non identifiés comme composés de terre crue qui est capturée par l'analyse de visibilité. Plus cette fraction est proche de 1, moins l'analyse de visibilité n'a éliminé de bâtiments OSM dans la zone de la distance maximale de visibilité.

- la performance du modèle, définie par le ratio de la première variable sur la seconde. Un bon modèle garde l'ensemble des bâtiments composés de terre crue et élimine un maximum de bâtiments OSM.

Au cours de la création de l'algorithme, une évaluation visuelle par projection cartographique des résultats de l'analyse de visibilité (pixels captés/non captés, bâtiments captés/non captés) de quelques transects nous a permis de valider le réalisme de l'analyse de visibilité et des bâtiments qu'elle sélectionne.

Enfin, le temps de calcul a été estimé pour chaque évaluation (5.1.4). Il représente les ressources informatiques nécessaires pour l'analyse algorithmique de données topographiques précises, et peut être décisif dans le choix des paramètres.

Le protocole d'analyse est le suivant :

On fait varier les paramètres un par un, dans l'ordre. Pour chaque ensemble de paramètres :

- on fait l'analyse de visibilité pour chacune des zones de transects :
  - Bretagne
  - Loire Atlantique
  - Champagne
  - Limagne
  - Occitanie
- Puis, on fusionne les différentes couches de bâtiments OSM analysés en une seule couche. Les variables d'acuité d'analyse sont calculées et sauvegardées.

On compare ensuite, en fonction de la variation des paramètres, les variables d'acuité obtenues.

Dans un second temps, on relance le programme avec le bouquet de paramètres optimisés, afin de vérifier que ceux-ci optimisent bien l'analyse (5.1.8).

5.1.4 Temps de calcul

Le temps de calcul observé est fonction du nombre de pixels que l'analyse de visibilité doit évaluer. Ainsi, plus les transects sont longs, plus il y a de pixels à évaluer, plus le temps de calcul est long. On observe systématiquement l'ordre de temps de calcul suivant : Occitanie > Champagne > Limagne > Loire-Atlantique > Bretagne (Figure 82). Plus la distance maximale de visibilité est grande, plus il y a de pixels à évaluer. L'augmentation plus que linéaire puisque c'est les pixels inclus dans la surface du disque autour du point de vue qui sont évalués, et que la surface du disque augmente avec le carré du rayon du disque (πr^2). Lorsque la hauteur des bâtiments augmente, elle n'est pas sensée impacter significativement le temps de calcul mais pour une raison inconnue, dans l'ensemble, elle semble augmenter légèrement les temps de calculs.

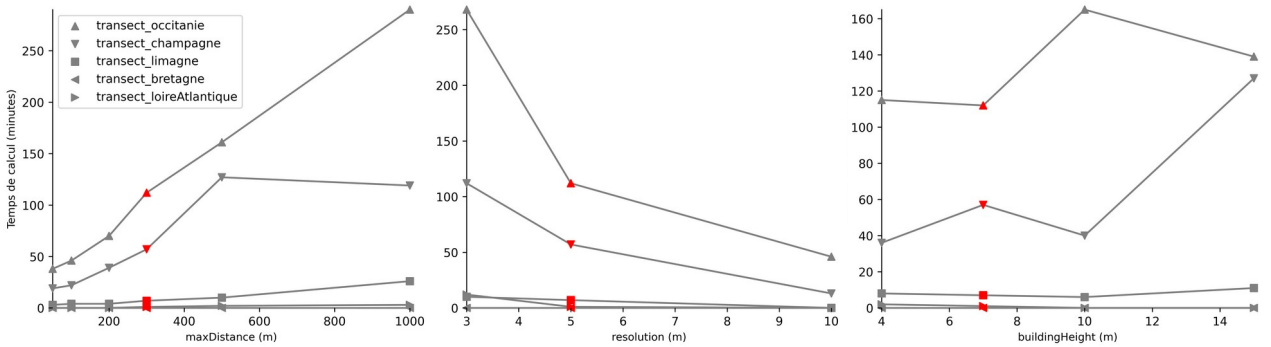


Figure 82: Sensibilité du temps de calcul aux paramètres de l'analyse de visibilité. (en rouge le paramétrage de base)

5.1.5 Distance maximale

La Figure 83 représente l'influence du paramètre « distance maximale » de l'analyse de visibilité sur les variables d'acuité. La fraction de bâtis terre captés par l'analyse de visibilité est croissante pour tous les transects lorsque la distance maximale augmente, avant d'atteindre un plateau autour de 500m de distance. Ce plateau représente la distance limite pour distinguer un bâtiment en terre crue sur le terrain. Selon les transects, l'influence de la distance sur les bâtiments vus diffère : en Loire-Atlantique, nous avons évolué dans un bocage dense, la distance de visibilité maximum était très réduite, c'est pourquoi l'intégralité des bâtiments vus sur le terrain sont situés à moins de 100m du transects, et captés par l'analyse de visibilité pour une distance maximale de 100m. En Bretagne, la zone étant vallonnée, la visibilité ne permet pas non plus de repérer des bâtiments lointains. En Champagne, l'enquêteur, travaillant sur l'analyse architecturale du patrimoine (Aras 2024), s'est plus systématiquement rapproché des bâtiments observés lors de la collecte. Ainsi, la trace est toujours proche des bâtiments, et avec une distance maximum de 100m, on a déjà la quasi totalité des bâtiments captés. Pour les trois autres transects (Limagne, Bretagne, Occitanie), les paysages étant relativement ouverts, nous avons réalisé une enquête « express » où nous ne nous rapprochions pas systématiquement des bâtiments repérés. Equipé.es de jumelles, nous avons pu voir des bâtiments jusqu'à 500m.

La fraction de bâtiments OSM totaux captés croît inévitablement avec la distance limité d'analyse puisque plus de bâtiments peuvent être captés par l'analyse de visibilité en contexte topographique favorable. Elle croît plus rapidement pour les courtes distances. Deux raisons sont possibles : (1) plus le bâtiment est loin de la trace, plus le masquage topographique ou par les autres bâtiments augmente, et (2) plus le bâtiment est loin de la trace, plus il est en moyenne loin des bourgs et des villes que nous avons souvent explorés prioritairement, donc l'augmentation de la distance se fait dans une zone moins densément bâtie.

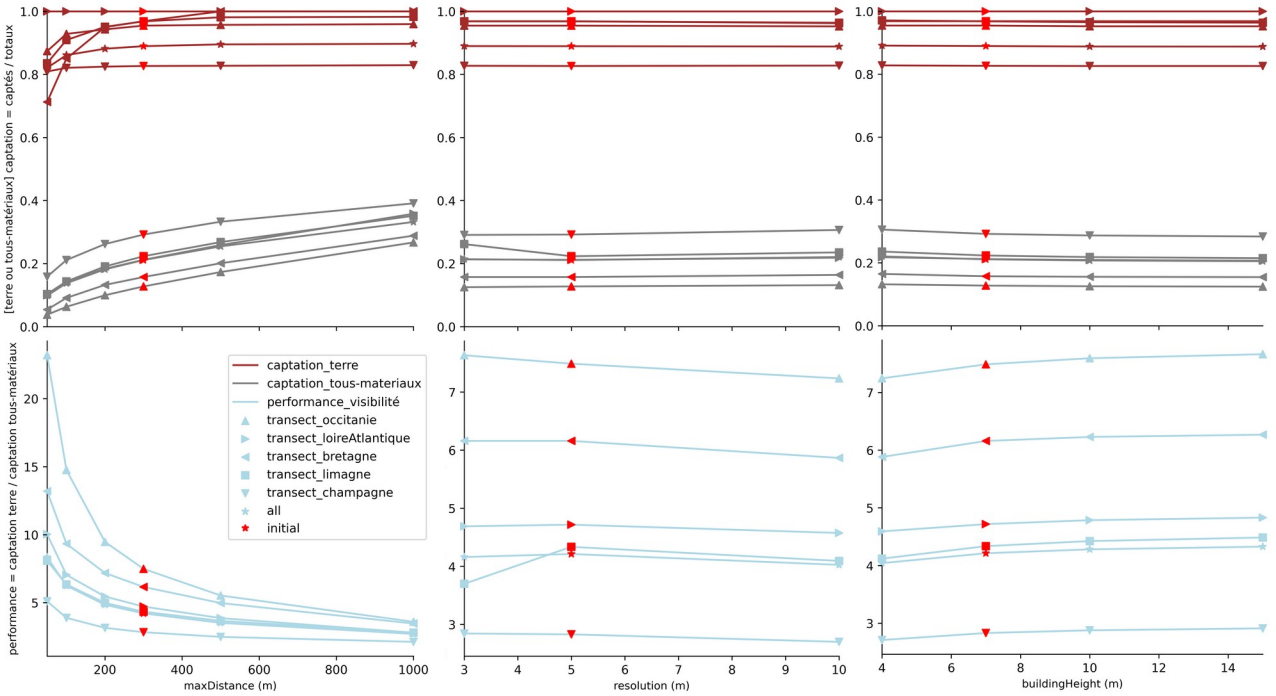


Figure 83: Sensibilité de l'analyse de visibilité aux paramètres "distance maximale", "résolution" et "hauteur bâti".

Pour la variable « distance maximale », le rapport des deux indicateurs terre/tous matériaux indique une occurrence maximale de bâtis en terre détectés à des plus petites distances du transect. En effet, plus le bâtiment est loin du transect, plus il est probable qu'on le rate sur le terrain alors qu'il est « visible » en théorie avec des super-jumelles et de bonnes conditions de visibilité. Donc, l'analyse de visibilité détecte plus de bâtiments que l'on en voit en réalité lorsqu'on augmente la distance.

Pour une acuité maximale, la plus représentative de la densité réelle de bâtiments en terre, on devrait alors choisir une distance la plus réduite possible. Cependant, garder un maximum de bâtiments en terre pour le croisement avec les données pédologiques est importante car elle permet plus de représentativité statistique. C'est autour de 200m de distance que le nombre de bâtiments vus « décroche » : par exemple, le nombre de bâtiments en terre pour le transect Breton perd 10 % entre 200 et 100m. Cette distance est probablement la distance au-delà de laquelle notre méthode de transect ne permet plus de repérer les bâtiments en terre crue. On choisira alors **200m de distance** comme paramètre pour l'analyse de visibilité finale permettant l'établissement d'une couche de données OSM comme « fond de densité bâtie ».

5.1.6 Résolution

La méthode d'analyse de visibilité rasterise les polygones de bâtiments, et superpose le raster obtenu au raster représentant la topographie de la zone, permettant une analyse de visibilité intégrant les bâtiments comme élément de topographie (Chapitre 3A, 5.3.3.3.1). Lorsque la résolution du raster topographique augmente, la forme des bâtiments vecteur est mieux approximée, et l'analyse de visibilité est plus fine : la performance de l'analyse augmente (Figure 83). Avec une résolution grossière, les bâtiments sont faussement détectés comme « visibles » ou « non visibles » car les pixels dépassent largement la forme du bâtiment initial, ce qui masque artificiellement des bâtiments ou en fait ressortir d'autres. On observe qu'entre 3 et 5m de résolution, il n'y a pas de différence de performance en général. En Occitanie, la performance augmente encore significativement pour une résolution de 3m : peut-être que cela représente le fait que nous avons exploré plus de milieux urbains

denses, où la petite taille des bâtiments et la précision de leur détection est importante. Pour la Limagne, c'est l'inverse, mais la raison est difficile à comprendre. Idéalement, on augmentera la résolution, qui ne peut qu'améliorer la qualité de l'analyse. En deçà de 5m, cependant, elle n'est pas significativement améliorée.

Cependant, le temps de calcul de l'analyse augmente selon une fonction carrée de la résolution, car elle dépend du nombre de pixels, qui augmentent au carré de la résolution. De plus, les fichiers .tif utilisés lors du calcul augmentent aussi en taille selon le nombre de pixels, donc au carré de la résolution. Le programme crée 4 fichiers temporaires et 1 fichier final de visibilité, de taille similaire. Pour le transect Occitanie, la taille de chacun des fichiers était respectivement de 6.9 et 19.3 GO pour les résolutions de 5 et 3m, pour le transect Est, de 5.0 et 13.0 GO. Pour les longs transects couvrant une région plus vaste, l'espace de stockage disponible peut ainsi devenir limitant (19.3 x 5 = 96.5 GO pour l'Occitanie seulement en résolution 3m).

Ainsi, on choisira de garder la **résolution de 5m** pour le modèle, car une meilleure résolution n'apporterait pas d'amélioration significative de l'acuité, alors qu'elle augmenterait considérablement le temps de calcul et le stockage.

5.1.7 Hauteur des bâtiments

Les bâtiments rasterisés sont ajoutés au raster topographique en leur attribuant une hauteur définie, qui s'ajoute pour chaque pixel concerné à l'altitude initiale du raster topographique. Cette hauteur est arbitraire, puisque tous les bâtiments n'ont pas la même hauteur. L'analyse de visibilité considère le point de vue depuis le transect à 1.60m de hauteur. En dessous de cette hauteur, sur terrain plat, l'analyse de visibilité capte des bâtiments pourtant masqués dans la réalité par d'autres bâtiments. Pour une trop grande hauteur imposée au modèle, des bâtiments que l'on a pu voir derrière les autres grâce à un surplomb (par exemple, depuis le haut d'une colline) ne sont pas captés par le modèle numérique.

En réalité, la visibilité des bâtiments est bien plus complexe du fait de leur hauteur et formes variables : ce ne sont pas des parallélépipèdes rectangles de même hauteur.

L'augmentation de la hauteur des bâtiments n'impacte pas la quantité de bâtiments en terre « vus », tandis qu'elle réduit celle des bâtiments « non vus » (Figure 83). L'acuité est alors optimale pour des hauteurs de bâtiments tendant vers des hauteurs extrêmes (15m), plutôt que pour des hauteurs « réalistes ». Ce qui signifie que dans l'état d'approximation de forme des bâtiments, le fait qu'on ait pu observer des bâtiments par surplomb d'altitude n'a aucun impact significatif comparé à l'aléa ajouté par la réduction de taille qui capte des bâtiments au loin alors qu'ils étaient masqués en réalité. Finalement, c'est peut-être parce que les paysages traversés étaient relativement peu accidentés, nous n'avons donc jamais vraiment bénéficié de « vue d'ensemble » aérienne, au-dessus des bâtiments.

Le temps de calcul évolue peu selon ce paramètre (Figure 82). On peut donc aisément choisir une **hauteur de 15m** pour optimiser le paramètre.

5.1.8 Résultats finaux

Le modèle est relancé avec les paramètres sélectionnés : distanceMax = 200m, résolution = 5m, hauteurBati = 15m. Sur la Figure 84, on ajoute à la Figure 82 les temps de calculs du modèle final. Sur la Figure 85, on ajoute à la Figure 83 la sensibilité du modèle final.

La distance maximale ayant peu changé et la résolution n'ayant pas changé, le temps de calcul est peu impacté par la variation des paramètres selon ces composantes. La hauteur des bâtiments présente

une plus grande variabilité, sans vraie tendance préférentielle : on refait le constat de la faible corrélation entre le temps de calcul et la hauteur des bâtiments.

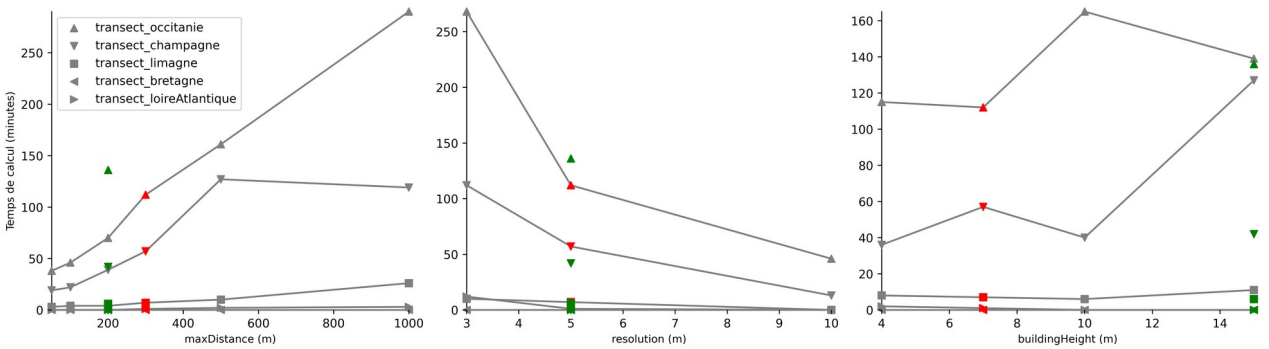


Figure 84: Sensibilité du temps de calcul aux paramètres de l'analyse de visibilité.

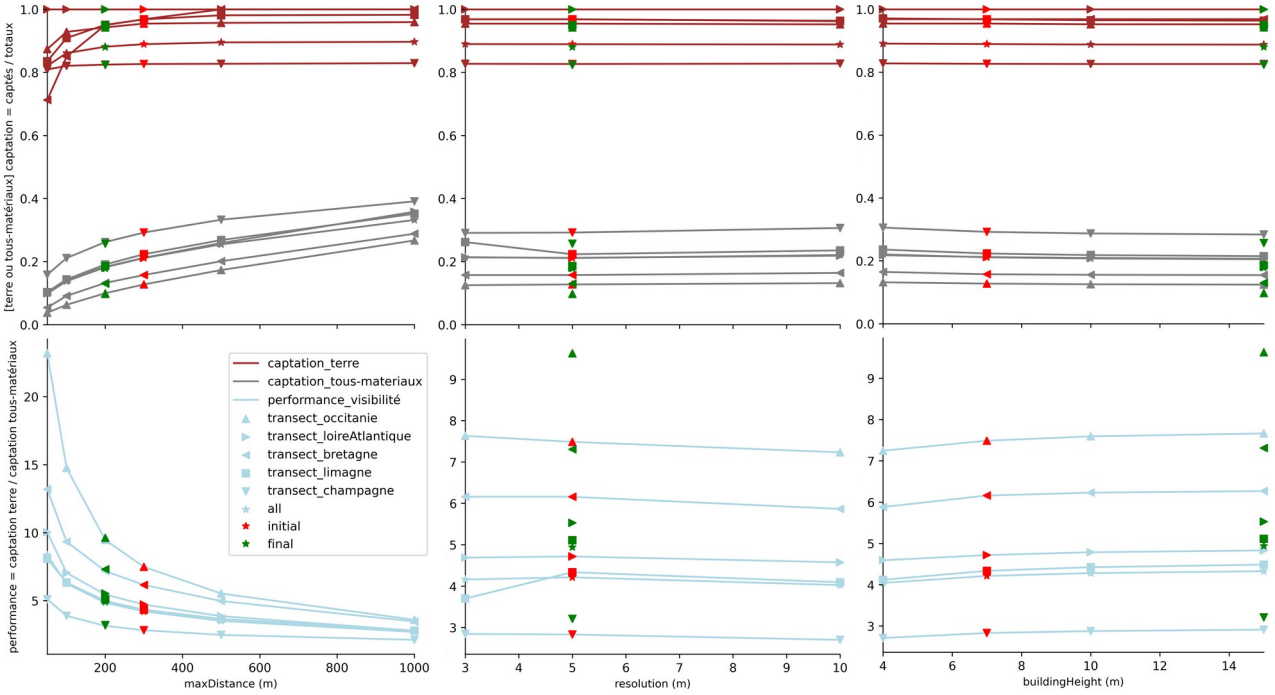


Figure 85: Sensibilité de l'analyse de visibilité aux paramètres "distance maximale", "résolution" et "hauteur bâti".

5.2 Propriétés pédologiques et densités relatives

Une fois la méthode d'analyse de visibilité optimisée, nous disposons de données de densité bâtie OpenStreetMap (OSM) triée par l'algorithme de visibilité, appelées OSM-visible. On utilise également la donnée *de densité* Aléatoire, qui permet de comparer la distribution des propriété pédologiques des sols de la zone.

Pour ces deux sources de données on calcule une densité relative de bâtiments en chaque technique-type de terre crue. La courbe OSM-visible est donc, pour chaque propriété pédologique, la densité bâtie en terre *relative* à la densité de bâtiments contemporains, et Aléatoire la proportion de chaque type de sol employé pour la terre relativement à l'ensemble des sols de la zone.

5.2.1 Densité relative par technique-type et par région

Au cours des transects de collecte de données, nous avons localisé un ensemble de 409 bâtiments en bauge, 770 composés de pisé, 4119 composés d'adobes et 965 de torchis (Chapitre 3A, 5.1). Dans la plupart des zones d'étude il y avait généralement plusieurs techniques différentes représentées, cependant en proportions généralement assez inégales. Aussi, certaines régions ne présentent que quelques bâtiments de certaines techniques. Analyser directement l'occurrence relative à l'échelle nationale masquerait les résultats de ces zones de faible occurrence, aussi nous préférons entamer l'analyse par une décomposition des résultats par région : Champagne-Ardenne ; Occitanie ; Limagne ; Ouest. L'Ouest rassemble les données de Bretagne et de Loire-Atlantique car nous supposons que chacun de ces transects ne contient pas assez d'échantillons à lui seul pour permettre l'affichage de tendances représentatives, et d'autre part la relative continuité du bâti terre entre ces deux zones du pays Gallo laisse envisager des cultures constructives communes.

Pour chaque technique, on présentera les résultats en commençant par les régions avec le plus d'échantillons, car on s'attend à des résultats plus clairs lorsque les données sont plus abondantes. La technique du torchis n'est pas présentée dans l'approche « par région ».

La représentation des données de densité et son sens de lecture a été présentée en 3.3 . Une figure est proposée pour chaque régions d'étude/techniques-types/source de données pédologiques. Sur chaque figure, un couple de graphiques est proposé pour chaque variable pédologique. Pour l'ensemble des graphiques de l'analyse par régions, l'occurrence du nombre de bâtiments en la technique-type de terre et celle des points-bâtiments OSM-visible et Aléatoires sont représentés sur la figure supérieure, et la densité relative de bâtiments en terre relativement aux points-bâtis OSM-visible et Aléatoires est représentée sur la figure inférieure.

Afin d'éviter que des intervalles avec peu de données ne présentent des densités aberrantes, la densité relative est calculée et représentée pour un intervalle seulement si elle contient au moins 2 échantillons de points-bâtiments « terre » et 5 points-bâtiments OSM-visible.

Le nombre d'échantillons de bâtiments « terre » est souvent multiplié par 10 ou 100, par ré-échantillonnage aléatoire, afin qu'il soit dans l'ordre de grandeur des bâtiments des sources *de densité* ce qui facilite la lecture graphique. Le facteur multiplicateur est précisé sur le graphique le cas échéant, et des puissances de 10 sont choisies pour pouvoir facilement recalculer le nombre d'échantillons réel par intervalle si nécessaire.

La représentation des données de texture dans le diagramme ternaire n'est pas présentée « par zone », mais seulement avec les données de l'ensemble du territoire. Elle est proposée pour chaque technique-type dans la partie discussions (6.1.1).

5.2.1.1 Bauge : Ouest

L'analyse des transects de Bretagne et de Loire-Atlantique croise 167 points-bâtiments composés de bauge avec les données pédologiques. Peut-être du fait de ce relativement faible échantillon, nous n'observons pas de corrélation explicite entre les propriétés pédologiques et la densité relative de bâtiments en bauge (Figure 87 et 86). Malgré tout, on retrouve quelques tendances observées précédemment pour la région Bretagne (Figure 70 et 71, GSM) :

- l'augmentation de la densité relative avec la fraction F50µm pour GSM, cependant non confirmée par vecteur-STU ;

- la baisse de teneurs en éléments grossiers (F2000µm_D) pour GSM, non confirmée par vecteur-STU ;

- une évolution de la densité avec la profondeur du sol qui pourrait être interprétée comme croissante si on observe indépendamment les deux zones qui s'en dégagent (Figure 86 - stu_thick).

En ce qui concerne la CEC de vecteur-STU (Figure 86), nous constatons qu'un nombre significatif d'échantillons est repéré sur des sols à CEC supérieures à 100 $mmol.kg^{-1}$. En Bretagne, nous n'avions pas de quantités représentatives d'échantillons au-delà de $75mmol+.kg^{-1}$ (Figure 73) et la densité relative semblait ainsi décroître à partir de cette valeur. Ici, il s'agit peut-être des données du transect en Loire-Atlantique qui ajoutent des bâtiments au-delà des valeurs rencontrées en Bretagne. Ces résultats confirment que ceux observés en Bretagne n'étaient peut-être qu'une coïncidence ou un « effet de bord ».

Nous avions rassemblé les données du transect Bretagne et Loire-Atlantique afin d'obtenir un échantillon plus significatif, en supposant que la région pédogénétique serait sous influence commune du Massif Armoricain. Or, de ces premières observations, on peut se demander s'il n'aurait pas été plus judicieux de séparer les transects Bretagne et Loire-Atlantique, car il est possible que les deux zones observées pour la profondeur du sol et la CEC (Figure 86 - CEC et stu_thick) soient liées à chacune des deux zones de transect.

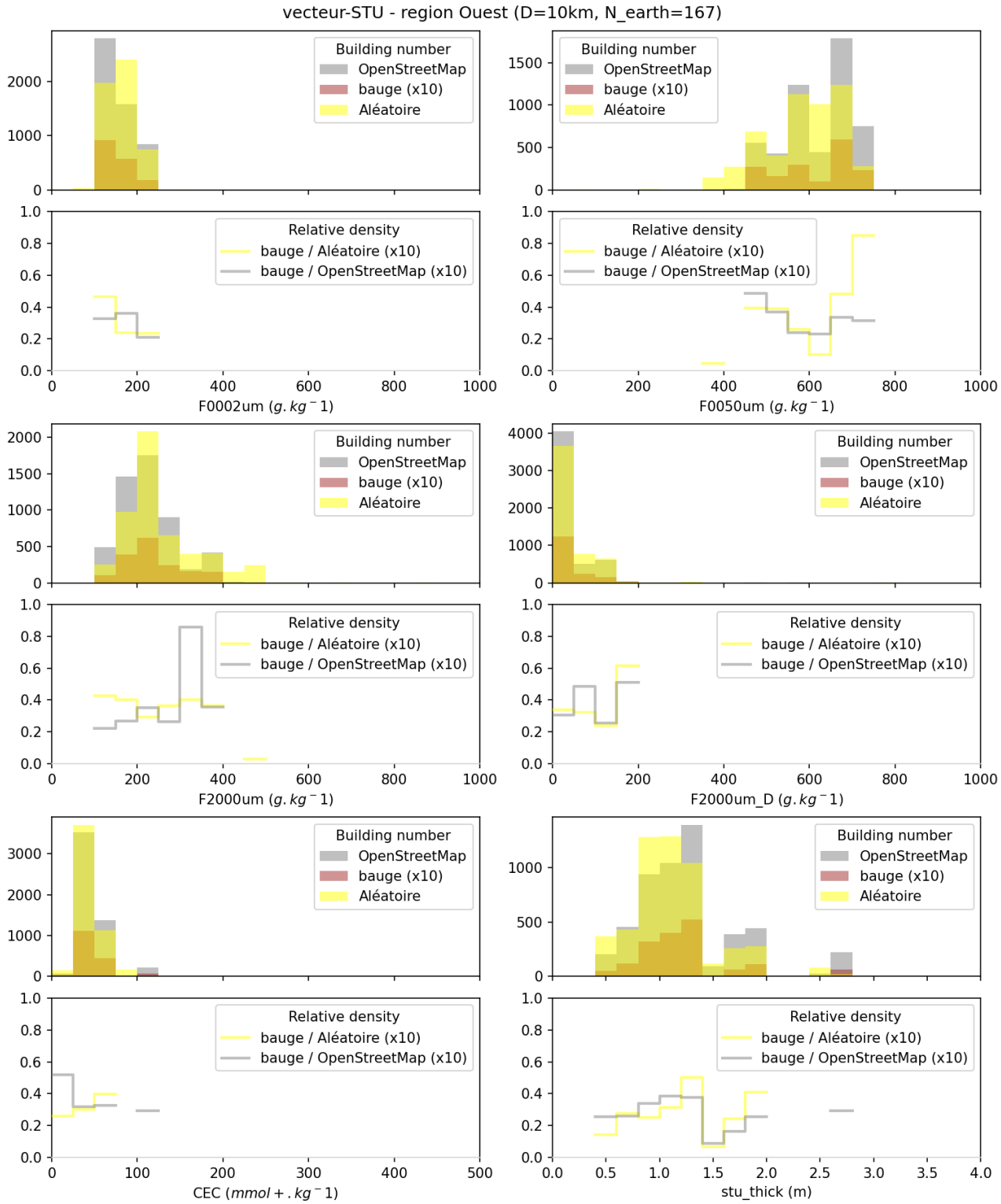


Figure 86 : Transect Ouest: occurrence de bâtiments en bauge, OSM-visible et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en bauge relativement aux bâtiments OSM-visible et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques présentes dans la base de données vecteur-STU.

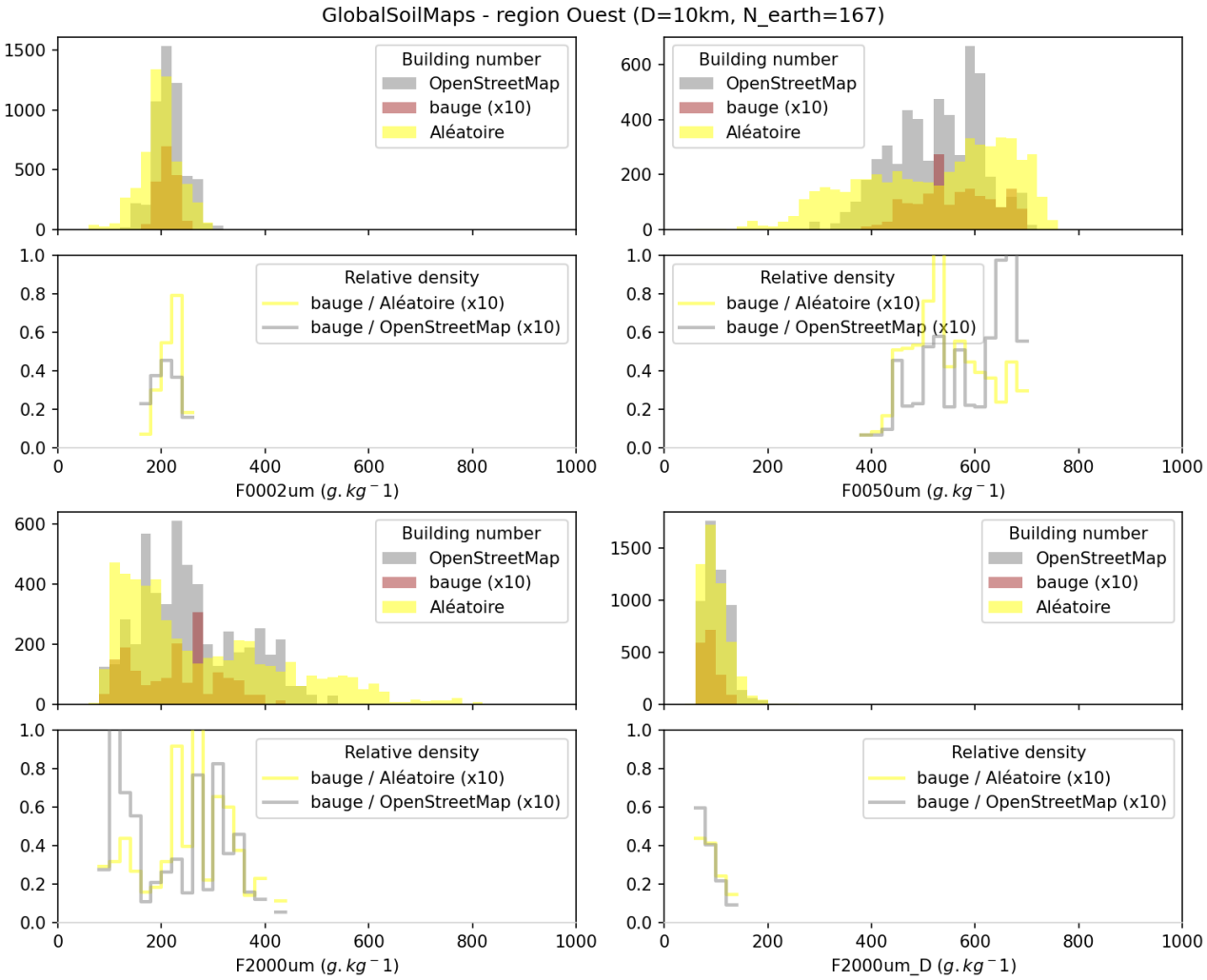


Figure 87 : Transect Ouest: occurrence de bâtiments en bauge, OSM-visible et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en bauge relativement aux bâtiments OSM-visible et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques présentes dans la base de données GlobalSoilMaps.

5.2.1.2 Bauge : Occitanie

Les 25 échantillons croisés avec les données pédologiques ne permettent probablement pas une bonne représentativité des données collectées. Cependant, on note que l'on observe ici encore une relation semblant croissante entre GSM-F50µm et la densité bâtie en terre (Figure 89 - F50µm), ainsi qu'encore une fois une relation décroissante de teneurs en éléments grossiers pour GSM (Figure 89 - F2000µm_D). Pour F2000µm_D, la tendance n'est toutefois pas validée par vecteur-STU (Figure 88 - F2000µm_D).

D'autre part, l'augmentation de la densité bâtie en bauge avec la profondeur du sol est également manifeste pour ce transect (Figure 88 - stu_thick).

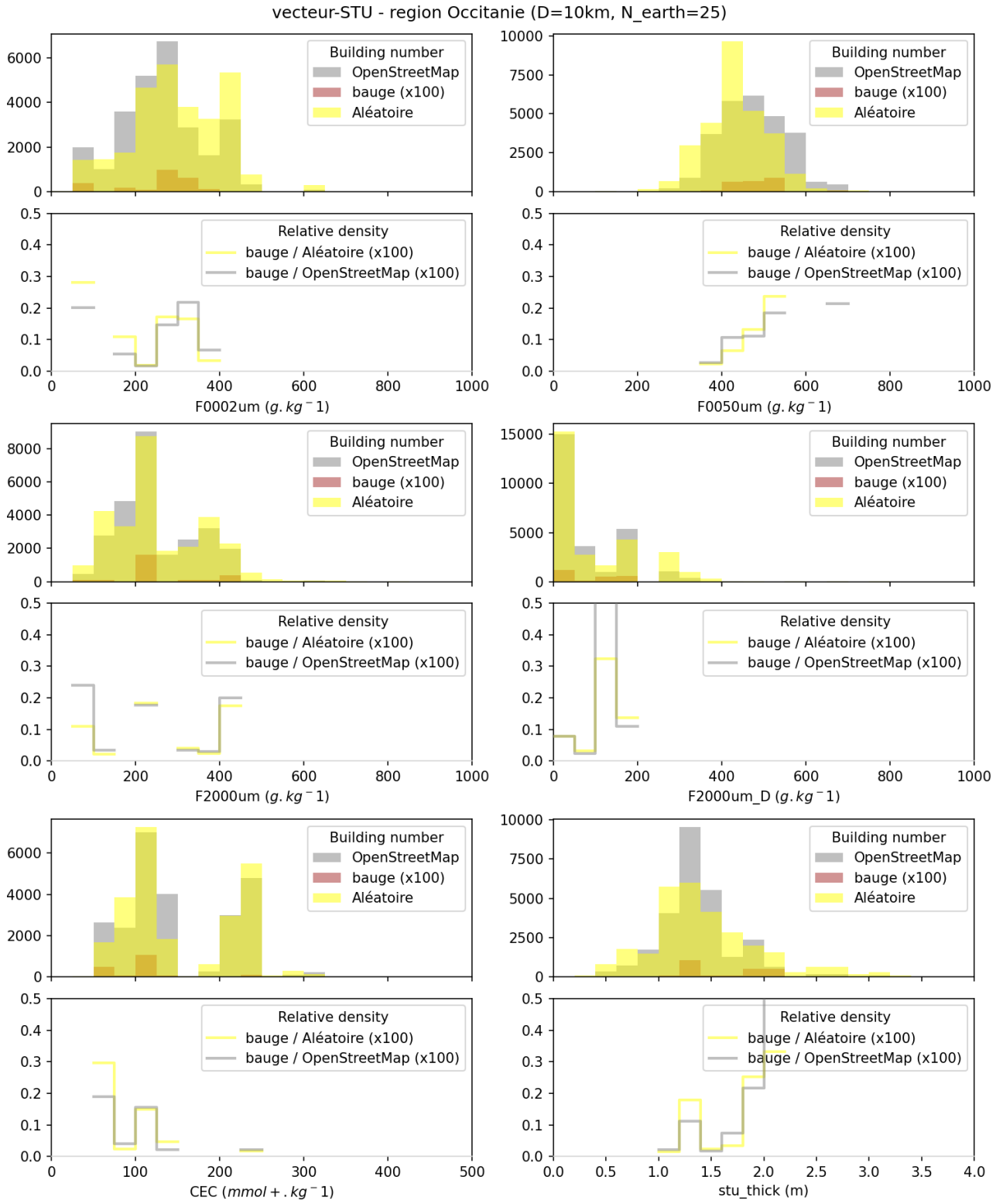


Figure 88 : transect Occitanie : occurrence de bâtiments en bauge, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en bauge relativement aux bâtiments OSM et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques présentes dans la base de données vecteur-STU.

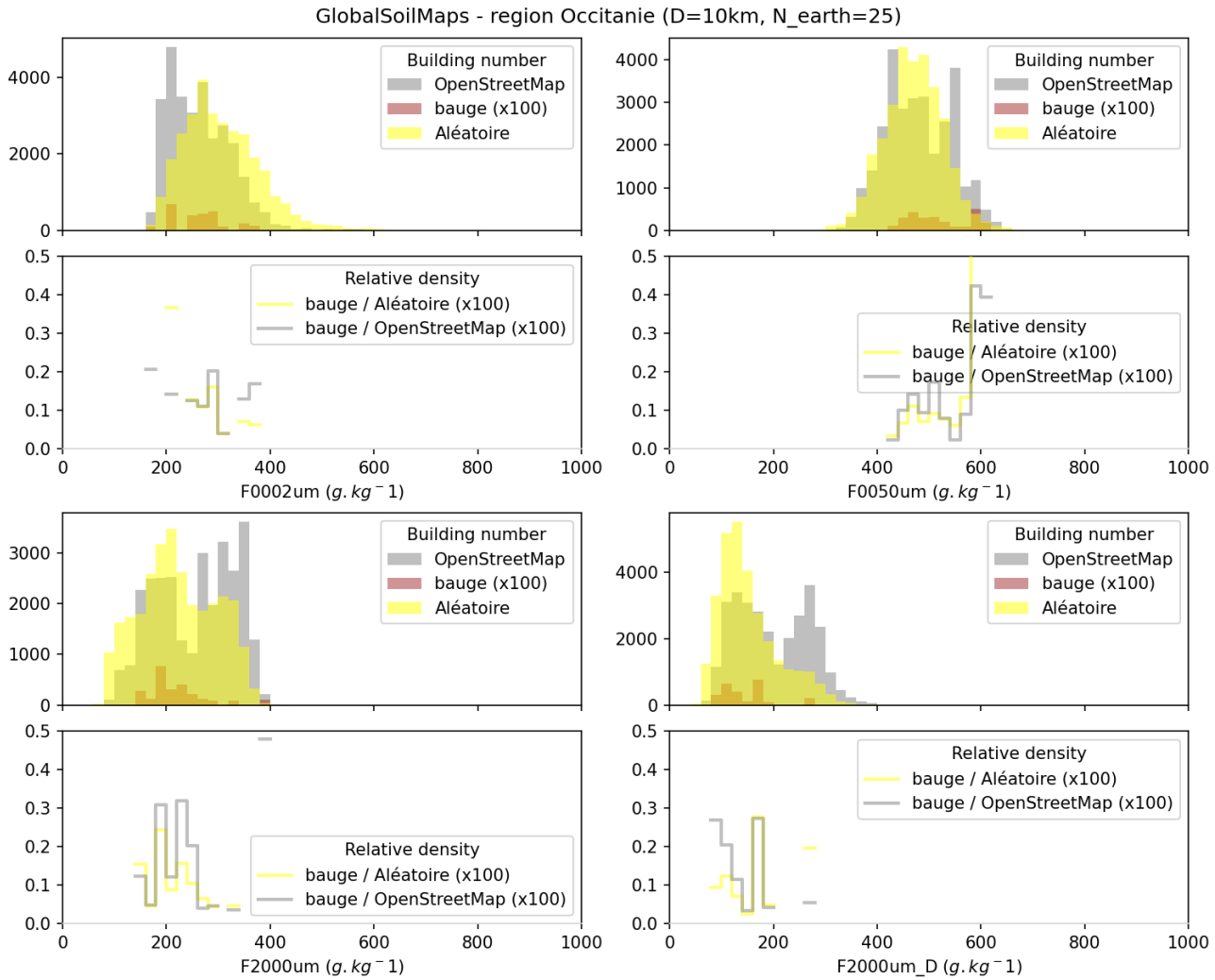


Figure 89 : transect Occitanie : occurrence de bâtiments en bauge, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en bauge relativement aux bâtiments OSM et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques présentes dans la base de données GlobalSoilMaps.

5.2.1.3 Bauge : Champagne-Ardenne

Sur cette région, les 36 points identifiés comme composés de bauge sont localisés sur une toute petite zone à l'intersection entre la Seine-Et-Marne et l'Yonne (voir Figure Erreur : source de la référence non trouvée). L'occurrence et la densité relative selon F50µm (Figure 90) montrent deux zones d'occurrence de bâti : l'une sur des sols très peu limoneux (<200g.kg^{-1}), l'autre à des teneurs plus proches de celles rencontrées dans l'Ouest (300-800g.kg^{-1}). Une dynamique pourtant invisible pour GSM. La seconde zone, aux densités relatives croissantes avec F50µm, rappelle la dynamique observée dans les autres régions. La première zone est plus difficile à interpréter. Puisqu'elle est invisible pour GSM, elle provient probablement d'un artefact des données DoneSol3. Ce cas particulier sera examiné en section 5.2.2.3 . Du fait du faible nombre d'échantillons, les autres variables ne présentent pas de dynamique particulière, et sont consultables en Annexe III.

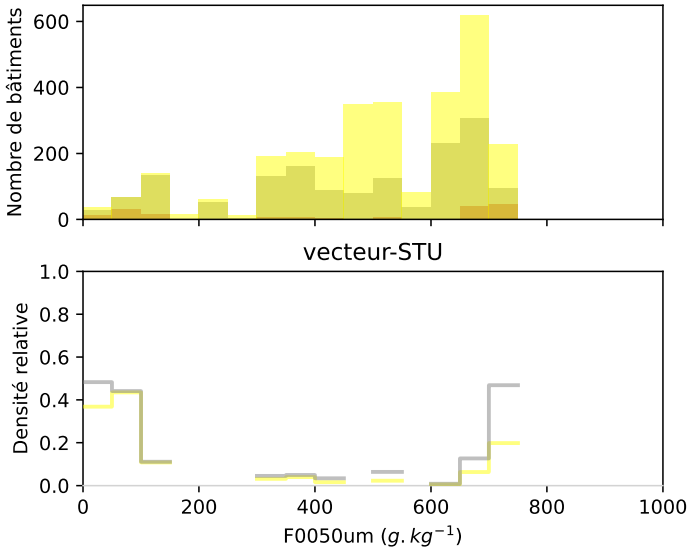


Figure 90 : transect Champagne-Ardenne: occurrence de bâtiments en bauge, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en bauge relativement aux bâtiments OSM et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon la variable F50µm de la base de données vecteur-STU.

5.2.1.4 Bauge : Limagne

Pour ce transect, seuls 11 points ont pu être croisés avec les bases de données, ce qui n'a pas permis l'observation de résultats concrets. Les figures sont consultables en Annexe III.

5.2.1.5 Pisé : Limagne

En Limagne, 737 échantillons de pisé ont été croisés avec les bases de données pédologiques. La densité relative semble légèrement croissante avec la fraction F2µm pour GSM (Figure 92 - F0002µm), mais la tendance n'est pas confirmée pour vecteur-STU (Figure 91 - F0002µm). La tendance est légèrement décroissante pour GSM-F2000µm_D, que l'on peut observer également pour vecteur-STU. Pour l'ensemble des autres variables, il n'y a pas de tendance marquée, hormis quelques artefacts (ex : GSM-F50µm pour 100-200g.kg^{-1}), mais non partagés entre les deux sources de données.

Il est intéressant de remarquer que de nombreux bâtiments en pisé reposent sur des sols à très forte CEC (Figure 91 - CEC), supérieures à 300 mmol+.kg^{-1}, montrant finalement de fortes densités relatives pour ces sols. On ne peut pas dire que cette propriété favorise la densité relative bâtie en pisé, mais elle n'est en tout cas pas défavorable, même pour de fortes valeurs de CEC. Ce résultat est analysé en détails en section 5.2.2.1 .

On note également l'absence de corrélation claire entre la profondeur du sol et la densité bâtie (Figure 91 - stu_thick), voir peut-être une corrélation négative, contrairement aux observations pour la bauge où la profondeur semblait favorable à la densité bâtie pour cette technique (4.3.3).

5.2.1.6 Pisé : occitanie

En Occitanie, seuls 57 échantillons de pisé ont été croisés avec les données pédologiques. C'est peu, mais cela semble suffisant pour observer quelques tendances. Chaque échantillon est multiplié par 100 dans la base de données afin d'observer plus convenablement les différences de distribution des données de pisé et de densité.

Comme en Limagne, la densité relative est peut-être légèrement croissante avec la fraction F2µm pour GSM (Figure 94), pas pour vecteur-STU (Figure 93). Une tendance intéressante est cependant montrée par vecteur-STU : dès lors que la CEC est supérieure à 150mmol+.kg^{-1}, il n'y a plus de bâtiments en pisé malgré la présence de bâtiments OSM-visible et Aléatoires. Cela est surprenant au vu des résultats en Limagne autorisant des CEC bien supérieures (Figure 91 - CEC).

La fraction F2000µm semble décroissante pour vecteur-STU, mais cela n'est pas visible pour GSM.

La fraction F2000µm_D semble présenter une densité décroissante pour GSM, mais ce n'est pas confirmé par vecteur-STU, dont la tendance est assez instable.

L'épaisseur du profil de sol (Figure 93) ou la fraction F50µm (Figure 94 et 93), ne montrent pas de tendances particulières, mais on manque d'informations pour les faibles épaisseurs de sols (0-1m).

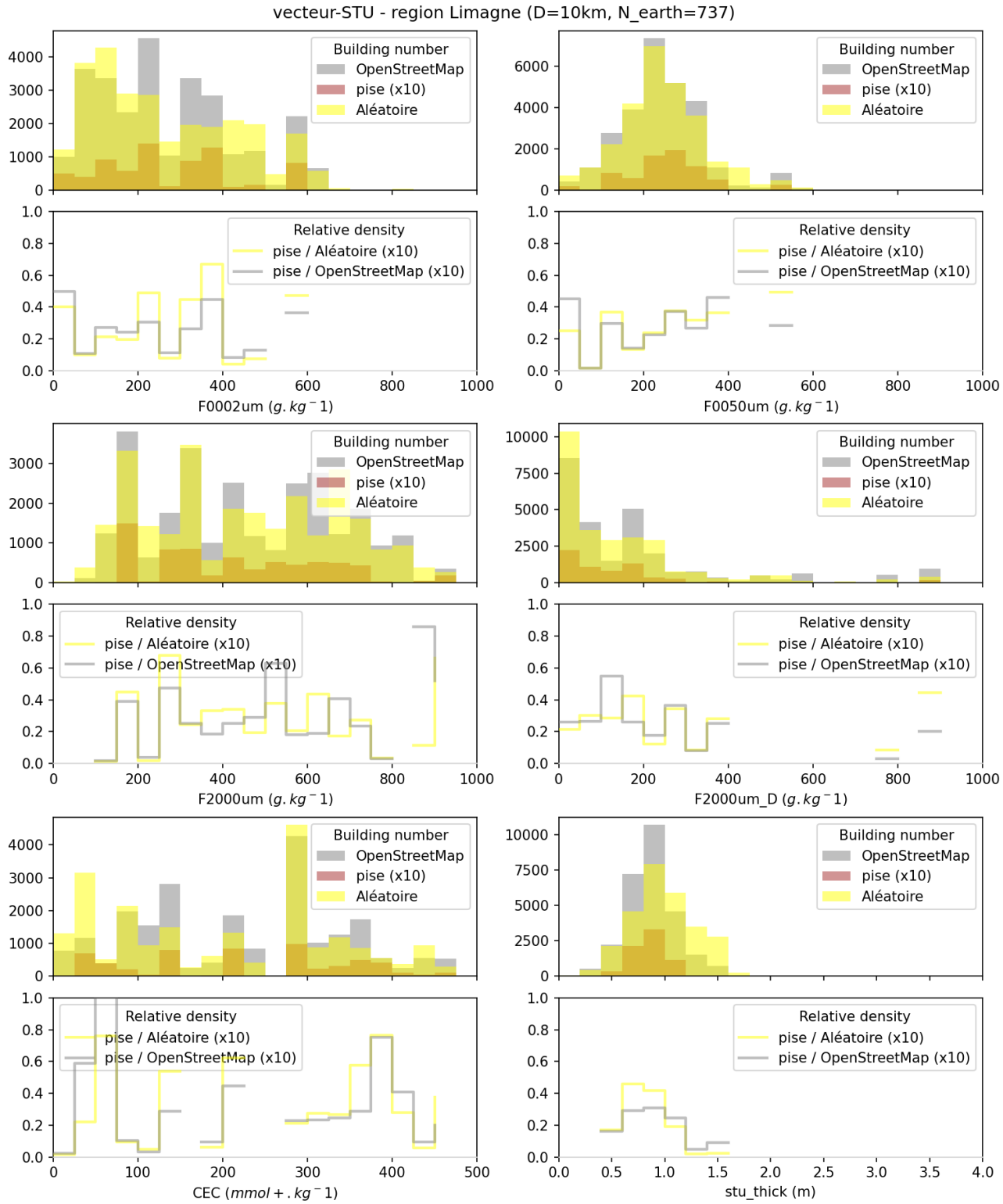


Figure 91 : transect Limagne: occurrence de bâtiments en pisé, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en pisé relativement aux bâtiments OSM et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques présentes dans la base de données vecteur-STU.

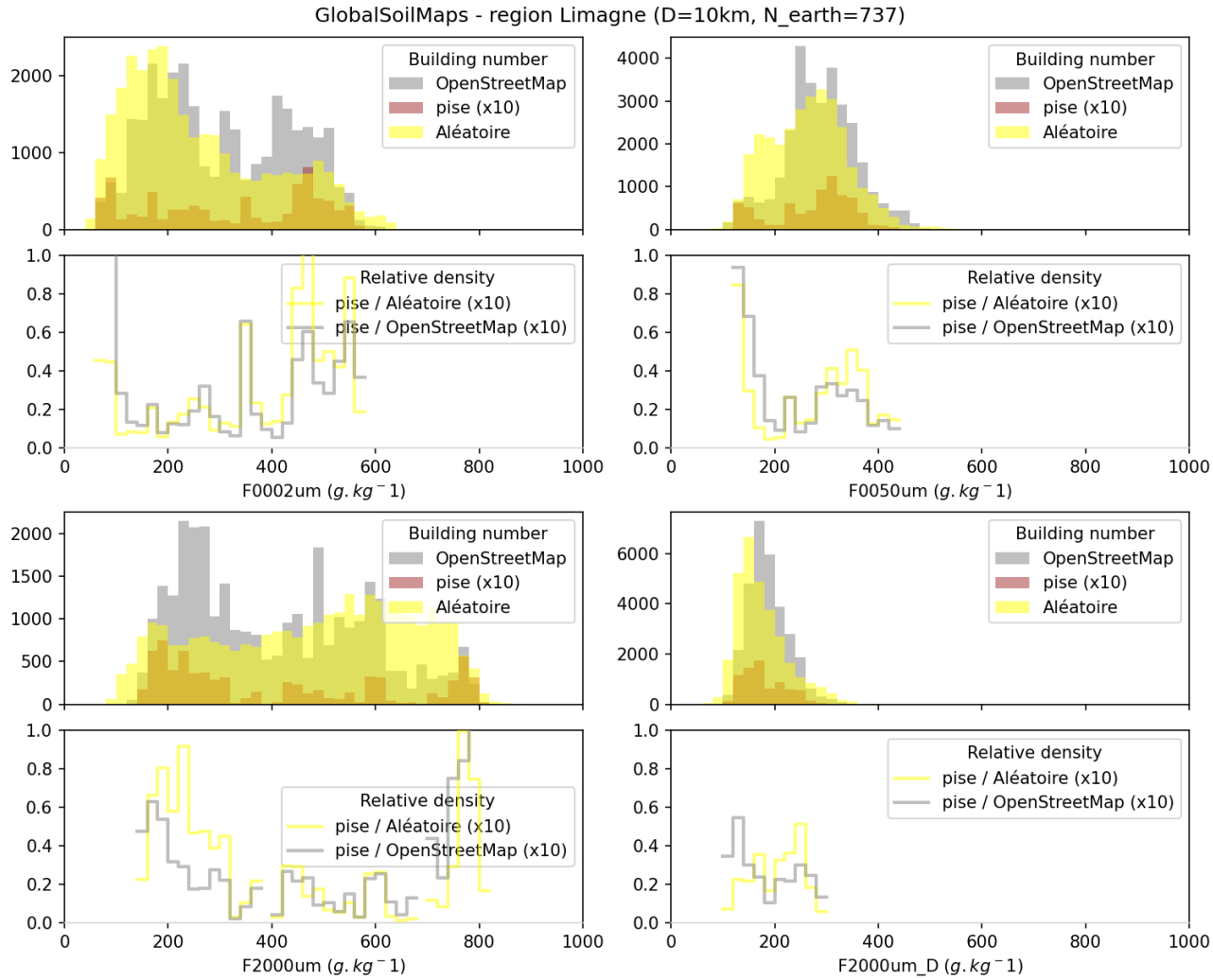


Figure 92 : transect Limagne: occurrence de bâtiments en pisé, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en pisé relativement aux bâtiments OSM et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques présentes dans la base de données GlobalSoilMaps.

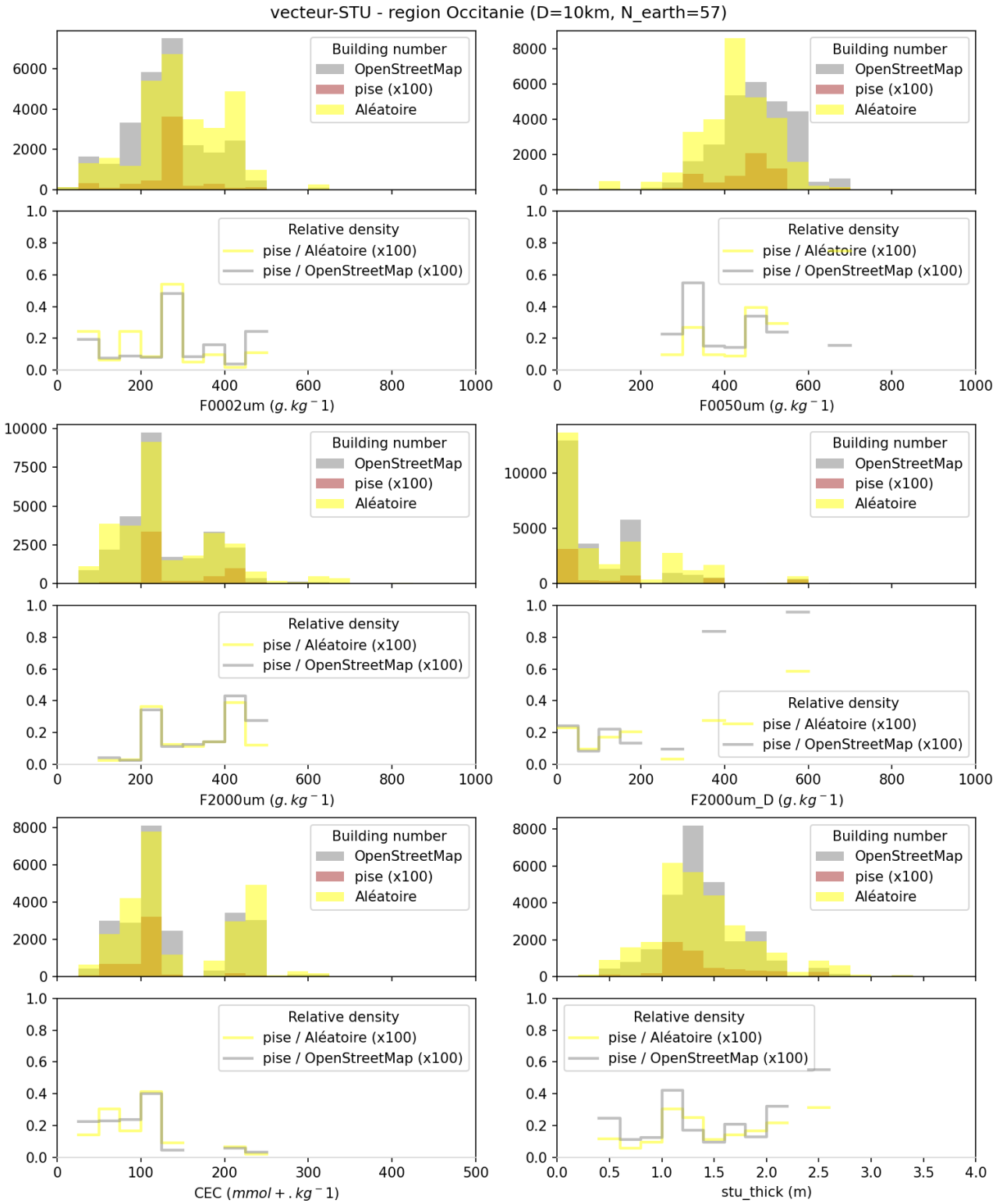


Figure 93 : transect Occitanie: occurrence de bâtiments en pisé, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en pisé relativement aux bâtiments OSM et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques présentes dans la base de données vecteur-STU.

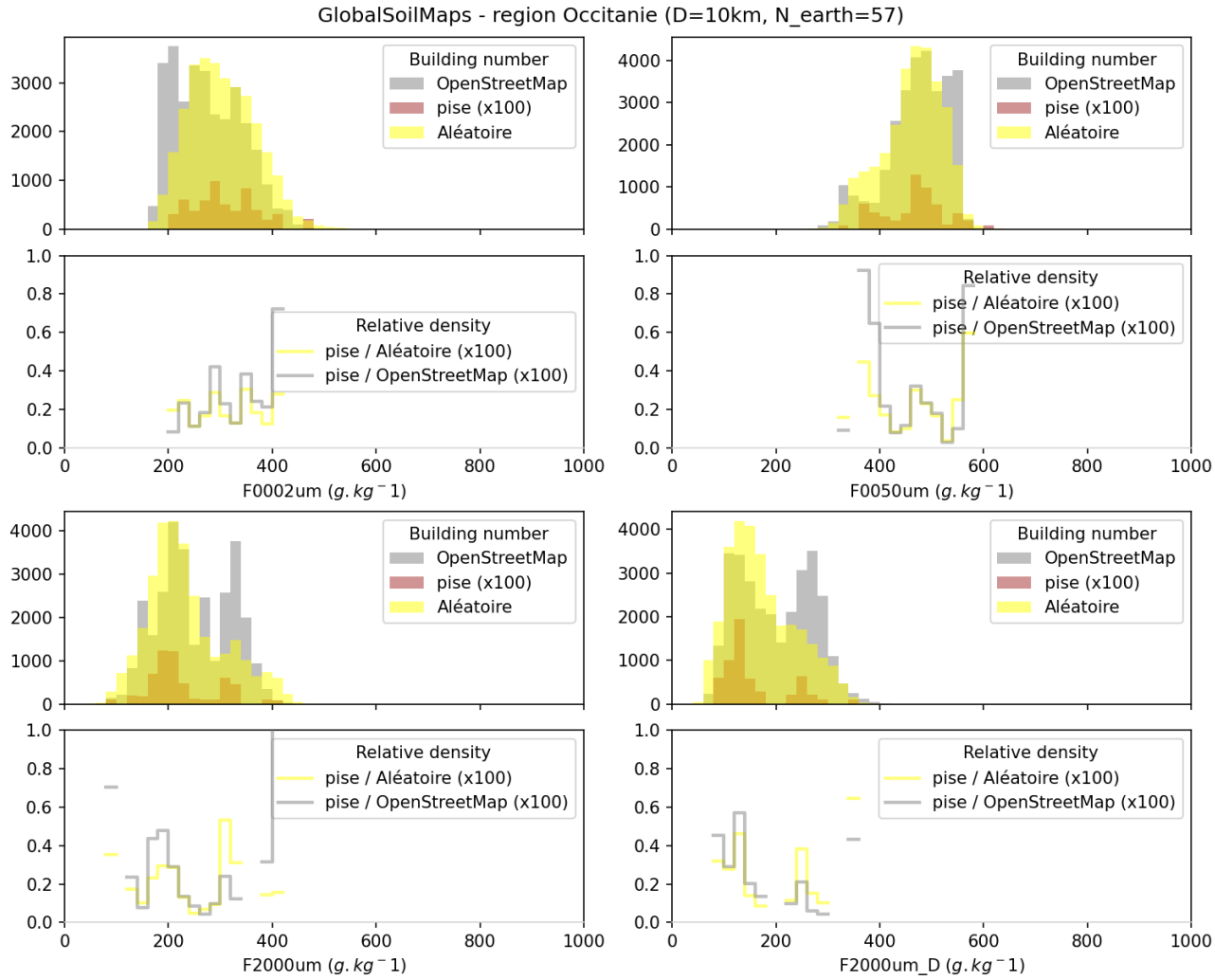


Figure 94 : transect Occitanie: occurrence de bâtiments en pisé, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en pisé relativement aux bâtiments OSM et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques présentes dans la base de données GlobalSoilMaps.

5.2.1.7 Adobes : Champagne-Ardenne

3415 bâtiments en adobes ont été repérés et croisés avec les bases de données dans cette région, ou l'on les nomme « carreau de terre ». Les résultats pour cette section sont remarquables par les faibles corrélation obtenues entre les propriétés étudiées et la densité relative en carreaux de terre malgré l'importante quantité de données.

La teneur en éléments grossier F2000µm_D semble défavorable à la densité bâtie en carreaux de terre, car elle baisse faiblement mais assez régulièrement pour vecteur-STU (Figure 97). Les données issues de GSM (Figure 95) s'accordent sur cette conclusion mais semblent n'avoir capturé qu'une faible variabilité de la propriété. Comme déjà observé, GSM est moins précis que les données DoneSol3 pour les teneurs en éléments grossiers.

Contrairement au transect d'Occitanie et aux observations pour la bauge (Bretagne, Occitanie), la densité relative baisse avec l'augmentation de la profondeur (Figure 97).

La faible corrélation générale avec les propriétés étudiées peut indiquer une convenance du carreau de terre quelle que soit les sols employés, mais peut également masquer une variable plus discriminante. Dans cette région, il est probable que la composante calcaire des sols apporte des propriétés de cimentation (Annexe I, 4.4) et/ou de liaison ioniques entre les éléments argileux (Annexe I, 4.3.2). L'emploi de données de pH, et de composition du matériau parental du sol, pourrait renseigner sur ces deux variables.

5.2.1.8 Adobe: Occitanie

407 bâtiments en adobes sont identifiés en Occitanie. La densité relative OSM-visible semble légèrement croissante avec la fraction F2µm pour GSM (Figure 97), mais la tendance n'est pas confirmée pour vecteur-STU (Figure 96). Il y a une différence marquée entre OSM-visible et Aléatoire pour cette propriété via GSM : la densité relative Aléatoire est relativement constante, tandis qu'OSM-visible est croissant. Nous avons indiqué (4.3.4) que lorsque des différences d'intensités marquées entre OSM et Aléatoire se présentaient, ce pouvait être la marque d'une *installation préférentielle des populations* selon la propriété pédologique étudiée ; et que dans ce cas, la tendance réelle de densité relative terre/OSM représenterait le début d'une tendance plus marquée pour les bâtiments Vernaculaires. Si c'est le cas, on peut imaginer qu'avec des données de densité « Vernaculaires » comme pour l'étude en Bretagne, la tendance croissante selon la fraction F2µm serait encore plus forte.

Une dynamique semblable d'installation préférentielle sur les sols limoneux et argileux plutôt que sableux peut être observée sur les graphiques de pisé en Limagne (GSM F2µm et F50µm Figure 92, et vecteur-STU F2µm Figure 91). En Occitanie comme en Limagne, nous ne connaissons pas suffisamment le contexte vernaculaire historique pour proposer une explication à ces tendances préférentielles, qui pourraient également s'expliquer par l'influence du développement récent d'une métropole à proximité.

Pour F50µm, la tendance croissante est nette pour GSM et peut être remarquée pour vecteur-STU. F2000µm et F2000µm_D sont fortement décroissantes pour GSM, mais ce n'est pas marqué pour vecteur-STU. Pour l'ensemble des propriétés de granulométrie de GSM, la densité OSM-visible marque plus fortement les tendances que la densité Aléatoire. Mais cette remarque ne semble pas valable pour vecteur-STU.

La variation de CEC est assez anarchique. Celle de la profondeur des STU montre une relative croissance de la densité selon la profondeur, comme globalement observé pour les techniques de bauge, mais contrairement à ce qui a été observé pour les adobes en Champagne-Ardenne.

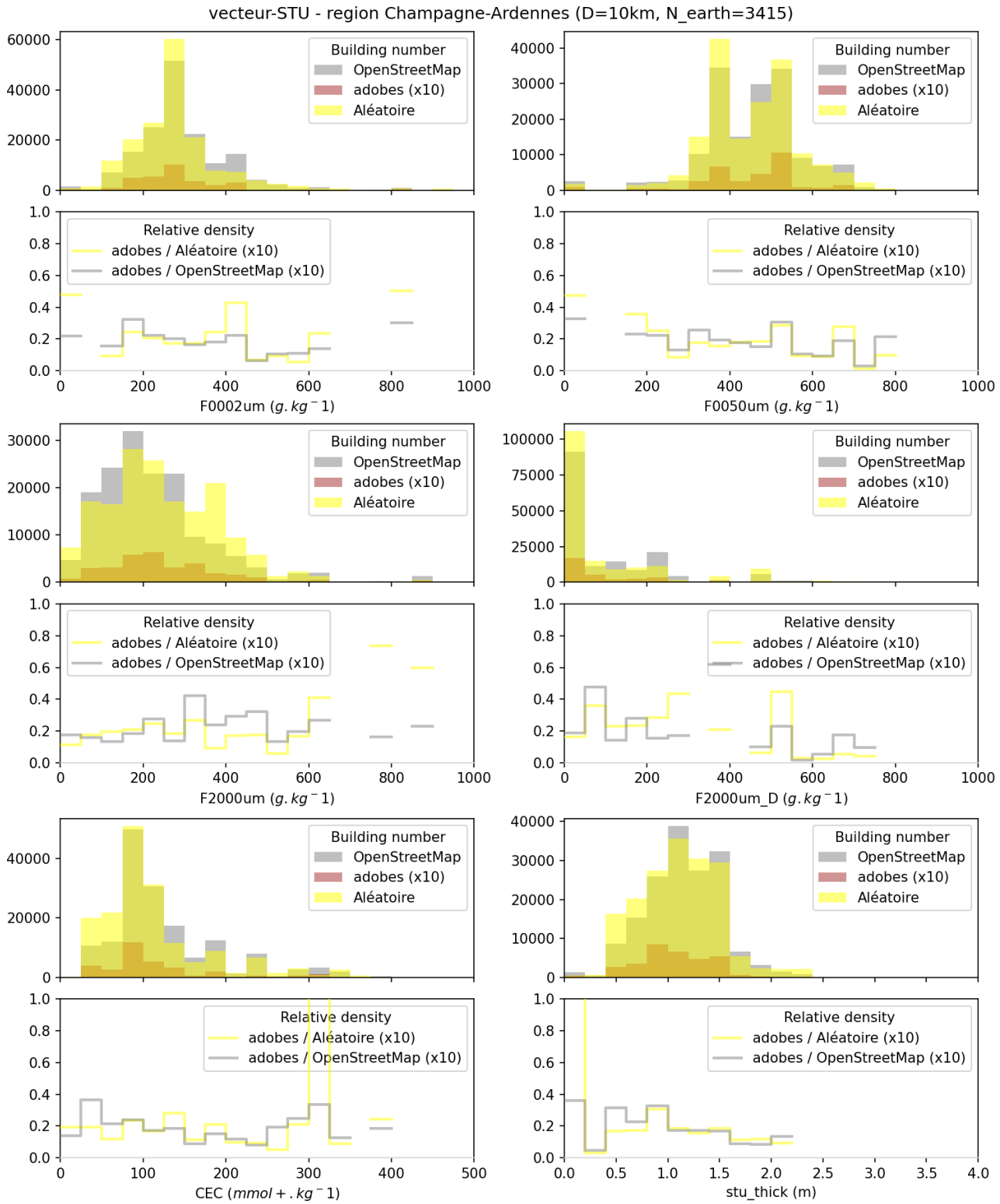


Figure 95 : transect Champagne-Ardenne: occurrence de bâtiments en adobes, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en adobes relativement aux bâtiments OSM et

Aléatoires (graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques présentes dans la base de données vecteur-STU.

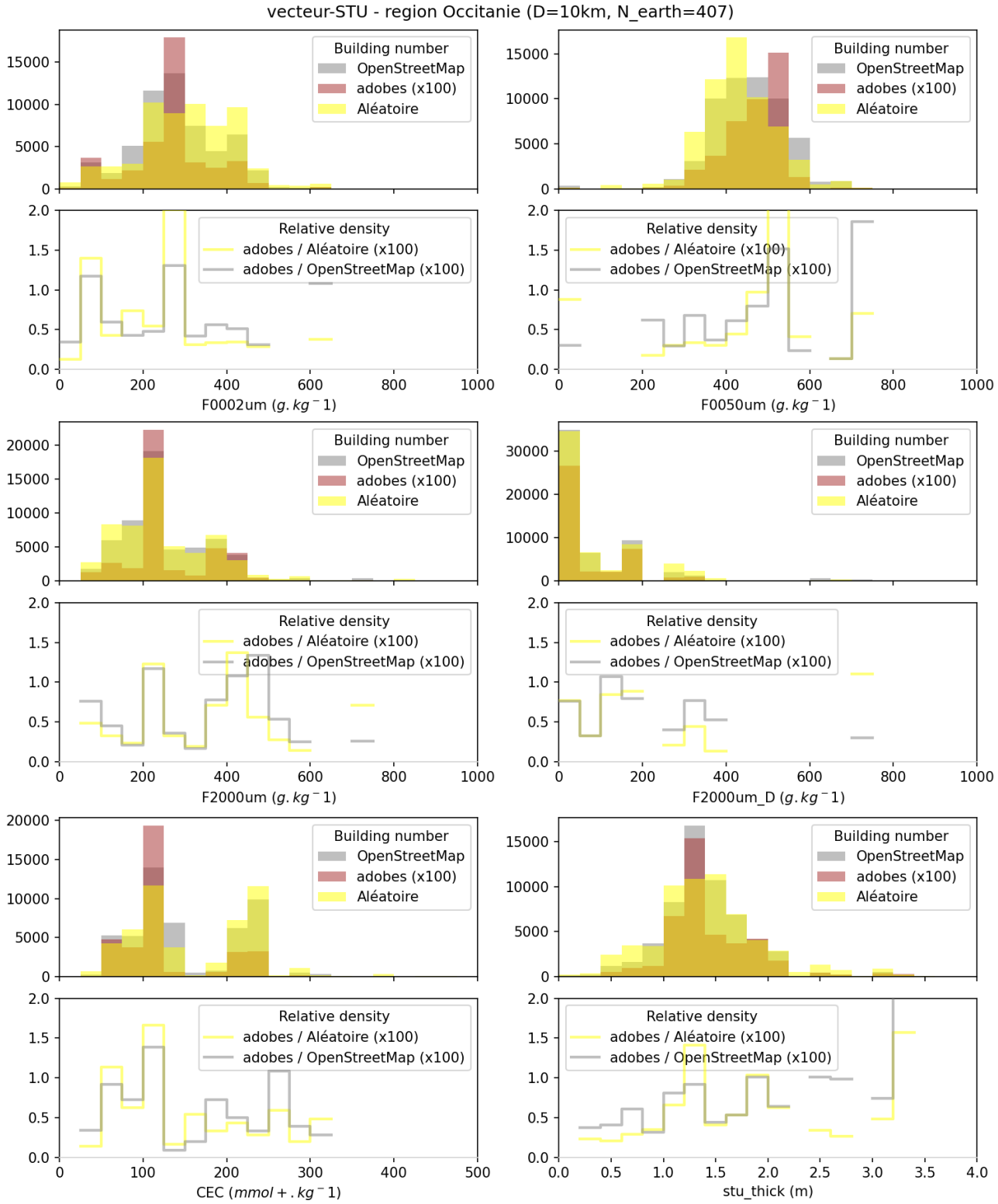


Figure 96 : transect Occitanie: occurrence de bâtiments en adobes, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en adobes relativement aux bâtiments OSM et Aléatoires

(graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques présentes dans la base de données vecteur-STU.

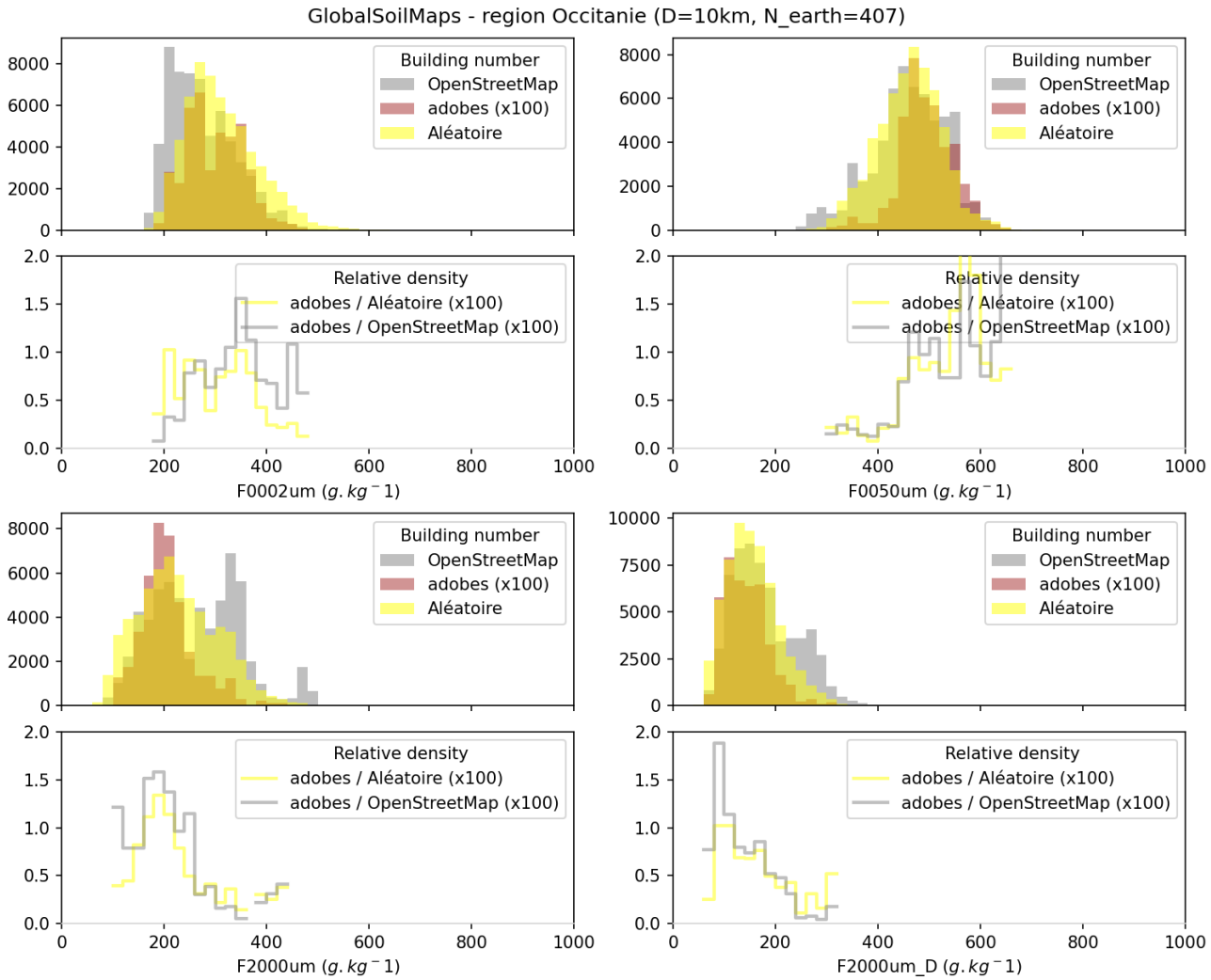


Figure 97 : transect Occitanie: occurrence de bâtiments en adobes, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en adobes relativement aux bâtiments OSM et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques présentes dans la base de données GlobalSoilMaps.

5.2.1.9 Adobes : Limagne

Le nombre d'échantillons de n=117 n'est pas négligeable, mais peut être du fait de sa dispersion, les tendances de densité ne sont pas très explicites, à la fois pour vecteur-STU et GSM. C'est plus surprenant pour GSM qui présente d'habitude des valeurs assez progressives.

On peut observer une certaine tendance croissante de la densité avec la valeur de F2µm pour les deux sources de données (Figures 98 et 99), et peut-être une décroissance pour F50µm.

Avec également une forte variabilité dans la tendance, la densité augmente avec l'augmentation de la profondeur des sols (Figure 99 - stu_thick). Le reste des propriétés ne montre pas de tendance particulière. La grande dispersion des valeurs granulométriques pour l'ensemble des propriétés ne

peut être liée qu'à de l'erreur statistique : les propriétés sous-jacentes des bâtiments composés d'adobes sont donc très variables.

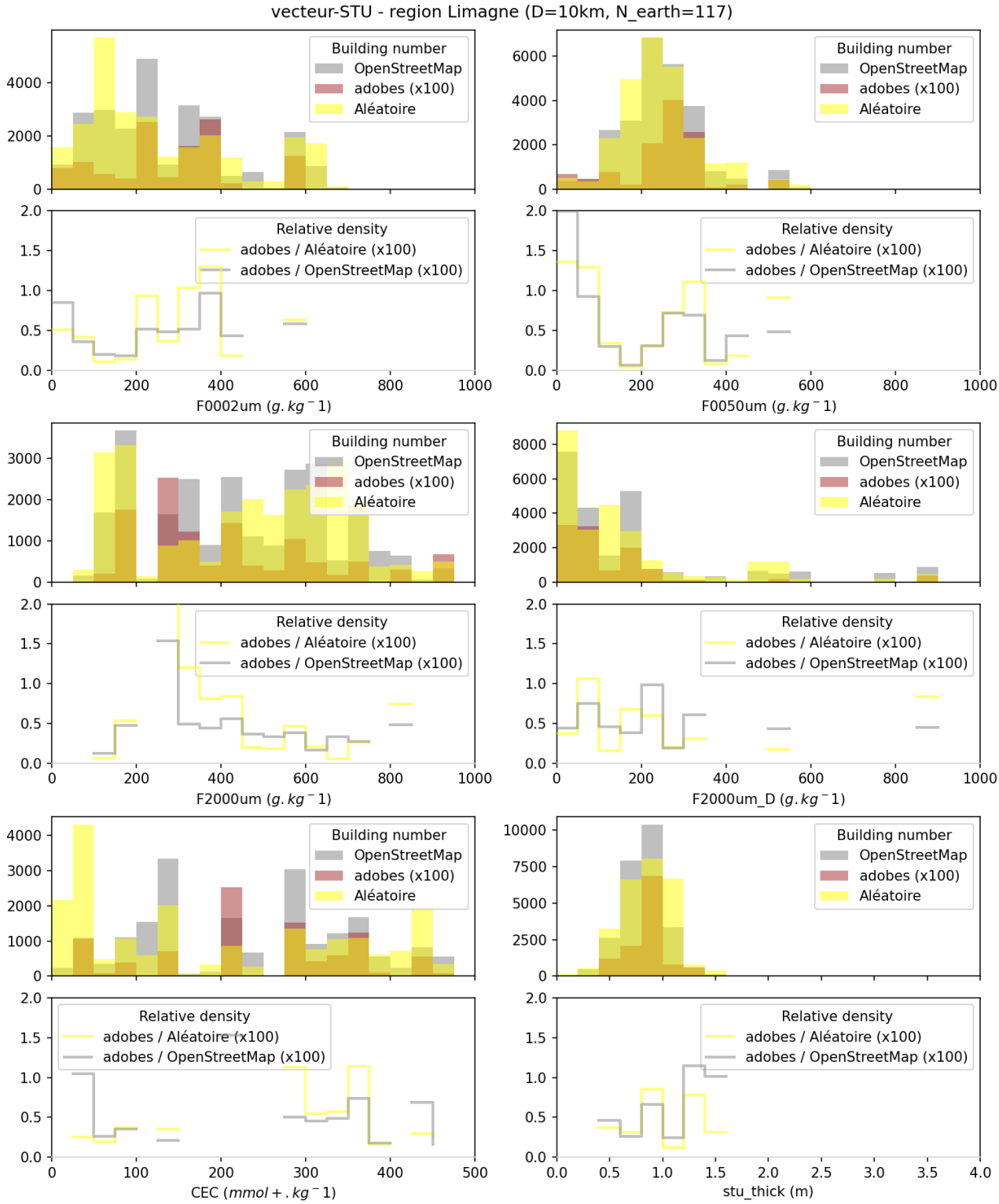


Figure 98 : transect Limagne: occurrence de bâtiments en adobes, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en adobes relativement aux bâtiments OSM et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques présentes dans la base de données vecteur-STU.

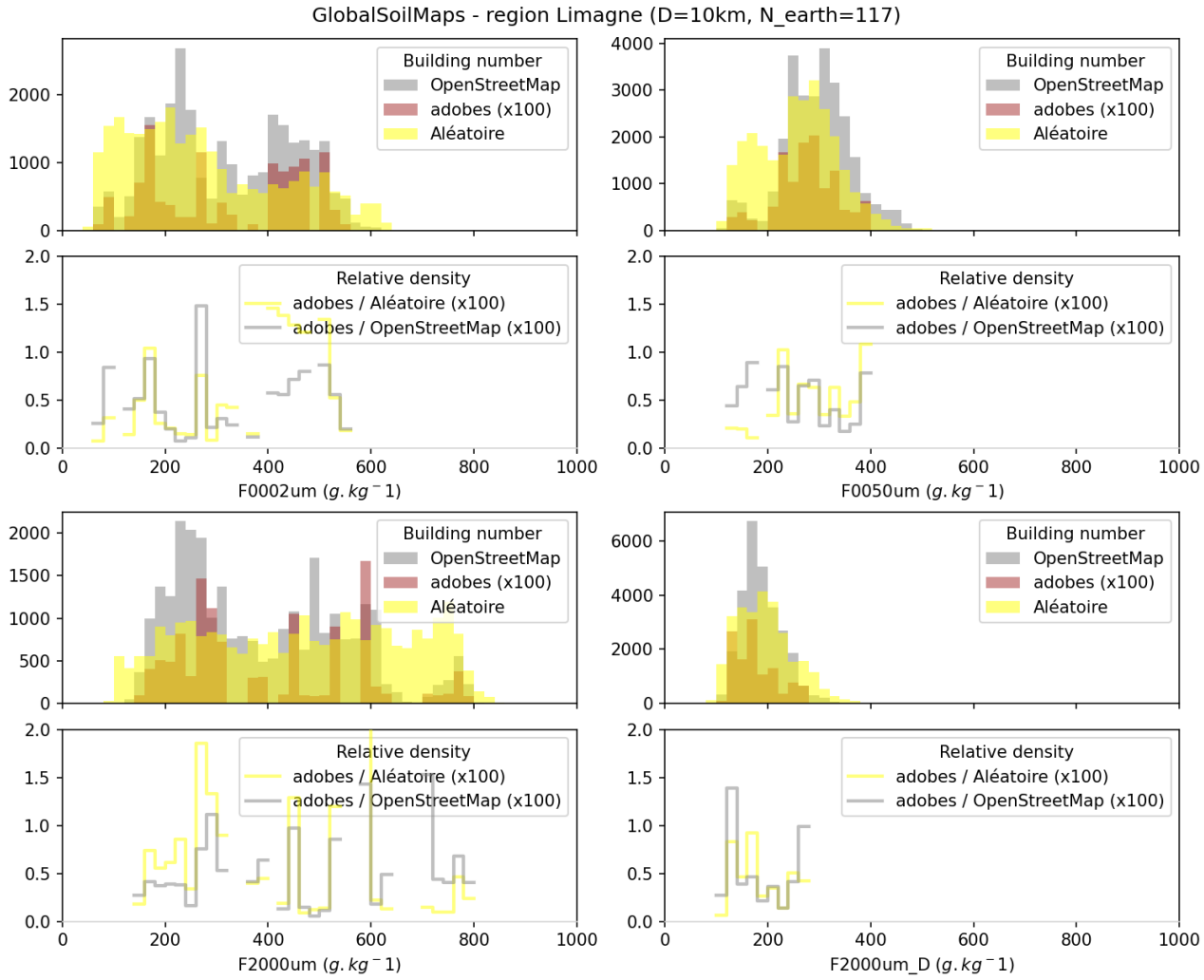


Figure 99 : transect Limagne: occurrence de bâtiments en adobes, OSM et Aléatoires (graphiques supérieurs) et densités de bâtiments en adobes relativement aux bâtiments OSM et Aléatoires (graphiques inférieurs) selon les variables pédologiques présentes dans la base de données GlobalSoilMaps.

5.2.1.10 Discussion par technique pour l'ensemble des régions

5.2.1.10.1 Bauge

L'essentiel des points-bâtiments composés de bauge se situant dans la zone Ouest, c'est la seule région où l'on observe un étalement de valeurs suffisant pour observer de vraies tendances. Cependant, une fois l'analyse faite sur ce territoire, celle des autres transects peut être réalisée en comparaison à l'Ouest ce qui facilite la compréhension des tendances.

Il est intéressant de remarquer que la tendance d'augmentation de la densité relative selon l'augmentation de la teneur en limons observée dans l'emploi de la base de données du Service du Patrimoine de Bretagne (Figure 70 - GSM – F50µm) est d'une part repérée dès la réalisation d'un transect de quelques dizaines de bâtiments dans l'Ouest (Figures 87 et 86) et d'autre part peut être observée ailleurs que sur le territoire Breton (Occitanie, Figures 89 et 88). Cela est également valable pour l'augmentation de la densité avec la profondeur du sol (stu_thick – Ouest - Figure 86, stu_thick - Occitanie - Figure 88).

Il n'est pas question en Occitanie de présence importante de limons éoliens qui apporteraient une corrélation négative entre la teneur en limons et la profondeur, car ces dépôts se limitent à la partie nord du territoire hexagonal (Antoine 2002). Cela n'empêche pas que la présence de dépôts sédimentaires limoneux soient également corrélés à la profondeur du sol. Cela amène les mêmes questionnements que pour la Bretagne : s'il y a intercorrélation des variables pédologiques, quel est la causalité du choix technique ? Une compréhension plus détaillée des pédologies locales, notamment des corrélations entre propriétés des sols en Occitanie serait adéquate pour conclure.

5.2.1.10.2 Pisé

Le pisé n'a été rencontré qu'en Limagne et en Occitanie, et de manière anecdotique en Champagne-Ardenne (un bâtiment). De ce fait, nous ne disposons que de deux zones de croisement de données.

Les données GSM suggèrent une croissance de densité bâtie en pisé avec la fraction F2µm (Figures 92, 94), mais dans les deux cas, ce n'est pas confirmé par vecteur-STU (Figures 91, 93). Les quantités de bâtiments en pisé les plus importantes sont ainsi trouvées sur des sols aux fractions argileuses (F2µm) supérieures à 200 $g.kg^{-1}$ en Limagne et Occitanie pour vecteur-STU comme GSM ; et des densités bâties en pisé significatives peuvent être trouvées au-delà de 400 $g.kg^{-1}$ en Limagne (Figures 92 et 91).

Les données de CEC issues de vecteur-STU montrent des densités bâties significatives pour des valeurs de CEC supérieures à 300 $mmol+.kg^{-1}$ en Limagne (Figure 91), mais cela n'est pas le cas en Occitanie où la densité relative de pisé chute au-delà de 150 $mmol+.kg^{-1}$ (Figure 93). Des CECs supérieures à 300 $mmol+.kg^{-1}$ font partie des plus fortes rencontrées en France hexagonale (Annexe I, Figure 13) et témoignent de la présence de grandes quantités d'argiles moyennement actives, ou de la présence d'argiles très actives.

Par ailleurs, la tendance pour les éléments grossiers montre peut-être une décroissance, mais si celle-ci était statistiquement valable, elle serait bien moins conséquente que celle observée pour les techniques-type de bauge en Bretagne. Si c'est le cas, cela alimenterait l'hypothèse selon laquelle les granulométries grossières sont plus favorables aux techniques compactées. Ou plutôt, « moins défavorables », une fois prise en compte la concurrence croissante avec les techniques de pierre qui seraient favorisées par les sols grossiers. Cependant la qualité de la prédiction des teneurs en EG de GSM est discutable ce qui ne permet pas vraiment de conclure ici.

Enfin, on remarque une absence de dépendance apparente à la profondeur du sol pour les techniques de pisé, contrairement à ce qui a été observé pour la bauge (Bretagne, Occitanie). Cela concorde avec

un moindre impact des éléments grossiers. Mais peu de valeurs sont disponibles pour les faibles profondeurs.

Dans l'ensemble, une étude sur les techniques-types de pisé bénéficierait de l'analyse de plus de données, notamment de la vallée du Rhône.

5.2.1.10.3 Adobes

Les résultats de l'analyse des bâtiments composés d'adobes auraient pu être favorables à l'observation de bonnes corrélations avec des variables pédologiques, du fait de la grande quantité d'échantillons repérés au cours des transects. Cependant, d'une part, la plupart des variables pédologiques ne présentent pas de corrélation claire avec la densité bâtie, et d'autre part les quelques tendances observées ne sont pas cohérentes selon les régions.

Par exemple, là où la fraction F2µm (argile) semble faiblement favorable à la densité bâtie en Occitanie et Limagne, en Champagne-Ardenne la corrélation éventuelle serait plutôt négative.

Cependant, on a noté la présence d'une corrélation plutôt négative dans chacune des régions pour la fraction F2000µm_D ; mais son amplitude est variable et rarement reproduite entre vecteur-STU et GSM.

Finalement face au manque de corrélation observé malgré la quantité de données mobilisées, la première hypothèse est la versatilité des techniques-type d'adobes, capables de s'adapter à la plupart des types de sols. Mais une seconde hypothèse est également probable : le fait que le sol employé pour bâtir ne corresponde pas toujours au sol sous-jacent au bâtiment (7.1), première incertitude de la méthode de croisement, soit particulièrement courant pour les techniques-types d'adobe. Composées d'éléments préfabriqués, le matériau est certainement plus souvent transporté que pour les autres techniques de construction, du fait de son potentiel commerce local (Chapitre 3A, 3.5.2) et de la possible centralisation de la production (Chapitre 3A, 3.4.7.2). C'est ainsi que l'on pourrait régulièrement trouver des bâtiments en adobes sur des sols pourtant moins favorables à leur production. Cependant, l'échange local d'adobes a pu se faire principalement dans un contexte de voisinage, car en l'absence d'abondance énergétique et de systèmes de transports développés, l'avantage économique* relatif de transporter plutôt que de changer de technique de construction est probablement défavorable au transport dès quelques kilomètres parcourus. Ainsi, nous pensons qu'il est peu probable que cette incertitude ne soit la seule cause de l'absence de tendance favorable pour certaines propriétés pédologiques. Les deux hypothèses sont donc envisageables.

5.2.1.10.4 Remarques générales – données de densité et installation préférentielle

Pour l'ensemble des techniques-types et des transects, les densités OSM-visible et Aléatoire ne montrent pas de grandes différences en terme de variabilité de résultats. En Occitanie, on a pu observer assez clairement les marques d'une *installation préférentielle des populations* (3.3) : la distribution des données OSM-visible n'est pas la même que celle des données Aléatoire représentant la distribution des sols de la zone (GSM-F2µm, Figure 97). Une dynamique similaire est observée en Limagne (GSM F2µm et F50µm Figure 92, et vecteur-STU F2µm Figure 91) mais nous ne savons pas comment l'interpréter en absence de connaissance des dynamiques historiques des populations locales.

La présence de ces quelques différences entre Aléatoire et Vernaculaire permet peut-être d'interpréter plus correctement les tendances par l'emploi d'une densité bâtie relative plus représentative. Malgré tout, il est difficile de s'assurer que les variations présentées par OSM-visible sont bien liées à une installation préférentielle, comme observé en Bretagne, ou à d'autres facteurs : l'observation en

Bretagne reposait sur peu d'exemples pour conclure avec certitude de la position « intermédiaire » d'OSM entre Vernaculaire et Aléatoire.

Dans tous les cas, OSM et Aléatoire permettent de connaître la distribution des sols de la zone, ce qui est indispensable pour éviter de confondre l'absence d'occurrence de patrimoine pour un type de sol avec l'absence de ce type de sol de la zone étudiée.

Avec des corrélations lisses et claires, nous nous serions attendus a voir des *optimums* plutôt que des formes de corrélations linéaires lorsque des techniques de terre montrent des variations de densités relatives selon une variable pédologique, comme c'est le cas de F50µm pour la bauge (p. ex. Figure 86 - F0050µm). En effet, toutes les techniques-types devraient bénéficier d'une forme de continuité du squelette granulaire* ; et de ce fait ne jamais être idéales pour des granulométries extrêmes (100 % limons, 100% sable, etc). Mais d'une part, à l'échelle de l'ensemble des possibilités granulométriques, cet optimum se situe peut-être très proche de l'extrémité (950 $g.kg^{-1}$ limon pour la bauge ; 50 $g.kg^{-1}$ argile pour le pisé ou la bauge, etc.), ce qui fait qu'il n'est pas visible dans la représentation groupée par intervalles de 50 $g.kg^{-1}$ et résulte en une tendance visiblement croissante. D'autre part les optimums sont difficiles à valider pour si peu de données, car ils peuvent être liés à « l'effet de bord » décrit en 4.3.2 . De plus, on n'observe souvent qu'une petite partie de la distribution granulaire possible des sols à l'échelle d'une région. Peut-être est-il nécessaire d'agréger les résultats à l'échelle du territoire hexagonal entier afin de voir une tendance globale se dégager.

Finalement, la faiblesse des corrélations observées témoigne peut-être d'une absence de corrélation forte entre les propriétés pédologiques sous-jacentes aux bâtiments et les choix techniques. On a décrit l'intensité de l'impact de nombreuses autres variables du contexte constructif sur les choix techniques (Chapitre 3A, 3.2). Notre analyse est une recherche directe d'un déterminisme environnemental sur les choix techniques, qui pourtant ne peuvent être réduits à celui-ci. Ce n'est qu'à travers des enquêtes socio-historiques qualitatives des contextes spécifiques régionaux que nous pourrions esquisser l'importance relative de l'ensemble de ces facteurs.

5.2.2 Densité relative entre techniques de terre crue

Dans la partie 5.2.1 , chacune des analyses a été réalisée en comparant les densités de chacune des techniques-type de terre relativement à l'ensemble des bâtiments. Mais cela nous renseigne peu sur la relation des techniques-types de terres *entre elles*. Désormais, nous comparons la distribution de quatre techniques-type de terre relativement à l'ensemble des données *terre*. Le torchis est joint au pisé, à la bauge et à l'adobe, dans une analyse sous l'angle de la compétition entre les techniques-type au sein des cultures constructives.

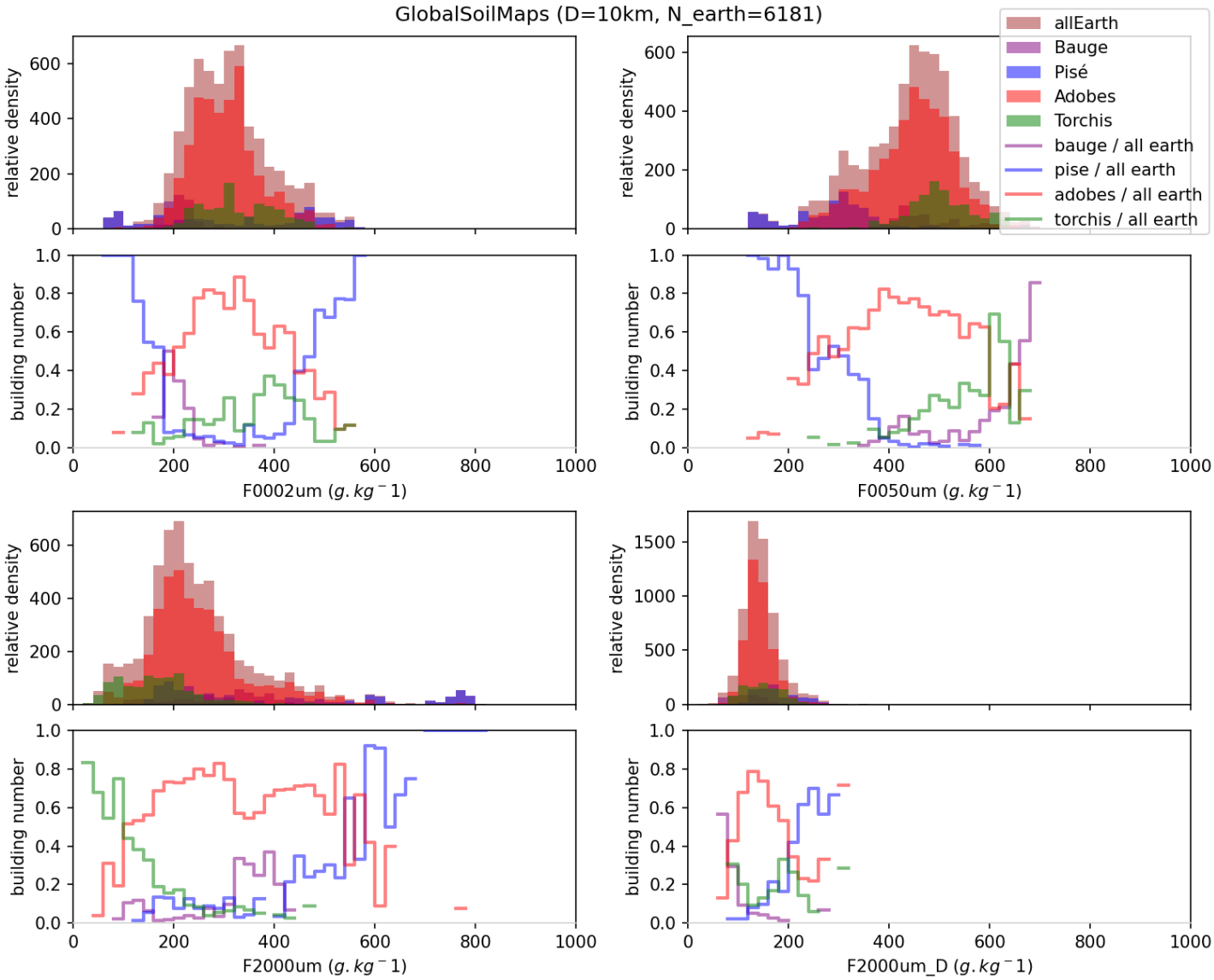


Figure 100 : Occurrence des bâtiments en chacune des techniques-types et de l'ensemble des bâtiments en terre repérés dans les transects (allEarth) (graphiques supérieurs) ; et densités de bâtiments en chacune des techniques-types relativement à l'ensemble des bâtiments en terre (graphiques inférieurs); selon la distribution des variables pédologiques des sols sous-jacents de la base de données GlobalSoilMaps.

Après traitement, l'ensemble des données de transects totalise 6181 points-bâtiments en adobes, bauge, pisé et torchis.

5.2.2.1 F2µm et CEC : influence des argiles et pisé argileux

La distribution relative de chacune des techniques-types relativement à l'ensemble des techniques de terre crue pour la fraction granulométrique « argiles » présente un tri relativement clair entre les techniques-types, sur les deux sources de données (Figure 100 et 101). Il y a avec l'augmentation du passant à 2µm, une suite de dominance des techniques : le pisé et la bauge pour les faibles teneurs, puis les adobes, puis progressivement les torchis. Enfin, pour GSM la densité relative de pisé repart clairement à la hausse, ce qui est moins évident sur vecteur-STU. Par ailleurs, GSM montre une légère

différence entre le pisé et la bauge pour des teneurs en F2µm autour de 200g.kg^{-1} : en deçà, c'est le pisé qui est le plus favorisé, au-delà c'est la bauge, puis l'adobe prend le dessus sur les deux techniques.

L'enchaînement pisé-bauge-adobe-torchis pour le passant à 2µm est conforme à ce qui est attendu des choix préférentiels de techniques de terre crue si l'on considère que ce passant représente approximativement la teneur en minéraux argileux (Annexe I, 2.2.3.2.1) :

- le pisé bénéficie de la densité liée à la compaction et s'accorde aux sols peu cohésifs ;

- la bauge peut accepter des sols un peu cohésifs car sa plus forte teneur en eau et l'ajout de paille permet de faciliter leur homogénéisation (CCTC 2018).

- dans les deux cas, de fortes teneurs en argiles minéralogiques pourraient être défavorables à ces techniques massives qui ne présentent pas de liberté de retrait au séchage (Chapitre 2, 5.2.4.2), et qui dans le contexte vernaculaire préindustriel n'étaient pas (pisé) ou peu (bauge) fibrées (Chapitre 3A, 3.4.4).

- Les briques d'adobes sont favorables aux sols cohésifs relativement aux autres techniques car elles autoriseraient le retrait libre au séchage par leurs petites dimensions, qui a l'avantage de permettre de plus grandes teneurs en eau, facilitant le mélange (Chapitre 2, 6.1) tout en gardant des densités convenables (Chapitre 2, 5.2.4.2).

Précisons cependant que l'enchaînement de densités relatives (graphiques inférieurs) ne représente pas un *remplacement* en occurrence absolue des techniques-types (graphiques supérieurs). Par exemple, l'occurrence du pisé est relativement stable sur les plages de valeurs de l'étude, et sa variation de densité relative selon F2µm est en fait liée à la croissance de l'occurrence de l'adobe et du torchis.

La présence de torchis à l'extrémité intense en F2µm est peut-être liée au fait que plus les terres sont cohésives, plus le modelage et le tressage des torches est facilité. Une hypothèse thermicienne serait que plus la terre est cohésive, plus le fibrage de la matière peut être conséquent et le matériau allégé, réduisant les contraintes structurelles et améliorant l'isolation thermique ; mais cette analyse est probablement plus proche des cultures constructives contemporaines que pré-industrielles. Il est possible qu'il existe un biais de contexte urbain-rural liés à cette technique : peut-être que les villes sont installées préférentiellement dans les zones les plus argileuses, et que le torchis s'en voit favorisé du fait de son usage urbain prépondérant (Chapitre 2, 3.5.7.1)? Cependant la bonne distribution du torchis sur l'ensemble des transects, et sa présence en dehors des villes laisse penser que cette influence est mineure et ne peut expliquer une telle corrélation.

La tendance observée pour la CEC est la même que pour F2µm, a l'exception du pisé dont la présence intense aux fortes fractions F2µm pour GSM comme vecteur-STU (Figure 100 et 101) est peut-être confirmée par sa prédominance également pour de fortes CEC (>400µm). On retrouve ainsi à l'échelle nationale dans les relations relatives entre techniques l'observation faite pour le pisé en Limagne (5.2.1.5). La présence de pisé dans des sols très actifs est surprenante, et contradictoire avec les recommandations de la littérature à ce sujet qui limitent généralement les sols adéquats pour construire en pisé à F2µm < 200g.kg^{-1}. La CEC serait un bon indicateur de l'activité globale des minéraux argileux du sol, donc soit de leur teneur soit de leur surface spécifique/potentiel électronique/potentiel de gonflement (Annexe I, 2.2.4.3). De faibles CEC seraient défavorables au pisé car cela démontrerait un manque de cohésion, mais de fortes CEC le seraient aussi par une trop forte cohésion rendant difficile la compaction et/ou indiquant des argiles gonflantes favorables à la fissuration. Alors, pourquoi une telle densité bâtie en pisé ?

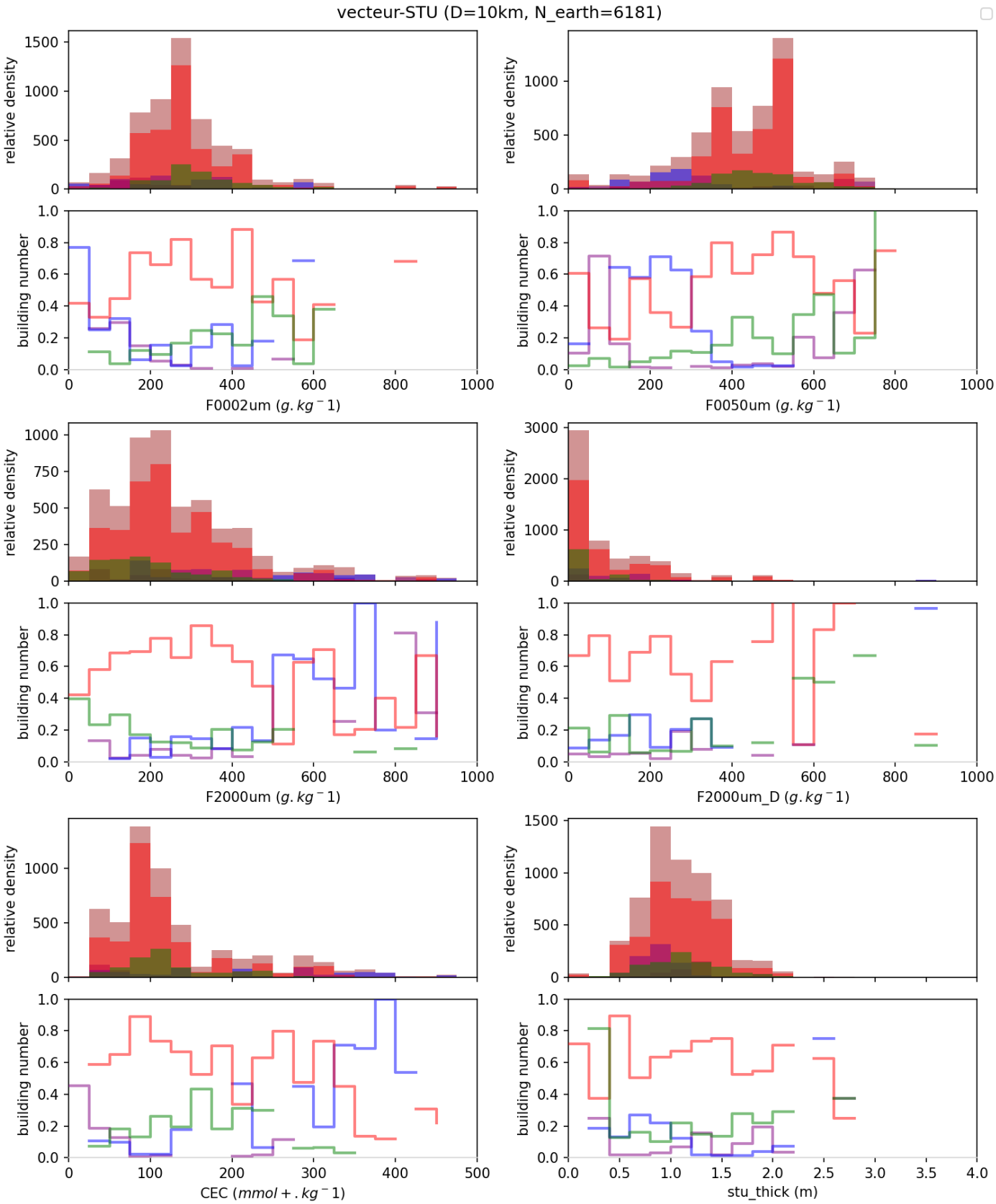


Figure 101 : Occurrence des bâtiments en chacune des techniques-types et de l'ensemble des bâtiments en terre repérés dans les transects (allEarth) (graphiques supérieurs) ; et densités de bâtiments en chacune des techniques-types relativement à l'ensemble des bâtiments en terre (graphiques inférieurs); selon la distribution des variables pédologiques des sols sous-jacents de la base de données vecteur-STU.

Une observation cartographique nous permet de localiser ce groupe de bâtiments en pisé associés à de fortes CEC et teneurs en F2µm (Figure 102). Il s'agit du cœur de la plaine de la Limagne, dans les « marais » (Cannat 2022:61). Des transects y ont été réalisés dans une zone particulièrement dense en bâtiments composés de pisé, mais également d'adobes et plus occasionnellement de bauge. Dans cette zone, les sols aux fortes CEC (surfaces rouges foncé sur la Figure 102) sont des sols développés dans des sédiments limoneux et argileux. Les teneurs en argile y approchent les 50 % en proportions massiques de texture selon les données GlobalSoilMaps, 40 % selon les données vecteur-SMU, mais nous avons vu qu'elles avaient pour biais de « moyenner » les données de texture (4.3.2). Dans cette zone, nous avons par ailleurs observé des bâtiments composés de morceaux de pisé « de réemploi » maçonnés à la chaux : une caractéristique peut-être permise par une forte cohésion interne des blocs ?

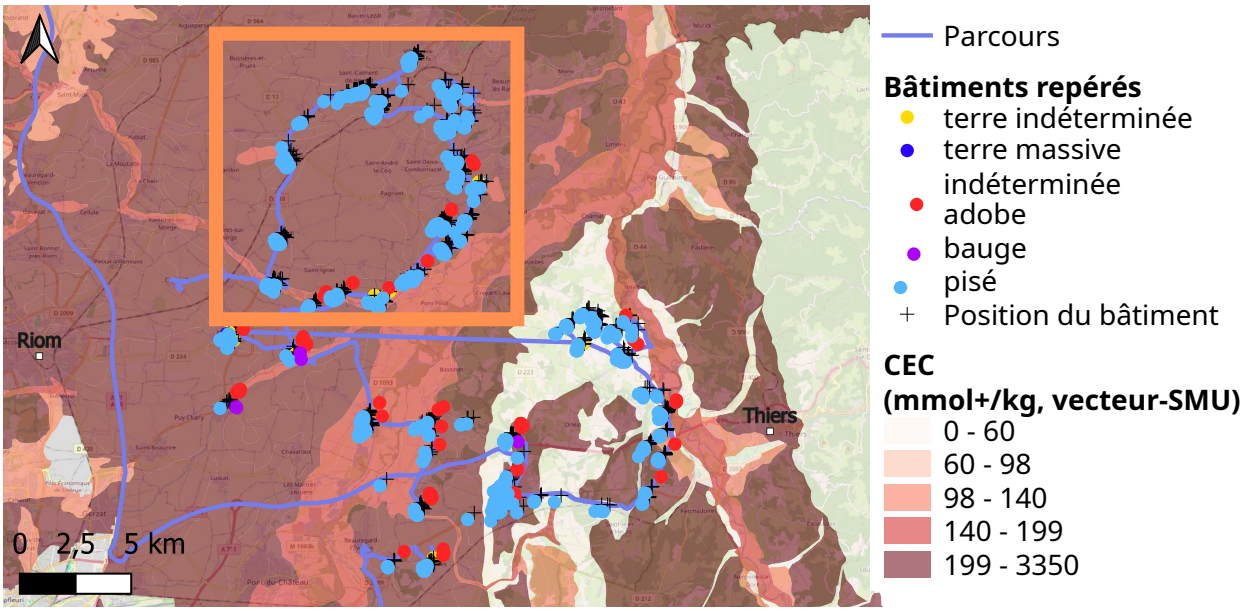


Figure 102: Localisation des bâtiments en pisé à CEC >400mmol+.kg^{-1} et F2µm > 400g.kg^{-1}. (encadré orange). La légende indique les valeurs de la source de données vecteur-SMU, les valeurs étant moyennées, elles sont un peu plus faibles que vecteur-STU.

Pourquoi est-ce que le pisé domine dans une zone aux sols si fins, *a priori* peu adaptés à la compaction ? La technique de l'adobe (points rouges), que l'on suppose plus adaptée, est pourtant connue et mise en œuvre dans le même secteur et même très souvent de manière contemporaine (Cannat 2022:94), ainsi que la technique de la bauge (points violets), ce qui indique qu'il ne s'agit pas d'un choix « par défaut d'alternatives ». Peut-être que des stratégies d'adaptation ont pu être mises en place localement : mise en œuvre plus *plastique*, trumeaux alternés (Chapitre 2, 5.2.4.2), adjonction de sable ou de graviers, etc. Des sédiments plus grossiers auraient pu être transportés depuis la vallée de l'Allier (correspondant à la veine de la SMU rouges-oranges dans l'axe nord-sud) ou l'un de ses affluents. Une analyse visuelle plus fine des éléments de pisé de ces bâtiments, ainsi qu'une analyse granulométrique pourrait valider la composition des bâtiments et déceler d'éventuels adjuvantations.

Dans l'ensemble, la distribution par « pics » des occurrences de bâtiments en pisé nous questionne et une analyse géographique et historique multi-factorielle pourrait permettre de comprendre d'éventuels artefacts liés à d'autres paramètres du contexte constructif historique ou contemporain, comme l'influence d'une zone urbaine ou un pédopaysage alluvial mal échantillonné par les études pédologiques.

5.2.2.2 F2000µm : des choix préférentiels liés à l'absence de cohésion ?

Les deux sources de données GSM et vecteur-STU sont en accord sur les tendances de densité relative de chacune des techniques-types. Avec l'augmentation de la teneur en sable, la densité relative est croissante pour la bauge et le pisé. Dans les sols les plus sableux, au delà de 600g.kg^{-1} il n'y a d'ailleurs presque plus que du pisé sur les résultats GSM (Figure 100); la tendance est plus nuancée pour vecteur-STU qui montre une présence conséquente d'échantillons d'adobes (Figure 101).

Si l'on considère la présence d'adobes aux fortes teneurs en sable pour vecteur-STU comme liée à l'aléa du choix de la STU dans la SMU, cela serait en accord avec la suggestion de Gomes et al. (2014) (ne s'appuyant cependant sur aucune référence) que le pisé apparaîtrait lorsque la teneur en argiles serait trop faible pour faire des adobes. Cependant Wolfskill et al. (1970) indiquaient qu'un sol « bon pour le pisé » serait également « bon pour les briques comprimées ou les adobes ». Ici, on observe que les constructeur.ices vernaculaires semblent en effet avoir préféré le pisé ou la bauge pour les fortes teneurs en sable, mais ont pu parfois avoir recours à d'autres techniques comme les adobes.

Finalement, les sols sableux sont probablement employables pour les deux techniques-types, mais c'est les « pertinences de mise en œuvre » de chacune qui évoluent différemment selon la fraction sableuse :

- celle du pisé serait augmentée pour les sols sableux en facilitant l'étape de compaction;

- celle des adobes évolue de manière incertaine, peut-être réduite en réduisant leur résistance en traction nécessaire à leur manipulation mais peut-être facilitée par une plus grande aisance dans l'homogénéisation.

A l'inverse, le torchis est prédominant et croît fortement avec la baisse de teneur en sable pour les teneurs inférieures à 200g.kg^{-1}. Les techniques de torchis, très fibrées, ne nécessitent pas un équilibre granulaire car les fibres structurent le mélange et réduisent l'effet du retrait. Pour l'adobe, on peut interpréter la courbe comme relativement constante entre 200 et 600 g.kg^{-1}. En deçà et au-delà, la prédominance des autres techniques fait décroître la densité relative en adobes.

Finalement, cette distribution est exactement l'inverse de celle du passant F2µm. On voit même la petite prédominance de la bauge sur le pisé autour de 400g.kg^{-1} pour GSM, comme celle à 200g.kg^{-1} pour F2µm, que l'on avait interprété comme témoignant de la position intermédiaire de la bauge entre le pisé et les adobes. En revanche, il n'y a pas là de recrudescence du pisé aux teneurs en sable proches de 0 comme c'est le cas pour les fortes teneurs en F2µm. L'ensemble de la densité y est alors attribuée aux torchis.

Cette distribution relative est relativement conforme à nos attentes pour le pisé et la bauge. En effet, la teneur en sable est généralement décrite comme structurante et réduisant le retrait pour les techniques massives. En revanche, il était moins attendu que la teneur en sable soit aussi favorisante pour la bauge que pour le pisé, ce dernier étant souvent indiqué comme plus favorable aux sols grossiers.

5.2.2.3 F50µm : le limon, déterminant pour la bauge

Les tendances relatives à cette propriété sont semblables à celles observées pour F2µm. A l'exception cependant que la densité relative de bauge est cette fois très importante aux fortes fractions limoneuses (F50µm), à l'inverse du pisé dont la densité relative est plus forte aux faibles teneurs en limons. On note cependant que la composition des sols plus favorables au pisé s'étend jusqu'à 400g.kg^{-1} de limon, mais au-delà le pisé est presque absent, à la fois en occurrence et en densité relative. Le fait que la distribution soit relativement symétrique entre F2µm et F2000µm n'est pas

étonnant puisque les passants granulométriques sont définis en valeurs relatives les uns aux autres. En revanche, la fraction F50µm est la seule de la fraction fine* pour laquelle la dynamique du pisé et de la bauge sont différentes.

On remarque la présence de bauge également dans des sols très peu limoneux (<200g.kg^{-1}) pour vecteur-STU (Figure 101), fait également remarqué dans l'analyse régionale de la bauge en Champagne-Ardenne (Figure 90). Par une requête spatiale, on localise ces bâtiments dans des SMU à sol très grossiers au sud-est de la Seine-Et-Marne en limite avec l'Aube, une zone jusqu'à récemment non référencée comme bâtie en bauge dans les cartes du patrimoine existantes (Aras-Gaudry et al. 2023). Une analyse cartographique détaillée montre que tous les bâtiments concernés sont situés sur une même SMU du RRP de Seine-Et-Marne. Celle ci est décrite comme « Moyenne terrasse forestière » et composée de trois STU : Calcosols caillouteux sableux de sable holocène (72,1%), Calcisols sableux caillouteux de sable stampien sur dalle calcaire (15,4%), Calcisols épais de sable stampien (12,5%) ». Ces trois STU dont la teneur en sable la plus basse est de 660g.kg^{-1} expliquent la faible teneur en limons locale qui a été extraite au niveau des points-bâtiments.

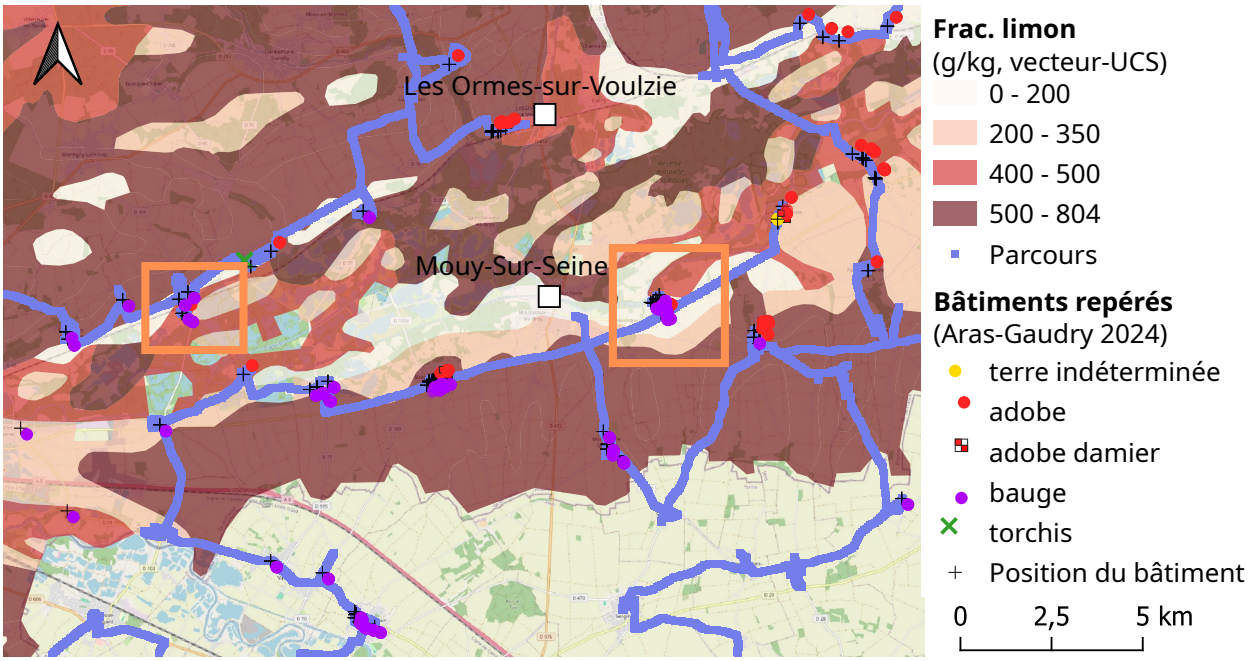


Figure 103 : Localisation des bâtiments en bauge à F50µm <200 mmol+.kg^{-1} (deux encadrés orange).

Cependant, dans les deux zones de bâtiments en bauge concernées, on note la proximité d'au moins une autre SMU aux teneurs en limons moyennes bien plus élevées à moins de 500m. L'analyse de la SMU en forme de péninsule la plus proche des bâtiments du groupe de l'est montre une composition bien plus « conventionnelle » : ce sont des fluviosols issus d'alluvions limono-argilo-sableux ou argileux, calcaires ou calciques, aux compositions granulométriques bien plus « équilibrées ». Par ailleurs, ces sols sont situés en amont dans la topographie, favorisant potentiellement le transport de la terre (Chapitre 3A, 7.1). Peut être que ce sont ces sols qui ont été employés pour construire les bâtiments apparaissant comme « exceptionnellement sableux ».

Ainsi, les bâtiments en bauge à « faible teneur en limons » sont peut-être un exemple de la variabilité apportée par la méthodes de croisement de données :

- l'incertitude sur l'emploi du sol sous-jacent au bâtiment serait remarquable ici, le matériau aurait pu être transporté sur quelques centaines de mètres;

- la qualité des données pédologiques est à questionner : la péninsule de fluviosols se prolonge peut-être en réalité jusqu'à la zone de bauge.

Difficile de conclure sur ces hypothèses car la représentation vecteur-SMU des RRPs ne semble pas adaptée à une analyse à cette échelle spatiale. L'hypothèse simple de l'emploi de sols pauvres en limons n'est pas non plus à exclure et nécessiterait une observation plus détaillée de la composition des éléments de ces bâtiments, mais elle serait surprenante au vu des conclusions précédentes et de l'emploi conséquent de la bauge dans la zone, principalement sur des sols plus limoneux.

5.2.2.4 F2000µm_D et profondeur

Comme observé précédemment pour l'analyse technique par technique à l'échelle régionale, cette propriété présente une clarté de lecture particulière pour GSM (Figure 100) tandis que vecteur-STU est plus variable et étalée (Figure 101). Si l'on considère les analyses GSM comme valables, alors on peut considérer que la teneur en éléments grossiers est clairement favorable au pisé parmi les techniques de terre crue, et défavorable à la bauge; mais difficile de faire confiance à cette propriété pédologique pour la source de données GSM qui ne prédirait pas bien la variabilité de la pierrosité des sols (Chapitre 3A, 4.2.4). L'adobe et les torchis présentant ici encore une position intermédiaire, avec le torchis qui serait plus favorable pour les sols contenant plus d'éléments grossiers. Les densités relatives de pisé baissent cependant avec la profondeur du sol (stu_thick), ce qui appuie l'observation sur la corrélation du pisé avec la présence d'éléments grossiers puisque ces deux propriétés sont fortement corrélées négativement (Annexe I, 1.1.2) : plus les sols sont profonds, moins ils contiennent d'éléments grossiers à la profondeur de -45cm où les données pédologiques sont extraites.

Que des sols grossiers soient favorables au pisé relativement aux autres techniques n'est pas étonnant et correspond aux attentes relativement à cette propriété, car la technique est indiquée comme acceptant des éléments jusqu'à des tailles de 10cm (Maniatidis & Walker 2003). En cas de présence de plus gros éléments gênants, ils sont facilement retirés (Houben & Guillaud 1994; Maniatidis & Walker 2003). En revanche, c'est plus étonnant pour la bauge : les éléments grossiers sont considérés comme pouvant poser problème dans le cadre du tranchage, ou éventuellement du mélange, mais cette variable ne devait pas être limitante d'après les constructeur.ices contemporain.es (CCTC 2018; «Marcom» 2022). Similairement aux réflexions sur la teneur en limons pour la bauge Bretonne (4.3.3), deux autres propositions alternatives à l'influence du procédé lui-même pourraient expliquer cette tendance :

- la bauge est favorisée par la teneur en limons, qui serait corrélée à une grande profondeur des sols, elle-même corrélée à une plus faible teneur en éléments grossiers, comme c'est le cas en présence d'une couverture épaisse de limons éoliens ;

- le pisé serait compétitif avec la pierre dans les choix préférentiel liés à la représentation* des matériaux, tandis que la bauge serait, elle, dévalorisée (Chapitre 3A, 3.5.5). Dans les sols pierreux et/ou peu profonds, favorables à la pierre, la bauge ne se serait pas développée tandis que ce fut possible pour le pisé, et finalement dans une relation *relative* entre les deux techniques c'est le pisé qui apparaîtrait aujourd'hui favorisé en milieu pierreux.

Il est surprenant également de voir que les techniques-types de torchis et d'adobes sont peu affectées par les fortes teneurs en EG, présentant des occurrences quantitatives et relatives significatives même au-delà de 200g.kg^{-1} alors que la bauge n'est presque plus représentée. Pourtant, dans le cas de l'adobe les éléments grossiers de grande taille (de l'échelle de taille du moule) sont parfois indiqués comme non adaptés au moulage de petits éléments (Vitruve 8015 BC, dans (Pagliolico et al. 2010)) car ils fragiliseraient les briques (Klein 2011).

Pour les blocs de terre comprimée, Norton (1986) conseillent de tamiser les éléments de taille supérieure à 5-6mm, et Wolfskill et al. (1970) conseillent de retirer les éléments de taille supérieure à 3,8cm (1,5 inch) manuellement, puis de tamiser la terre à environ 1cm. Mais dans ce cas, c'est peut-être plutôt un procédé visant à éviter les gros agrégats pour l'homogénéité des éléments fabriqués à l'état humide plutôt que pour éliminer tout élément supérieur à cette taille ; un critère moins important pour les adobes car les agrégats sont rompus dans la fabrication à l'état plastique ou visqueux.

Cependant, c'est surtout la taille des plus gros éléments grossiers qui importe, dont les dimensions sont de l'ordre de grandeur de celles des moules et on peut aisément accepter des éléments de taille supérieure à 15mm pour certaines briques (Collectif des Terreux Armoricains 2022c); or les éléments grossiers (F2000µm_D) sont ici tous les éléments supérieurs à 2mm ce qui veut dire qu'une forte fraction F2000µm_D n'est pas forcément gênante. Par ailleurs, Aras-Gaudry (2025) identifie des carreaux de terre composés d'éléments calcaires traversant les briques dans leur épaisseur : la variable n'est pas limitante, mais pourrait être défavorisante en ajoutant de la pénibilité de façonnage ou un effort de tamisage. En l'absence de détails sur la fraction grossière, difficile de conclure, mais DoneSol3 présente des informations décrivant la taille et forme des éléments grossiers, ce qui pourrait éclaircir ces résultats.

Dans le cas des torchis tressés les éléments grossiers sont considérés comme gênant la mise en œuvre (CCTC 2018). Comme pour l'adobe, ce n'est pas limitant mais seulement défavorisant. La fraction grossière peut être plus aisément traitée par tamisage que les autres fractions.

Finalement, si la présence d'éléments grossiers ne semble pas une variable très limitante à l'emploi de l'adobe ou du torchis, elle peut participer à la pénibilité d'un procédé en nécessitant un tri ou tamisage : déjà pénible en contexte contemporain, il n'était peut-être même pas envisageable en contexte pré-industriel du fait de l'accès à des outils de tamisage adéquats.

Cependant, ici encore l'explication se situe peut-être dans le contexte constructif. Ces deux techniques sont favorables au transport de la matière : le torchis par la faible quantité de terre nécessaire ; les adobes par la facilitation du transport et de la commercialisation des briques (Chapitre 3A, 3.4.7.2). De ce fait, dans les sols très pierreux, on a pu construire en adobes ou en torchis avec des terres transportées depuis d'autres sols. Pour clarifier cette relation, il serait intéressant de procéder à des analyse d'échantillons de terre, et/ou d'une comparaison semblable à celle réalisée pour le pisé (Figure 102) et la bauge (Figure 103) afin de mieux comprendre l'incertitude liée à la différence entre la terre employée et la terre sous-jacente au bâtiment (Chapitre 3A, 7.1).

5.2.2.5 P80µm

La propriété F50µm discrimine bien les techniques de pisé et de bauge. La propriété F2µm les discrimine un peu si l'on considère comme représentatif le pic de pisé pour F2µm > 400g.kg^{-1}. L'emploi du passant total à 50µm (P50µm) ou à 80µm (P80µm) peut permettre de résumer cette tendance. Par ailleurs, P80µm est une variable couramment employée en génie civil, ainsi Rojat et al. (2020) proposent d'utiliser cette variable et la VBS comme indicateur préalable du potentiels des sols pour construire. P80µm est donc calculé à partir d'une interpolation log-linéaire (Chapitre 3A, 6.2.1) entre P50µm et P2000µm. Il est représenté sur la Figure 104 pour les deux bases de données. On voit que finalement, la décorrélation entre pisé et bauge n'est pas si claire. Pour vecteur-STU, on ne voit même plus vraiment de tendance pour la bauge, et celle du torchis est même moins claire que pour les F2µm et F50µm séparément. Peut-être est-ce lié à l'influence de P2000µm dans le calcul, qui pour ces deux techniques a une influence inverse et qui dans le cas de P80µm réduit son influence. Pour la bauge, son absence en deçà de 500g.kg^{-1} ne permet pas vraiment de conclure.

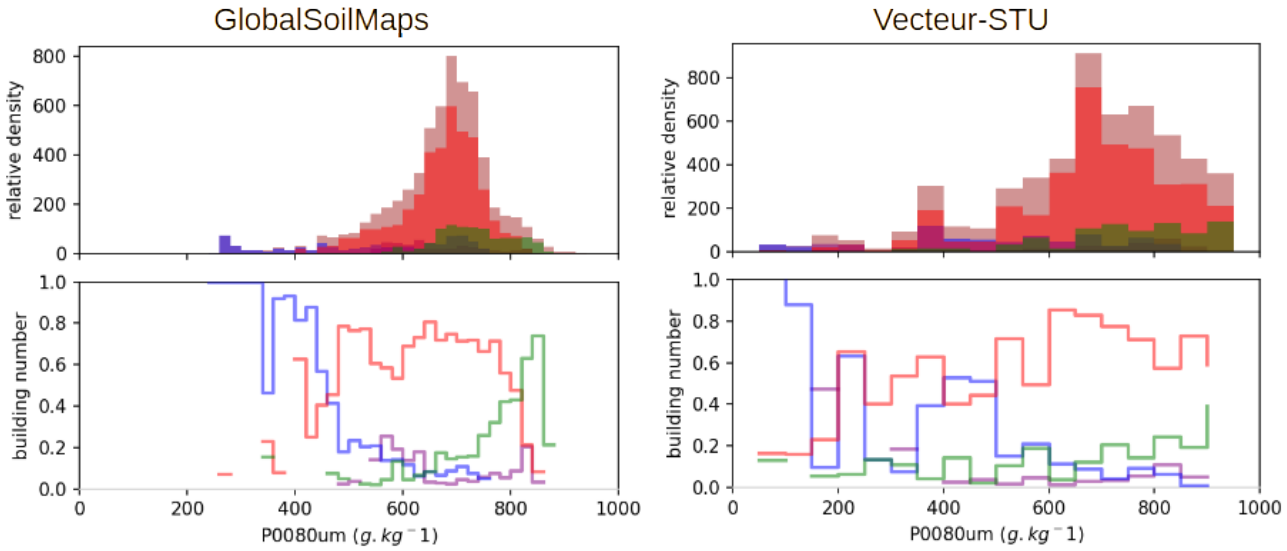


Figure 104 : Densité relative des techniques-types de construction en terre crue pour le passant à 80µm.

Finalement, P80µm ne semble pas ici apporter plus de discernement que la fraction F2000µm. C'est peut-être lié au fait qu'il est calculé par interpolation ; dans une mesure réelle de ce passant on obtiendrait peut-être d'autres résultats.

5.2.2.6 Proximité à la distribution de Fuller

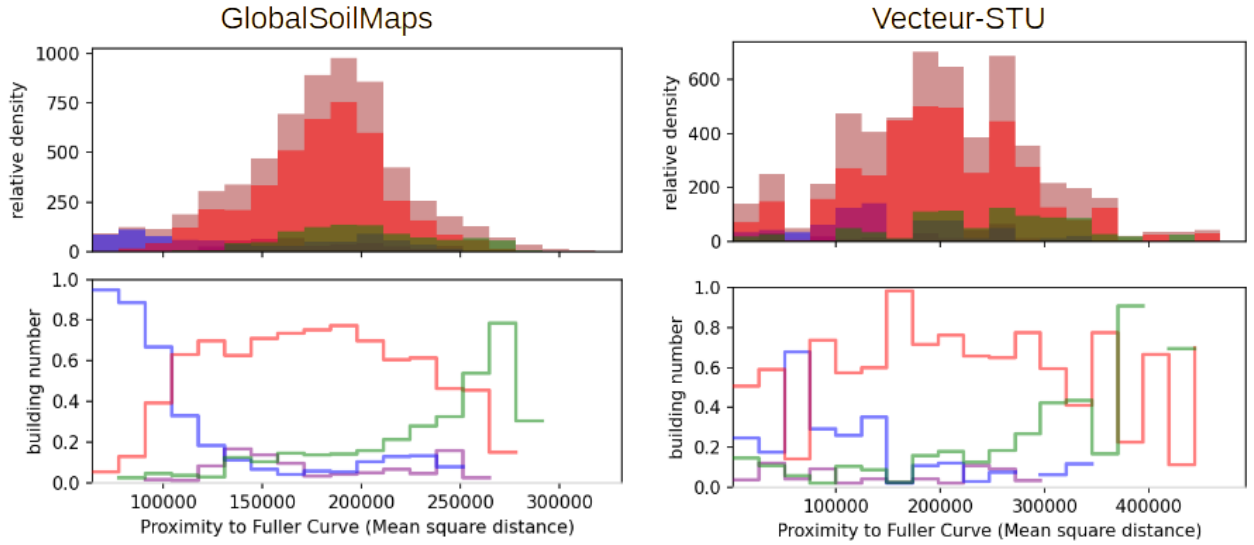


Figure 105 : Densité relative des techniques-types de construction en terre crue relativement au coefficient de proximité à la courbe de Fuller

Dans les représentations de densités de pisé relativement aux autres techniques de terre crue, on observe globalement que la zone où le pisé devient majoritaire correspond à des teneurs croissantes avec le passant granulométrique considéré : environ 200g.kg^{-1} et moins pour F2µm, 400g.kg^{-1} et moins pour F50µm, 400g.kg^{-1} et plus pour F2000µm, et environ 100g.kg^{-1} et plus pour F2000µm_D (ce qui est conséquent pour une teneur en éléments grossiers). Cela nous rappelle les suggestions de la littérature du besoin d'une distribution granulométrique « équilibrée », sensée favoriser un empilement granulaire adéquat et ainsi maximiser la compacité atteignable dans la matrice

compactée (Cuccurullo et al. 2021) (Chapitre 1, 1.1). Il ne semble pas y avoir de vrai consensus sur ce qui représente réellement une courbe granulaire « bien distribuée » (Annexe I, 3.2.3.3). Cependant, pour les mélanges de bétons de ciment la « courbe de Fuller » est une distribution granulaire « type » sensée représenter un mélange granulaire équilibré. Cette représentation n'est donc probablement pas une vraie courbe d'idéal de compaction, qui dépend de la minéralogie, de la forme des grains, de l'énergie de compaction, etc ; mais elle a le mérite d'exister et nous l'emploierons ici. Un coefficient de proximité à la courbe de Fuller est calculé à partir des 4 passants granulométriques connus, en sommant le carré de la distance de chaque passant à la courbe de Fuller (Chapitre 3A, 6.2.2). La densité relative des 4 techniques-types est représentée selon ce coefficient dans la Figure 105. On observe que ce coefficient est discriminant entre les techniques-types. Le pisé se démarque par une plus grande proximité à la courbe de Fuller relativement aux autres techniques, avec une somme des moindres carrés plus faible en moyenne. Il ne semble pas y avoir de vraie distribution préférentielle pour la bauge et l'adobe ; en revanche le torchis semble être caractérisé par un éloignement conséquent à la distribution de fuller. Peut-être est-ce par sa prédominance sur des sols limoneux et argileux, dans des courbes de distribution très « serrées » dans des distributions de sols fins. Finalement, cette distribution n'est pas plus discriminante que le passant P80µm ou la fraction F2000µm, mais les résultats sont cohérents avec les observations précédentes, ce qui n'est pas surprenant puisqu'ils sont composés des mêmes données.

En admettant que la distribution de Fuller la représente bien, la « distribution granulaire » ne serait pas une variable significative pour les techniques d'adobes et de torchis. Contrairement aux techniques compactées comme le pisé ou les briques de terre comprimées, la résistance des adobes et des torchis s'acquiert par homogénéisation et distribution des argiles dans la matrice – ce qui peut éventuellement participer à l'augmentation de la compacité par retrait au séchage (Chapitre 2, 5.2.4.2) – et non par augmentation *active* de la compacité pour laquelle la distribution granulaire serait un élément central. La bauge aurait une position intermédiaire dans ces processus, certains procédés plus secs bénéficiant d'une forme de compactage en cours d'homogénéisation par poinçonnement ou au placement des mottes.

Pour les techniques *plastiques* et plus hydratées donc, une approche du choix technique par « fuseaux granulométriques » apparaît peu pertinente.

5.2.2.7 Occurrence de la terre selon les variables pédologiques

Nous avons essentiellement considéré l'analyse des relations réciproques entre les techniques de terre crue. Mais il est important de relever que l'intensité absolue de l'occurrence de l'ensemble des techniques de terre crue est également intéressante. Pour toutes les propriétés pédologiques étudiées, les données sont globalement regroupées dans une courbe en cloche. Au « pic » de densité bâtie en terre toutes techniques confondues, observé par exemple pour F2µm à 300g.kg^{-1} (Figures 100 et 101), on retrouve systématiquement toutes les techniques-types de construction représentées, et souvent en nombre non négligeable. Ainsi, cette analyse confirme l'hypothèse selon laquelle il existe des terres avec lesquelles on peut construire via « toutes » les techniques-types de construction en terre crue.

Cela explique les chevauchements géographiques des zones de distribution du patrimoine bâti en terre, et que dans certaines zones de nos expéditions cartographiques nous ayons parfois rencontré les quatre techniques types dans une même rue, parfois trois dans un même édifice (Contexte, 2.3.5). Une poursuite de l'analyse nous informerait sur la raison de la forme de cette courbe en cloche : peut-être est-elle limitée parce que les terres au-delà sont peu convenables ; mais il est également probable que les sols des régions d'études n'y soient pas représentés : l'observation des occurrences directes, sans comparaison à la distribution bâtie globale (p. ex. OSM), est sujette à de nombreux biais. Surtout,

il nous semble que le pic de convenance globale correspond assez bien avec le pic de distribution des sols rencontrés dans les différentes régions, ce qui veut dire que les propriétés des sols les plus communément rencontrés, « équilibrés », permettent d'envisager de construire avec toutes les techniques-type.

5.2.2.8 Méthode : analyse de la densité relative terre crue

Les graphiques de densité relatives inter-techniques issues des données de transects sont assez clairs et discriminants entre les techniques-types, bien plus que les graphiques de densités relatives aux données OSM ou Aléatoires séparés par régions. Deux raisons peuvent expliquer ce changement :

- l'augmentation du nombre d'échantillons en rassemblant les régions dans une même analyse, ce qui réduit la variabilité au sein de chaque intervalle et homogénéise la distribution sur l'ensemble des intervalles en réduisant les biais d'installation préférentielle locaux ;

- l'effet de la densité relative est calculée selon l'ensemble des bâtiments en terre et non selon les points aléatoires ou OpenStreetMap. Cette représentation a pour avantage de normaliser l'ensemble des biais extérieurs aux choix techniques de terre crue : les données « terre » font office de données de densité « Vernaculaires », ce qui est finalement peut-être plus pertinent que les données OSM.

A la lecture des résultats, on est tentés d'interpréter la densité relative comme un guide de pertinence de choix techniques : la courbe « dominante » sur chaque intervalle serait la technique « la plus adaptée » aux propriétés de la terre. Cependant, il ne faut pas oublier que si *l'évolution* relative de la densité des techniques représente probablement correctement les potentiels constructifs, l'*intensité* elle est probablement encore plus sujette aux biais. Par exemple, la destruction du patrimoine bâti en terre crue a pu impacter préférentiellement certaines techniques dont la culture constructive correspond à des périodes plus anciennes. C'est peut-être le cas de la bauge en Occitanie. L'évolution de la densité relative en bauge selon les types de sols est donc peut-être un bon témoignage de l'adéquation de cette technique, mais l'occurrence absolue relativement aux autres techniques a pu être bien plus importante que ce que nous laissent voir les bâtiments présents aujourd'hui. Connaître la datation des bâtiments analysés permettrait de séparer différentes époques d'analyse. On pourrait alors plus aisément séparer les contextes spatio-temporels et donc socio-culturels, au sein desquels des quantifications de préférences techniques seraient plus aisément interprétables.

On peut voir deux autres limites dans ces résultats :

- il peut y avoir une prédominance de l'influence régionale sur l'influence relative : si l'ensemble des données de bauge sont dans les sols limoneux des transect « Ouest » (5.2.1.1), peut être n'est-ce pas qu'une question de terre mais une question d'absence des autres techniques pour d'autres raisons (connaissance, climat…). Les sols limoneux apparaissant favorables à la bauge, par corrélation indirecte avec d'autres variables environnementales régionales. Pour réduire ce biais, il faudrait analyser uniquement les zones où les quatre techniques-types sont effectivement pratiquées. Cela réduirait probablement significativement le jeu de données à une fraction des transects Limagne et Occitanie.

- les techniques-types d'adobes sont majoritaires dans nos relevés. De ce fait, la densité relative des autres techniques-types est fortement influencée par la convenance des procédés les techniques d'adobes. Comprendre les choix préférentiels entre les techniques bénéficierait peut-être d'une analyse détaillée des liens de chacune des techniques entre elles : relation pisé-bauge, bauge-adobes, en résonance avec nos propositions théoriques au Chapitre 3A, 3.5.7.2 .

Plus simplement, peut-être aurait-il fallu artificiellement équilibrer le nombre d'échantillons de chaque technique-type, éventuellement par région d'étude, afin de montrer leurs potentiels relatifs en dehors

de leur intensité propre sur les territoires rencontrés. Mais nous avons préféré éviter un surplus de transformations des données, dont les impacts deviennent, à force, une barrière à l'interprétation aisée des résultats.

5.2.3 Diagramme ternaire par technique-type

La représentation sous forme de diagramme ternaire permet de résumer la distribution des densités relatives des trois composantes de texture (F2µm, F50µm et F2000µm) en un seul graphique. L'organisation de cette représentation a été décrite en 3.3.2 . Réalisée à posteriori de la rédaction de ce chapitre, elles sont ajoutées ici à titre informatif, et permettront de résumer les observation précédentes relatives à l'influence de la texture du sol sur les choix techniques.

5.2.3.1 Bauge : résultats, et comparaison aux données du Service du Patrimoine

La densité relative présente, sans surprises, la tendance croissante observée pour F50µm en Bretagne et en Occitanie. On retrouve, pour vecteur-STU, les bâtiments reposant sur des sols sableux (F50µm < 200g.kg^{-1}) identifiés en Champagne-Ardenne (5.2.1.3), dont l'on a supposé qu'il s'agissait d'un artefact lié aux données pédologiques et/ou au transport du matériau (5.2.2.3).

Pour GSM, des classes de textures à 0 bâtiments sont présentes pour F2µm < 150g.kg^{-1}, ce qui suggère une limite de convenance autour de cette valeur. Mais pour vecteur-STU, ce n'est qu'à partir de 50g.kg^{-1} que l'on ne trouve plus de bâti en bauge, et la limite n'est pas marquée car elle résulte d'une absence de données.

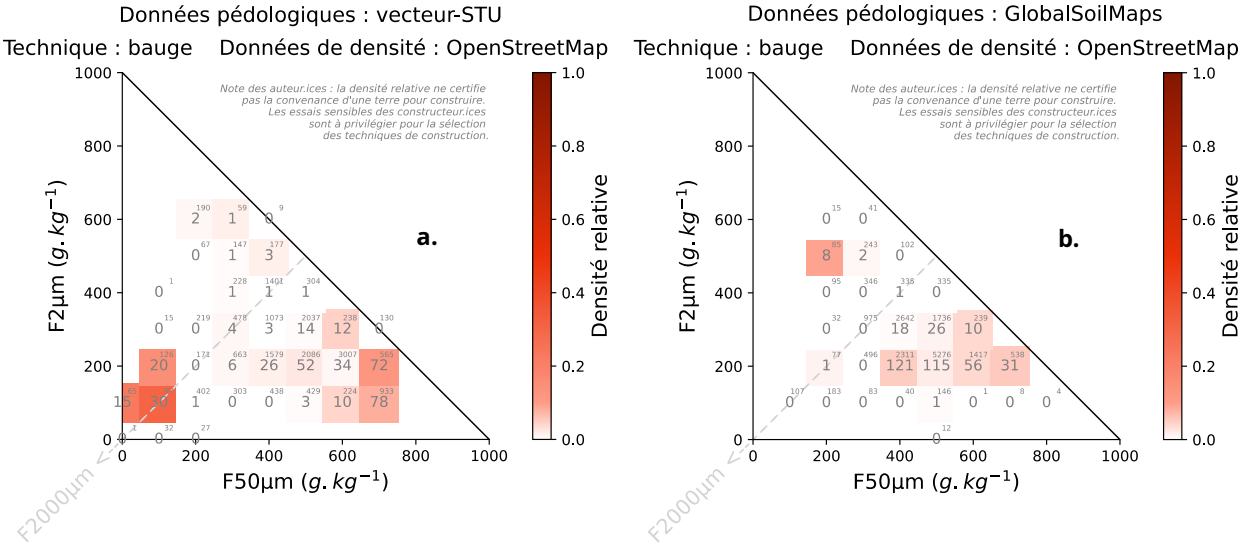


Figure 106 : Densité bâtie en bauge relativement au bâti OSM en France hexagonale, par classe de texture du sol. Bâti bauge issu de transects. Données pédologiques : a. vecteur-STU, b. GSM. Les résultats obtenus par Hamard et al. (2018) sont reproduits (voir Figure 24).

L'analyse des diagrammes des textures des Figures 76 et 77 (4.2) a montré que l'usage des données pédologiques GSM et vecteur-STU était acceptable en l'absence de données de référence raster-STU, et que l'emploi des données OSM pouvait remplacer les données patrimoniales du Service du Patrimoine de Bretagne si des précautions étaient prises dans l'interprétation. La Figure 107 représente les densités bâties sur diagramme des textures pour la bauge, en employant cette fois d'une part les données issues du seul transect réalisé en Ille-et-Vilaine (a.) et d'autre part les données issues de l'ensemble des autres transects (Loire-Atlantique, Occitanie, Limagne, Champagne-Ardenne). Les deux représentations montrent les mêmes tendances déjà observées en Bretagne, se superposant

correctement aux résultats de Hamard et al. (2018). Pour le transect en Bretagne, cela veut dire que malgré l'emploi de vecteur-STU et de GSM, et la localisation de seulement 167 bâtiments au cours d'un transect (une demi-journée d'enquête en voiture), on peut capter une dynamique significative concernant les choix préférentiels selon les propriétés des terres à disposition. La figure 107b. valide que cette dynamique n'est pas propre au territoire Breton, et donc qu'il ne s'agit pas d'une corrélation géographique hasardeuse, mais bien une dynamique de choix préférentiel relatif aux propriétés du sol.

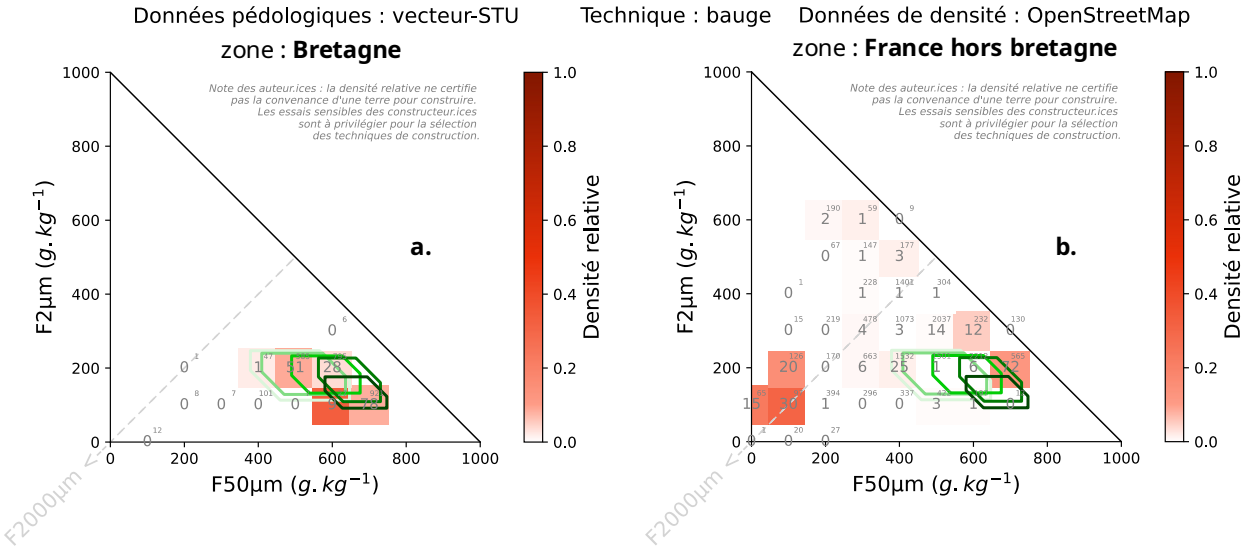


Figure 107 : Densité bâtie en bauge relativement au bâti OSM en Bretagne (a.) et hors Bretagne (b.), par classe de texture du sol. Bâti bauge issu de transects. Données pédologiques : vecteur-STU.

5.2.3.2 Pisé

La distribution des densités relatives pour les bâtiments en pisé (Figure 108) est remarquablement différente de celle observée pour la bauge. Les densités les plus fortes sont trouvées le long d'un axe :

- partant de l'angle « sableux » (F2000µm), quoique n'allant pas au-delà de 950g.kg^{-1} de fraction sableuse.

- se prolongeant jusqu'aux terres argileuses et argilo-limoneuses, jusqu'à F2µm = 600g.kg^{-1} et F50µm = 400g.kg^{-1}.

Mais on retrouve également des bâtiments en pisé dans toute la zone centrale du triangle des textures, dans les sols « équilibrés ». Côté limoneux, une limite semble apparaître avec des zones à densité bâtie en pisé nulle. Cela suggère un moindre choix préférentiel du pisé pour ces terres. A l'extrême argilo-sableuse, ces sols sont peu représentés sur nos zones d'études, il n'y a ni bâti pisé ni bâti OSM. Difficile de conclure sur une prolongation des choix préférentiels favorables ou non, malgré quelques zones à densité nulle qui laissent penser à une faible convenance au delà des sols « équilibrés ».

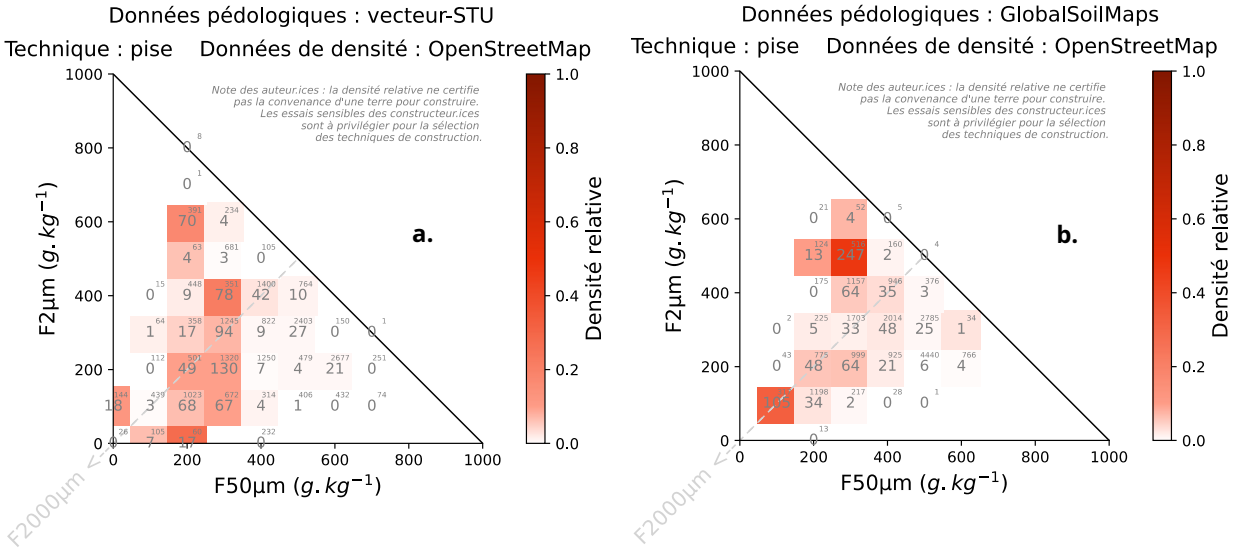


Figure 108 : Densité bâtie en pisé relativement au bâti OSM en France hexagonale, par classe de texture du sol. Bâti pisé issu de transects. Données pédologiques : a. vecteur-STU, b. GSM.

5.2.3.3 Adobes

Pour la densité bâtie en briques de terre crue, on retrouve la grande plage de composition de sols à forte densité bâtie (Figure 109). Celle-ci semble cependant circonscrite côé limono-sableux et côté argilo-sableux par des zones de plus faible densité relative (<0.1), indiquant peut-être une moindre préférence de l'adobe pour ces sols. Mais la zone à haute densité couvre l'ensemble des sols équilibrés, s'étend aux sols très sableux et couvre la totalité des sols argilo-limoneux et argileux.

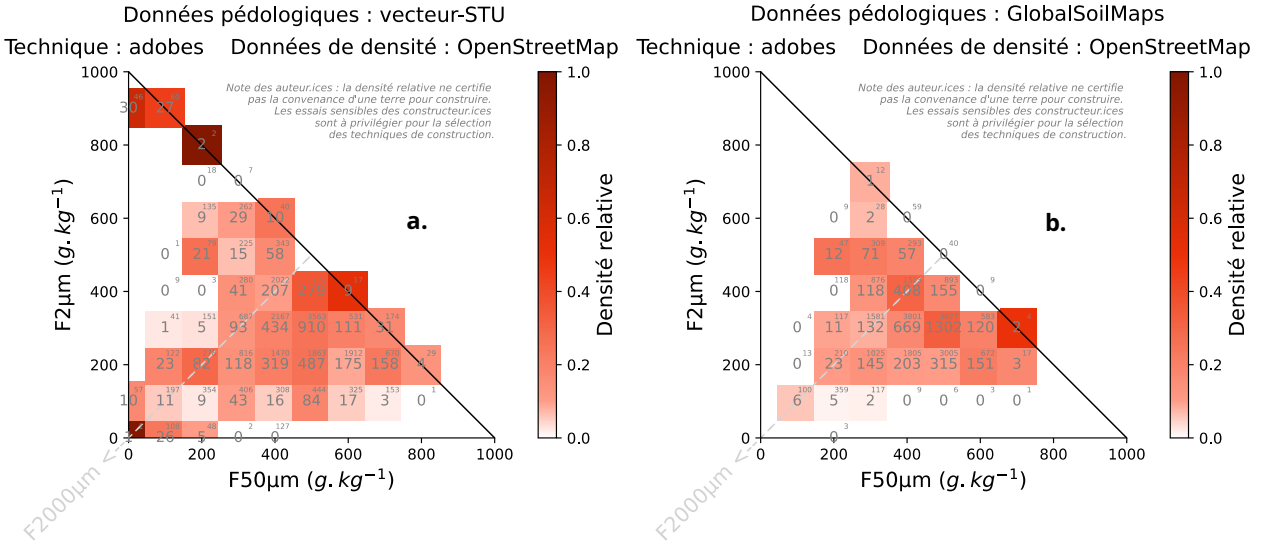


Figure 109 : Densité bâtie en adobes relativement au bâti OSM en France hexagonale, par classe de texture du sol. Bâti adobes issu de transects. Données pédologiques : a. vecteur-STU, b. GSM.

5.2.3.4 Torchis

Les densités bâties en torchis sont assez clairement circonscrites par des zones de faibles densité relative (Figure 110). Pour GSM (Figure 110b.), les progressions sont très claires, permettant d'identifier clairement le pôle limono-argileux comme plus favorable au torchis que les autres classes de texture. La tendance est un peu moins claire pour vecteur-STU mais la dynamique est reconnaissable.

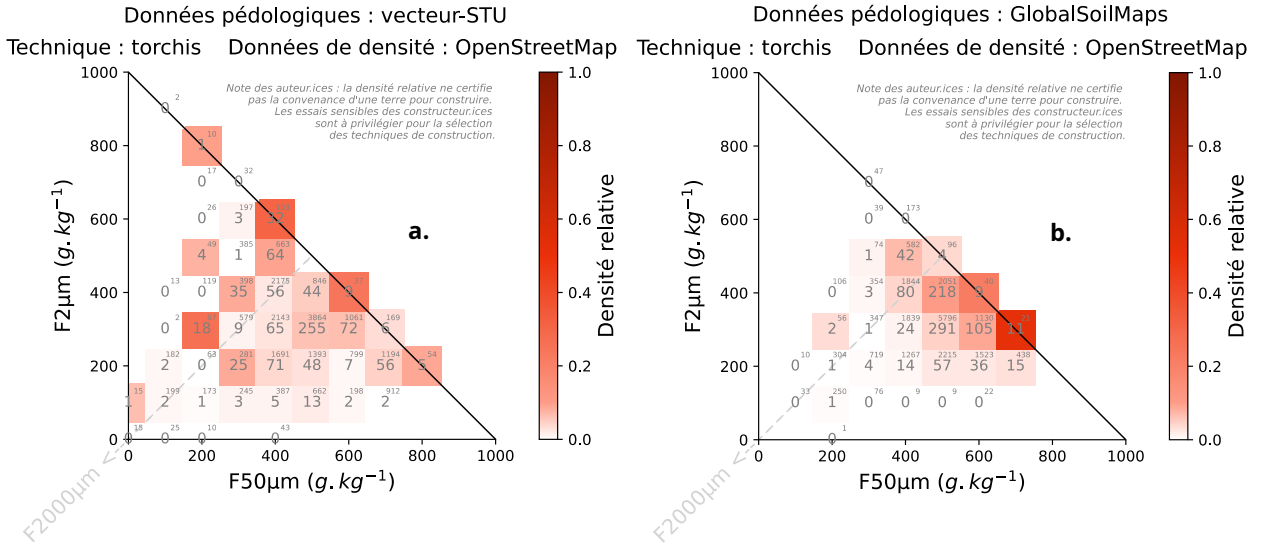


Figure 110 : Densité bâtie en torchis relativement au bâti OSM en France hexagonale, par classe de texture du sol. Bâti torchis issu de transects. Données pédologiques : a. vecteur-STU, b. GSM.

5.2.3.5 Analyse : apports et potentiels des diagrammes ternaires de densité relative

En comparant les résultats obtenus pour les quatre techniques-type étudiées, on observe :

- une distribution granulométrique sur de larges plages de valeurs pour chacune des techniques-type ;

- une superposition de l'ensemble des techniques-type au niveau des classes granulométriques « équilibrées » (300-400 g.kg^{-1} des trois fractions F2µm/F50µm/F2000µm) ;

- des polarités claires marquant des sols très favorables pour le pisé (sols équilibrés à sableux), pour la bauge (sols équilibrés à limoneux) pour les torchis (sols équilibrés à argilo-limoneux) ;

- une distribution plus large pour les adobes couvrant la quasi-totalité des sols existants sur les zones d'étude mais avec une polarité plus favorable argilo-limoneuse.

Dans l'ensemble, on peut conclure que les sols potentiellement favorables à la terre crue s'étendent sur un spectre très large de propriétés granulométriques. A l'exception des sols extrêmement sableux (est-ce encore de la « terre »?), aucune zone n'apparaît favorable à aucune des technique-type.

Pour l'ensemble des techniques, on observe une plus forte dispersion des résultats pour vecteur-STU que pour GSM. Difficile de savoir quelle représentation est la plus fiable : d'un côté les descriptions des sols DoneSol3 (vecteur-STU) sont plus précises, de l'autre il y a l'aléa de choix des STU. On peut penser que pour un faible nombre de données, il est probable que GSM donne de meilleurs résultats.

La représentation par diagrammes ternaire des textures apporte une lisibilité accrue des dynamiques de densités relatives pour les données granulométriques, par rapport aux représentations par variables uniques. Mais ce type de représentation ne se limite qu'aux variables décrivant la texture fine des sols sous-jacents aux bâtiments. Or, dans les modèles de liens de causalité que nous avons proposé, les paramètres de texture seuls sont relativement éloignés des variables d'ouvrabilité* pour les techniques de terre crue (Annexe I, Figure 1). L'emploi de variables plus proches du comportement réel du matériau, comme des résultats d'essais sensoriels ou au moins des limites d'Atterberg pourrait améliorer discrimination entre techniques-type. Malheureusement, ces données sont rarement renseignées dans les bases de données pédologiques. A défaut, nous avons souligné le potentiel de l'emploi de données de réactivité chimique du sol (Annexe I, 2.2.4.3). Elles permettraient de proposer

en complément des représentations type GTR comme Rojat et al. (2020) (Chapitre 1, Figure 27) qui ajouteraient la discrimination selon une variable type CEC/VBS. A l'inverse, le triangle des textures apporte un complément intéressant au GTR en détaillant les fractions à 2µm et 50µm, que l'on a identifié comme indispensables à la discrimination des techniques-types de terre crue.

6 Discussions

6.1 Quels impacts des sols sur les choix des techniques de construction en contextes pré-industriels ?

6.1.1 Choix préférentiel selon les propriétés de composition de la terre

On trouve de nombreux documents proposant des recommandations de propriétés du sol permettant de définir ce que sont des terres « convenables » pour construire en différentes techniques-types de terre crue. Par ailleurs, la documentation technique des artisan.es* contemporaines permet de mieux comprendre les recommandations car les raisons des préférences de propriétés de la terre y sont parfois décrites, explicitement ou implicitement.

6.1.1.1 Pisé et bauge

Les technique de pisé semblent concentrer l'essentiel de l'effort de recherche académique* relatif à la terre crue. Ainsi, de nombreuses références de recommandations existent. Certains travaux d'état de l'art ont cherché à les agréger et les synthétiser (Maniatidis & Walker 2003; Jiménez Delgado & Guerrero 2007; Gomes et al. 2014). En ce qui concerne la granulométrie, les différentes références rassemblées par Gomes et al. (2014) indiquent que la fraction granulométrique argileuse (F2µm) est généralement recommandée au minimum supérieure à 50 $g.kg^{-1}$ (valeurs de 0 à 150 $g.kg^{-1}$), et au maximum de 200$g.kg^{-1}$ (valeurs 100 à 400 $g.kg^{-1}$) (Figure 111).

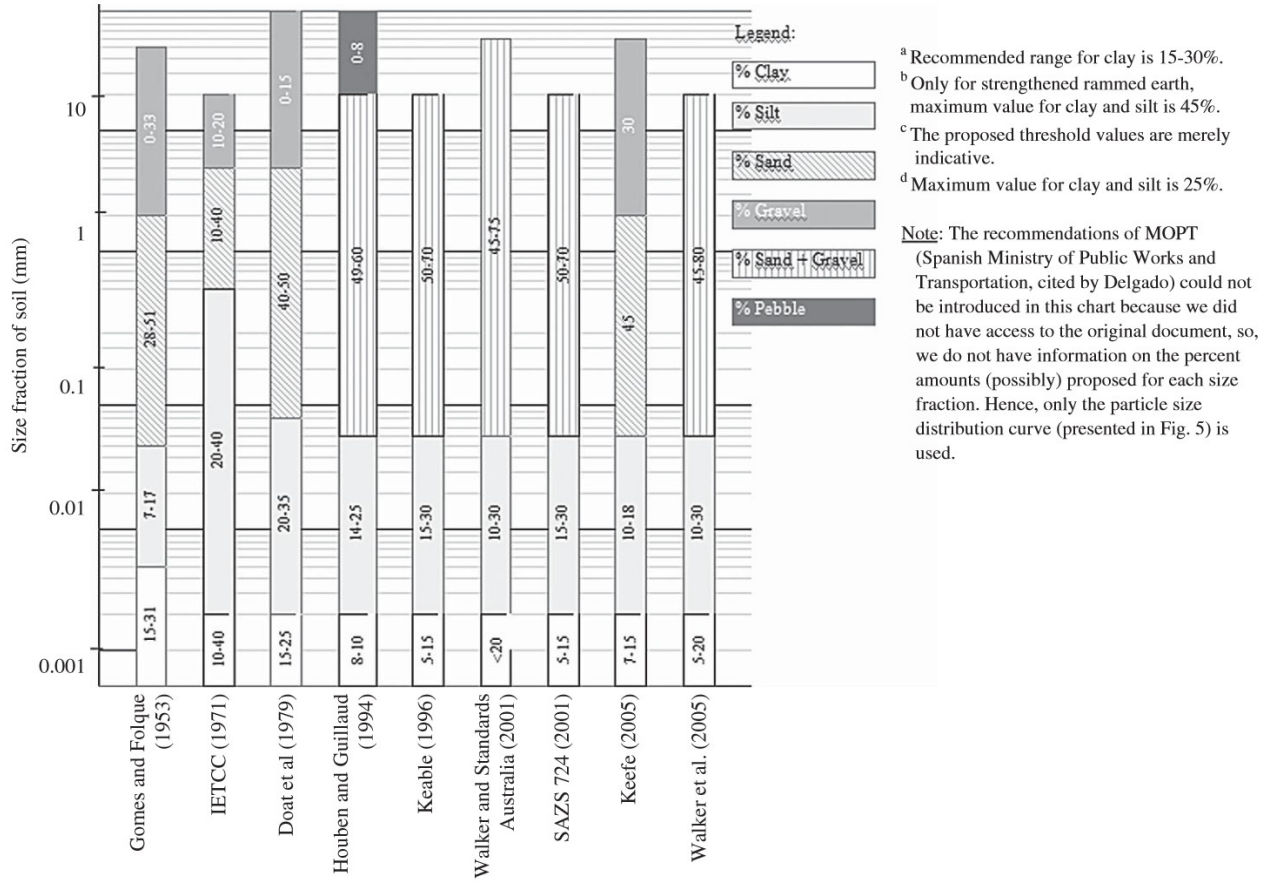


Figure 111: Recommandations de granulométries pour la construction en pisé

D'autres références s'accordent également sur ces teneurs (Marfaing et al. 2000; Phung 2018). Les fraction F50µm sont également recommandées comme plutôt faibles (150-300g.kg^{-1}), tandis que les fractions sableuses (F2000µm) sont plus fortes (env. 300-500g.kg^{-1}). Notons que comme fréquemment, il est incertain ici si la fraction est en masse relative à la fraction fine* ou en masse relative à la granulométrie complète.

La teneur en éléments grossiers (F2000µm_D) est indiquée en pourcentage (env. 0-20%, soit 0-200g.kg^{-1}) mais également en taille maximum des éléments, de l'ordre de 5cm (Phung 2018). Certains résultats d'essais sur échantillons de pisé suggèrent que le potentiel des sols pour construire des éléments résistants en compression serait plutôt une question d'empilement granulaire (Annexe I, 3.2.2), favorisé par une distribution granulométrique « équilibrée » (Cuccurullo et al. 2021).

Lorsque l'on projette des références de Gomes et al. (2014) sur les diagrammes des textures obtenus pour le pisé (Figure 112), on remarque que certaines recommandations sont extrêmement restrictives. En effet, présentées indépendamment les unes des autres, les recommandations sur les fractions granulométriques sont déjà relativement limitantes. Mais lorsqu'elles sont imposées conjointement elles deviennent presque impossible à réaliser du fait de l'unité de la somme des fractions granulométriques, à l'image de celle d'Houben et Guillaud (1994, dans Gomes et al. 2014), en bleu clair.

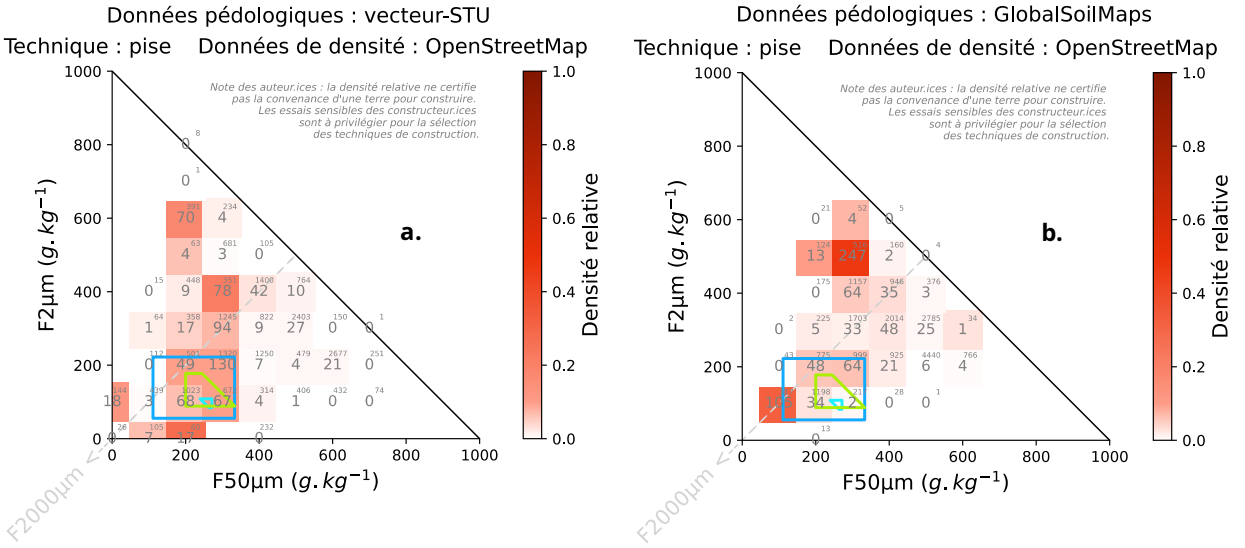


Figure 112 : Densité bâtie en pisé relativement au bâti OSM en France hexagonale, par classe de texture du sol. Comparaison avec les recommandations sur la granulométrie du sol pour bâtir en pisé relevées par Gomes et al. (2014): Walker et al. (2005) (bleu foncé), Houben & Guillaud (2006) (vert clair), Houben & Guillaud (1994) (bleu clair). Bâti pisé issu de transects. Données pédologiques : a. vecteur-STU, b. GSM.

Les résultats de densité bâtie relative aux propriétés du sol nous ont montré la présence significative de bâtiments situés sur des sols à F2µm > 200 g.kg^{-1} en Limagne et en Occitanie. Plus encore, en Limagne, on a observé un nombre significatif de bâtiments dont les sols sous-jacents et alentours indiquent une teneur allant au-delà de 400 g.kg^{-1} (Figures 92 et 91, et observation cartographique Figure 102). Il semble que la densité bâtie en pisé soit même légèrement croissante sur l'intervalle 100-300g.kg^{-1} dans certains cas (5.2.1.10.2). Cette observation est d'autant plus marquée par le fait que la CEC des sols très argileux observés en Limagne dépasse les 300 mmol+.kg^{-1} (Figure 91), ce qui indique qu'il s'agit au moins d'argiles moyennement actives ou fortement actives, donc probablement gonflantes (p. ex. Illites, Smectites, voir Annexe I, 2.2.4.1). Dans l'observation des résultats de densités relatives inter-techniques pour tous les transects, on observe que l'occurrence des bâtiments de pisé est finalement assez constante selon la fraction F2µm entre 50 et 600g.kg^{-1} (Figures 100 et 101, graphiques supérieurs) mais sa densité relative aux autres techniques de terre crue est fortement réduite sur les plages entre 200 et 400g.kg^{-1} (graphiques inférieurs). C'est donc finalement plutôt une augmentation simple de l'intensité des autres techniques qu'un remplacement du pisé qui est observé. Ces résultats sont très contradictoire avec les recommandations qui limitent généralement la plage de convenance du pisé à F2µm < 200g.kg^{-1}. Non seulement les teneurs rencontrées dépassent largement les plages de convenance supposées, mais pour ce passant granulométrique il n'apparaît pas clairement de tendances significatives montrant des sols plus favorables que d'autres. Pourtant, il est parfois indiqué dans les recommandations que la fraction granulométrique F2µm est limitée à 200 g.kg^{-1} pour le pisé car elle favorise le retrait au séchage des éléments (Gomes et al. 2014; Phung 2018), du fait que la cette fraction serait proportionnelle à la quantité de minéraux argileux et donc à leur retrait-gonflement (Annexe I, 2.2.3.2.1). Une terre argileuse demande également plus d'énergie au compactage pour atteindre une même compacité (Chapitre 2, 5.2.4), mais peut-être qu'une moindre compacité est nécessaire du fait de la cohésion des argiles (Annexe I, 5.2.2.8.2) ce qui rend incertaine la conclusion sur l'aisance de mise en œuvre.

Nous avons vu que le retrait était un phénomène pouvant apporter de la compacité aux éléments de terre crue aux retraits libres comme les briques moulées (Chapitre 2, 5.2.4.2). Pour des éléments massifs comme les murs de pisé, l'apport de compacité est incertain, et le retrait peut donc

probablement induire de la fissuration (Chapitre 2, 5.2.4.2) ; mais l'impact de la fissuration sur les propriétés mécaniques d'éléments massifs n'est à notre connaissance pas documenté, et il est incertain qu'il contrebalance le gain de résistance lié au gain de compacité. Au niveau thermique, son impact sur l'étanchéité à l'air de murs de pisé épais est également incertain. En revanche, l'acceptation dans les imaginaires contemporains de la fissuration des éléments en est certainement négative, d'autant plus dans un contexte de méfiance quant aux propriétés d'usage de ces matériaux (Contexte, 2.2). Mais cette perception, fortement liée au contexte de réappropriation de techniques vernaculaires en milieu industrialisé, ne fût peut-être pas limitante par le passé.

Il est ainsi possible que les recommandations proposant une limitation très basse de la fraction F2µm soient essentiellement liée à des préoccupations esthétiques. C'est en tout cas l'avis de certain.es artisan.es ("un maçon", dans). Ce qui n'est donc pas contradictoire avec la présence d'éléments de pisé potentiellement bâtis avec des sols sous-jacents aux bâtiments très argileux, parfaitement fonctionnels à l'usage et durables. Malgré tout, les témoignages des artisans nous indiquent que le pisé est inadapté aux terres trop fortement argileuses car l'homogénéisation de la matière peut être pénible voir impossible (CCTC 2018). Dans les mélanges argileux aux saturations en eau optimales de compaction (Chapitre 2, 5.2.4.1), les agrégats sont très solides et ne se laissent pas briser par un « frassage » à la pelle (mélange où la terre est soulevée (Marfaing et al. 2000)) : seules des techniques de pétrissage à plus fortes teneurs en eau au moins « plastiques-fermes » permettraient une bonne homogénéisation, des mélanges plus fluides permettant de faciliter le travail* de mélange («Cornu» & «Dugelay» 2022). Une augmentation de la pénibilité de mise en œuvre devrait favoriser l'emploi préférentiel d'autres techniques, mais cela n'est pas visible dans notre étude car malgré la présence d'autres techniques à proximité (bauge, adobes), montrant leur connaissance, c'est bien le pisé qui a été choisi. Peut-être que des techniques particulières étaient mises en œuvre pour s'adapter aux ressources fortement cohésives. Comprendre ce qui permettait l'emploi de telles terres pourrait faire l'objet d'études sur ces bâtiments en particulier, par observation détaillée des éléments d'ouvrages ou par analyse micromorphologiques (Hamard, Cammas, et al. 2016, 2020; Cammas 2018).

La limite minimale de 50g.kg^{-1} n'est pas incohérente avec les résultats obtenus via les données GSM (Figure 112b.), car les sols extrêmement sableux semblent moins favorables que ceux contenant au moins un peu de F2µm. Peut-être que les sols sableux et sablo-limoneux à F2µm<50g.kg^{-1} observées pour vecteur-STU sont liés au choix aléatoire des STU. De toute évidence, un sol de sable pur est incompatible avec tout usage de construction en terre : la quantité minimale d'éléments cohésifs, par exemple appartenant à P50µm, reste incertaine et dépend certainement du contexte constructif.

Pour F50µm (limons), il n'y a pas non plus vraiment de tendance marquée sur les plages de valeurs représentées pour le pisé (100-600g.kg^{-1}) lorsqu'on observe la distribution de densité selon F50µm directement. Dans le diagramme ternaire en revanche, on remarque que les zones de plus fortes densités relatives sont limitées côté F50µm par une zone de moindre densité : plus la teneur en limons augmente, plus la teneur en argiles est importante, de sorte qu'aucun sol limoneux ou limono-sableux ne semble être représenté. Une explication peut être que les limons sont considérés comme favorisant des éléments compactés manquant de cohésion de surface donc peu résistants à l'abrasion (Collectif des Terreux Armoricains 2022a, 2022c) et une difficulté à maintenir la teneur en eau stable pour la compaction (Collectif des Terreux Armoricains 2022a). Les sols limoneux sont plus adaptés à des mises en œuvre plastiques comme la bauge.

Dans tous les cas, les plages de valeurs pour F50µm dépassent là aussi des plages recommandées. Comparé aux autres techniques en revanche, la teneur en limons paraît en première approche très défavorable au pisé (Figures 100 et 101), mais il s'agit probablement de l'occurrence forte des bâtiments en pisé en Limagne qui déséquilibrent la comparaison. Lorsqu'on regarde indépendamment

les distributions en densités relatives aux sols (Aléatoire) ou au bâti (OSM-visible) pour la Limagne et l'Occitanie (Figures 92 et 91), elles ne présentent pas de dynamique particulière.

Pour F2000µm (sable), les densités relatives aux sols et aux bâtiments OSM sont croissantes sur les plages de valeurs représentées (0-600g.kg^{-1}). La présence significative de pisé pour des teneurs en sables inférieures à 300g.kg^{-1}, par ailleurs corrélées aux fortes teneurs en F2µm, n'est en revanche pas attendue dans les standards, qui suggèrent généralement des teneurs supérieures à cette valeur.

La teneur en éléments grossiers (F2000µm_D) n'apparaît pas comme fortement défavorable à la densité bâtie en pisé lorsqu'on observe son occurrence et sa densité relative aux sols et aux bâtiments OSM de Limagne et Occitanie. Elle est légèrement décroissante, mais même des sols à F2000µm_D > 200g.kg^{-1} présentent des densités bâties conséquentes. Comparée aux autres techniques de construction en terre crue, le pisé apparaît comme favorable aux sols caillouteux (Figures 100 et 101, F2000µm_D). Ces résultats sont en accord avec les suggestions courantes que le pisé est adapté à la présence de gros éléments qui participent à l'empilement granulaire. Cependant la quantité d'éléments concernés dans les résultats dépasse tout de même les suggestions. Mais quelle que soit la technique, les EG les plus gros peuvent être triés, ce qui fait que des sols à fortes teneurs en « gros » éléments grossiers ne sont jamais limitants mais seulement un peu défavorisant car nécessitant un travail* de tri manuel.

Il est intéressant d'observer qu'en comparaison aux autres techniques de terre crue, ce sont bien pour les sols les « mieux distribués » (Figure 105) que l'on retrouve le plus de bâtiments composés de pisé, ce qui est attendu du fait que cette caractéristique faciliterait la compaction des éléments et/ou leur compacité finale donc leur résistance mécanique.

Finalement, la non adéquation de la plupart des sols favorables au pisé avec les recommandations classiques appuie de nouveau la démonstration de Rojat et al. (2020) (Chapitre 1, 1.1) de la possibilité de bâtir en pisé en dehors des standards existants. Ceux-ci sont trop restrictifs, voir presque impossible à satisfaire.

En ce qui concerne les pisés très argileux, une analyse plus fine des techniques employées révélerait peut-être des stratégies d'adaptation à une ressource très cohésive. Mais peut-être atteignons nous ici la limite de l'hypothèse selon laquelle les choix techniques vernaculaires pré-industriels seraient « purement techniquement rationnels » : le pisé a peut-être bénéficié d'une représentation* favorable dans les imaginaires de certains espaces-temps qui entraîna la construction avec cette technique, « coûte que coûte ».

6.1.1.2 Bauge

Pour la bauge, les références sont plus rares. Hamard et al. (2018) rassemblent 4 références assez cohérentes entre elles et suggérant des fractions F2µm entre 200 et 400 g.kg^{-1}, F50µm de 100 à 300g.kg^{-1} et en conséquence F2000µm bien plus conséquent autour de 300-600g.kg^{-1} (Chapitre 1, 1.1 , Figure 24). Ainsi, la bauge serait adaptée à des sols relativement semblables aux sols recommandés pour le pisé mais plus argileux. Ce n'est pas du tout ce qui est observé dans notre étude.

Comme remarqué par Hamard et al. (2018) sur les sols Bretons, dans la réplication de leur analyse dans cette étude, ainsi que dans l'analyse par transect dans différentes régions, les variables corrélées à la densité bâtie en bauge sont la teneur en limons (transects : Bretagne Figure 87, Occitanie Figure 89 Hamard et al. Figure 24), la teneur en éléments grossiers (transects : Bretagne Figure 87, Occitanie Figure 89) et la profondeur du sol (transects : Bretagne Figure 86, Occitanie Figure 88). Les autres variables ne montrent pas de dynamiques particulières. Ce sont finalement les sols limoneux / limono-argileux qui présentent les plus fortes densités relatives bâties en bauge (Figure 106).

La teneur en Limons dépasse ainsi complètement les recommandations. On rencontre un pic d'occurrence en Bretagne aux alentours de 650g.kg^{-1}, avec des teneurs allant jusqu'à 800g.kg^{-1}. La teneur en éléments grossiers, comme la profondeur du sol, semble défavorable au choix technique de la bauge relativement aux bâti Vernaculaire, et aux autres techniques de construction en terre crue. Mais ces deux variables étant corrélées, au moins en Bretagne, il est difficile de savoir si l'une des deux ou les deux défavorisent la technique.

Comme pour le pisé, la densité de bauge relativement aux autres techniques-types semble favorisée par les faibles teneurs en argiles ; mais là encore il s'agit probablement essentiellement de l'effet de l'augmentation de l'occurrence des autres techniques-types, ce qui fait douter sur un réel « choix préférentiel » comme pour le pisé. Des murs de bauge très argileuse ont été repérés dans les marais salants de Guérande (Hilton 2016). Au regard de la forme des éléments, Hilton (2016) suppose qu'ils ont peut-être fait l'objet d'une adaptation technique à la composition particulière de la terre : les mottes ont pu être pré-séchées avant la mise en œuvre, et appareillées « demi-sèches ». Une adaptation qui permettrait de faciliter le mélange de terre en ajoutant plus d'eau, tout en assurant un moindre développement du retrait au séchage ?

En tout cas, les plages d'occurrences de bauge selon la fraction F2µm vont de 50 à 400g.kg^{-1}, sans informations au-delà, ce qui n'est pas en contradiction forte avec les recommandations mais suppose tout de même l'existence de terres très peu argileuses, dont la cohésion est principalement apportée par les limons.

Les sols limoneux sont souvent considérés comme à faible cohésion, voir « pulvérulents » à l'usage. Le choix de tels matériaux pour construire suppose leur emploi pour d'autres raisons que la qualité des propriétés d'usage uniquement. Nos observations sur des chantiers et les témoignages d'artisan.es rencontré.es nous amènent au constat que l'emploi du limon facilite la mise en œuvre, justement grâce à se faible cohésion qui le rend moins ferme lorsque pétri au pied ou frassé à la pelle («Bosi» 2022; «Cornu» & «Dugelay» 2022).

Pour le pisé comme pour la bauge, les sols limoneux n'ont pas pour réputation d'être les plius résistants à l'usage. En revanche, la gestion des teneurs en eau de compaction fait que les sols sablo-argileux sont plus propices au pisé que les sols limoneux, et la facilité de mélange suggère l'inverse pour la bauge. Ce constat va dans le sens d'un choix technique vernaculaire pré-industriel plus orienté par l'économie d'effort de mise en œuvre que par la résistance mécanique d'usage.

6.1.1.3 Adobes

Les résultats d'occurrence de bâti en adobe montrent une dispersion sur de très grandes plages de valeurs de propriétés pédologiques, représentant la quasi-totalité du spectre des sols des zones étudiées. Les adobes sont rencontrés sur tous les sols où l'on retrouve les autres techniques-types, à l'exception peut-être des sols les plus sableux (>600g.kg^{-1}) et des sols aux passants argileux les plus faibles (<50g.kg^{-1}). Ils sont par ailleurs rencontrés sur des sols aux proportions d'éléments grossiers conséquents.

Deux explications sont possibles pour cette diversité :

- la versatilité des techniques d'adobe, qui pourrait s'adapter à la plupart des sols, mêmes à ceux comprenant de grandes quantités d'éléments grossiers et très argileux. Les terres à fort retrait peuvent être gérées par de plus petits éléments qui facilitent le retrait dimensionnel (Chapitre 2, 5.2.4.2) Il est possible que les adobes ne soient pas toujours gênées par les éléments grossiers, malgré les recommandations contraires de la littérature. Notre échantillonnage est composé d'une fraction non négligeable de données provenant de transects en Champagne crayeuse, où Aras-Gaudry

(2025) a identifié des briques composés d'éléments calcaires de grande taille. La dilution de l'effet des propriétés granulométriques est d'autant plus importance qu'avec ce type de matériau, les éléments peuvent être rompus au cours de la mise en œuvre, ce qui change finalement la distribution granulaire (Annexe I, 2.2.3.2.2);

- les terres employées ne sont pas les terres sous-jacentes aux bâtiments. L'adobe, technique préfabriquée, favorise les étapes de transport (Chapitre 3A, 3.4.7). Un transport récurrent des adobes fabriquées engendrerait une distribution plus aléatoire des densités relatives bâties en cette technique selon les propriétés pédologiques.

Mais les rares témoignages historiques suggèrent que les adobes étaient souvent mises en œuvre localement, ou dans un voisinage proche, ce qui fait que malgré un aléa dans les résultats apporté par le transport, l'effet de choix préférentiel devrait pouvoir s'observer s'il était conséquent. Les deux explications sont probablement vraies dans ce cas.

6.1.1.4 Torchis

Les torchis sont principalement rencontrés sur les sols fins et cohésifs (Figure 110). Un fait qui peut s'expliquer par une plus grande aisance du tressage de torches et plus généralement du modelage sur une structure en présence de beaucoup de fibres. Un constat en tout cas repéré pour la terre allégée, technique aux objectifs de mise en œuvre semblables (Vinceslas 2019). Il est cependant moins compréhensible de voir la densité relative chuter pour les sols les plus argileux.

Les torchis ne semblent pas défavorisés par les éléments grossiers (Figures 100 et 101), qui gênent pourtant leur mise en œuvre. On peut penser que les torchis font souvent partie de structures dont l'essentiel du travail* n'est pas celui de la terre mais plutôt celui du bois, et que le choix technique est fortement relié aux contraintes de densité urbaine (Chapitre 3A, 3.5.3). Ainsi, l'étape de mise en œuvre peut être réalisée avec une terre ne permettant pas une forte productivité car elle demande finalement peu de travail par mètre carré relativement au reste du gros œuvre ; ou que le choix technique est de toutes façons inévitable dans le contexte constructif.

6.1.2 Profondeur des sols, pierrosité et construction en pierre

La densité bâtie augmente généralement avec la profondeur pour l'adobe, et très clairement pour la bauge. Nous soupçonnons que cette dynamique est liée au choix préférentiel pour la pierre, dès que cela est possible, ce qui était déjà affirmé pour la bauge en Bretagne par Le Garrec et al. dès (1978). Dans la littérature, le choix préférentiel de la pierre est largement documenté, même s'il existe des exceptions (Chapitre 3A, 3.5.5). Il est souvent justifié par des considérations « culturelles » : la pierre, surtout la pierre de taille, aurait été jugée plus noble ou plus solide que la terre. Mais nous suggérons qu'une analyse des procédés de construction en pierre pourrait permettre d'expliciter si la pierre était également un choix « techniquement » plus efficace. Maçonner directement des pierres de champ au mortier de terre nous semble en effet comme au moins aussi rapide que préparer un mélange de bauge et le mettre en œuvre, pour une même unité fonctionnelle* de mur (mécanique, ou de surface de mur).

En revanche, pour le pisé ou les torchis, la relation inverse a pu être observée : la technique du pisé a pu être préférée aux autres techniques de terre crue lorsque bâtie sur des sols grossiers. Pour le pisé pourtant, nous n'avons pas remarqué de croissance dans la densité relative des bâtiments en pisé avec la teneur en éléments grossiers du sol, peut-être même une légère décroissance, alors qu'elle était claire pour la bauge. Il est possible que les représentations* du pisé dans les imaginaires ait rendu cette technique plus désirables que celle de la bauge et donc moins impactée négativement par le choix préférentiel de la pierre. Mais surtout, il est probable que ce soit surtout l'effet bénéfique de la

présence d'éléments grossiers dans les mélanges qui favorise cette technique relativement aux autres techniques de terre en sols superficiels, et la rend un peu plus compétitive face à la construction en pierre. Peut-être que la technique du pisé serait déployée favorablement pour les sols pierreux et peu profonds, mais à la ressource en pierre de piètre qualité : cailloux trop petits, roches fragiles, etc. Une autre influence sur le choix des techniques en relation avec les pierres du sol local est la forme des éléments grossiers : (Koutous & Hilali 2019b) ont montré l'impact de celle-ci sur les propriétés de compactibilité et de résistances mécaniques des éléments de pisé (Annexe I, 5.1.2.7.2). Le matériau parental du sol, et notamment le fait que ses éléments soient issus de transports sédimentaires, peut ainsi impacter la forme des éléments. Ils sont arrondis s'ils ont été « roulés », et souvent plus anguleux s'ils n'ont pas été transportés sur de grandes distances par exemple pour l'altération « en place » d'un socle rocheux sous-jacent au sol. Ces propriétés impactant probablement à la fois la construction en terre et la construction en pierre, il s'agit d'une des propriétés qui pourrait permettre de discerner de nouveaux paramètres liés aux choix techniques.

Ces questionnements montrent qu'il est difficile de cloisonner l'étude des techniques de terre et pierre, tant leur interaction potentielle dans le choix des matériaux est forte. L'étude des procédés de construction en pierre pourrait ainsi éclaircir nos hypothèses.

6.1.3 Une terre, une technique ?

Les diagrammes des textures des quatre techniques-type présentent de fortes occurrences de bâti pour les sols « équilibrés », au centre du diagramme. Certains sols permettent donc l'emploi de l'ensemble des techniques-types. Ces « super-terres » participent à l'émergence de zones multi-techniques, à l'image du village de Haget dans le Gers (Contexte, 2.3.5), où nous avons rencontré dans une même rue, l'ensemble des techniques-types de cette étude : adobes, bauge, pisé, torchis. Une technique d'adobes « irréguliers », peut-être façonnées à la main, y est même rencontrée.

D'après DoneSol3, le sol local est un colluviosol à composition limono-argilo-sableuse, une composition « équilibrée » (Figure 113).

On peut interpréter sous plusieurs angles cette conjonction de techniques dans un même espace et peut-être à une même époque. Le premier est un cumul pur et simple des potentiels constructif de chacune des techniques, qui fait qu'il y a une technique adaptée pour toutes les situations constructives, par exemple :

- la bauge et le pisé lorsque la mise en œuvre directement sur site est possible, car ce sont probablement les techniques les plus efficaces en temps de travail par unité de volume mis en œuvre (Chapitre 3A, 3.5.4.1). La bauge lorsque le sol est trop humide au moment de l'extraction de la terre et pour les contextes *extensifs** *(*avec de l'espace et du temps, voir Chapitre 3A, 3.5.4.2), le pisé lorsqu'il est plus sec ;

- l'adobe lorsqu'il est nécessaire de construire dans un espace temps *intensif* (3.5.4.2) ou pour composer un capital* économique dans les temps morts agricoles ;

- le torchis lorsqu'il s'agit de composer rapidement une paroi de faible épaisseur et légère (cloisons, étages) ;

sans oublier l'adéquation aux représentations* de l'espace-temps considéré. Une autre interprétation serait que l'adéquation à d'autres techniques favorise la présence de chacune d'entre elles, dans le déploiement d'une culture constructive commune : disponibilité d'artisan.es sachant.es, d'outils adaptés, etc.

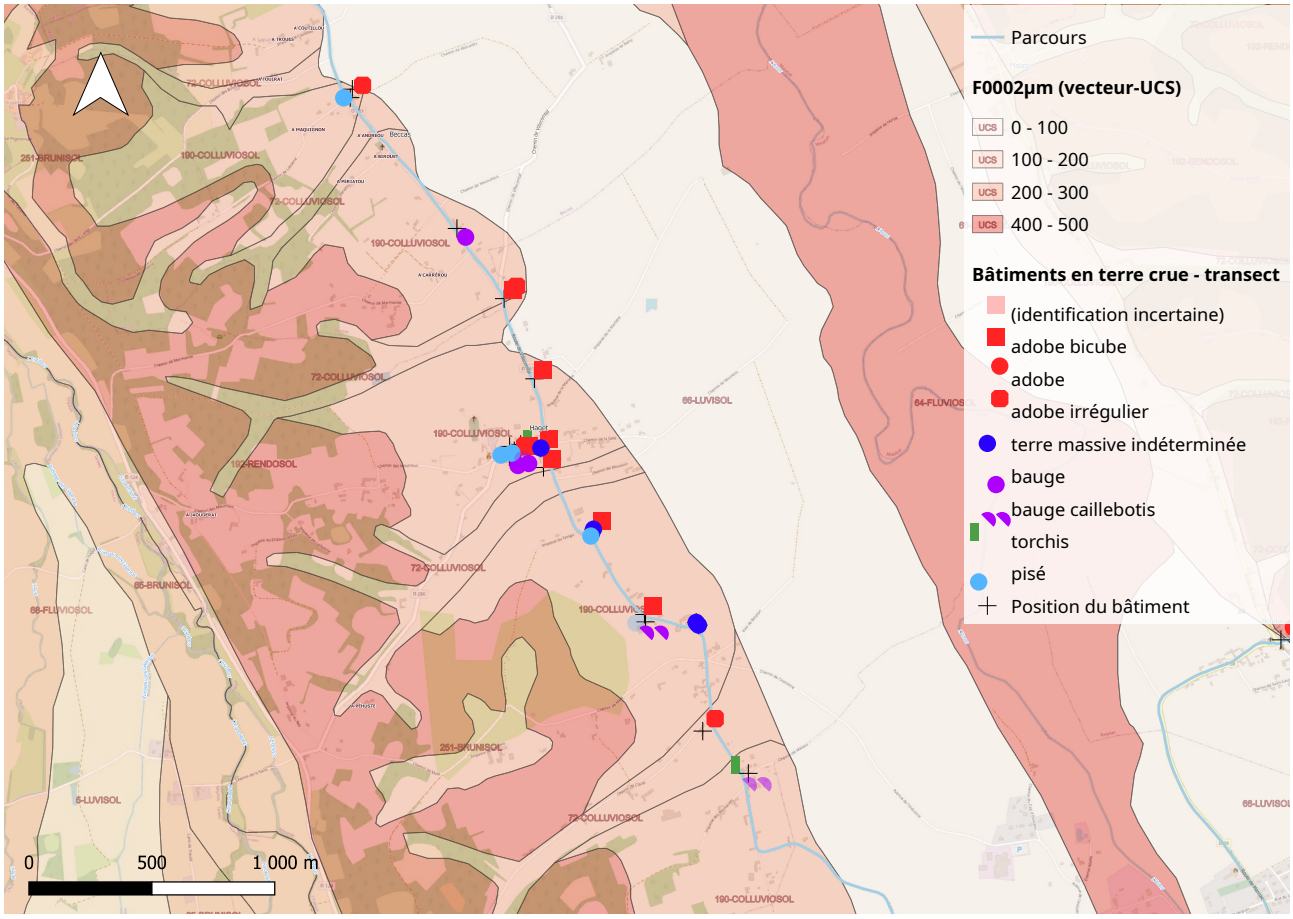


Figure 113: Composition pédologique des sols alentours du village de Haget, en limite du Gers avec les Hautes-Pyrennées.

6.1.4 Une terre peut-elle être défavorable à la construction en terre crue ?

Nous avons observé dans cette étude du bâti vernaculaire des bâtiments composés de terre crue composés d'une diversité de terres considérables : fraction granulométrique argileuse de 50 à 600 $g.kg^{-1}$, limoneuse de 0 à 800 $g.kg^{-1}$, sableuse de 0 à 800 $g.kg^{-1}$, et éléments grossiers jusqu'à plus de $400g.kg^{-1}$. Dans ces intervalles, la grande majorité des sols naturels de l'hexagone sont représentés. A l'exception de la classe la plus sableuse (F2µm et 50µm $<50g.kg^{-1}$), toutes celles présentant un nombre significatif d'échantillons de bâti « de densité » (OSM) semblent favorables à au moins l'une des techniques.

On peut suggérer que si lorsque des terres ne sont pas employables dans l'une ou l'autre des techniques, c'est qu'ils sont composés de matériaux que l'on identifie pas comme « terre » dans le langage courant (Chapitre 2, 2). Des sols composés de $950g.kg^{-1}$ de sables et de $50g.kg^{-1}$ de limons apparaîtraient en effet comme « du sable » ou un sable « sale » pour reprendre les terminologies de la filière béton de ciment (Phung 2018).

Finalement, si nous définissons la terre comme un « matériau meuble possédant des propriétés cohésives » (Chapitre 2, 2), n'est-ce pas ce qui définit, à première vue, les conditions nécessaires pour la possibilité de l'emploi de la terre dans au moins l'une des techniques de construction en terre crue ? Autrement dit, à partir du moment où l'on appelle un matériau *terre*, n'y a-t-il pas moyen de l'utiliser en tant que matériau de construction crue, ne serait-ce que pour édifier des murs non porteurs* de faible

élancement ? Par ailleurs, si nous intégrons l'adjuvantation de matériaux paysans* cohésifs (selles animales, fibres et farines végétales, etc), ne pourrait-on pas employer n'importe quelle terre, voir même du sable, pour réaliser des enduits ou d'autres structures ?

Par ce raisonnement, on voit bien l'importance de définir le contexte d'emploi pour évaluer le potentiel d'une terre : *propriétés d'usage** souhaitées (mécaniques, thermiques, etc.), *propriétés comportementales de mise en œuvre** acceptables selon les techniques envisagées, et implications des techniques choisies dans les besoins et envies des constructeur.ices. Ce n'est qu'en définissant les *propriétés cibles* du matériau terre pour un projet donné que l'on peut entamer un travail de restriction des terres employables dans la construction par des *propriétés de prédiction* (Chapitre 1, 3). Cette remarque tend finalement à ouvrir le champ des possibles : en l'absence de précisions sur ce contexte constructif, toute « terre » est potentiellement convenable pour construire en terre crue !

Notons par ailleurs que mêmes les sols extrêmement organiques comme les tourbes et horizons de surface humifères sont employés avec succès dans certains techniques de construction en gazon (*turf*) (Walker et al. 2006; Romankiewicz et al. 2022; Russell et al. 2022; Lin et al. 2023). En contexte contemporain, un vrai contrepoint en revanche serait l'état sanitaire des terres, mais là encore les risques dépendent du contexte d'emploi et ne peuvent être résumés par des propriétés de composition classiques.

6.2 Différences entre recommandations et observations : quelles origines ?

La préférence de chacune des technique-type* de construction en terre crue dans le choix technique pré-industriel semble être au moins partiellement impactée par les propriétés pédologiques. Si les tendances semblent globalement cohérentes entre nos observations et les recommandations issues de la littérature, il y a généralement une mauvaise correspondance des plages de valeurs suggérées. Les recommandations sont souvent être plus limitantes que les terres a priori employées pour construire, en tout cas pour les propriétés granulométriques étudiées (6.1.1). Un constat qui s'accorde avec les observations d'autres équipes de recherches (Chapitre 1, 1).

6.2.1 Des propriétés cibles non représentatives ?

L'origine des recommandations est difficile a connaître. Les documents sources que nous avons consultés semblent essentiellement être liés à des avis d'expert (p. ex. (Harries et al. 1996)), d'autres sont peut-être liées à l'observation du patrimoine (Houben & Guillaud 2006), ou des séries d'essais sur des échantillons de terre. Dans tous les cas, les raisons invoquant les recommandations, c'est à dire les *propriétés cibles* que les terres évaluées doivent permettre d'atteindre, ne sont pas toujours précisées. Lorsqu'elles le sont il apparaît qu'il s'agit principalement de propriétés d'usage : mécanique, hygrothermique, esthétique (Chapitre 1, 3.1). Or, on a constaté que les artisan.es actuelles comme les constructeur.ices vernaculaires semblent intégrer l'aisance de mise en œuvre dans le choix technique. Il s'agirait au final d'un ensemble de compromis, par exemple entre aisance de façonnage et propriétés d'usage.

C'est ainsi que l'hypothèse de l'inadéquation des propriétés cibles (Chapitre 1, 4 , Hypothèse 1) apparaît comme une bonne explication de la divergence entre observations sur le patrimoine et recommandations. Cela expliquerait que les techniques-types soient rencontrés sur une grande diversité de sols sans limites strictes : l'aisance de mise en œuvre n'est pas limitante comme le serait la mécanique finale des éléments, mais simplement favorisante, et en contexte économique favorable,

des techniques non économiques (de « luxe ») sont envisageables (Chapitre 3A, 3.5.4.3). Cela expliquerait également la préférence fréquente de bauge sur les sols limoneux, facilitant la mise en œuvre au détriment de performances mécaniques, car celles-ci ne sont pas toujours nécessaires. Si on considère que la plupart des édifices vernaculaires étaient construits de plain-pied, ou avec des murs d'épaisseur surdimensionnée pour pouvoir accueillir les constructeur.ices sur le mur pendant l'édification, ou encore pour une performance thermique suffisante, alors la résistance mécanique nécessaire y aurait été bien inférieure à ce qui est parfois recommandé dans la littérature (Ciancio et al. 2013; Silva et al. 2013) (Chapitre 1, 2.4).

6.2.2 Des contextes constructifs particuliers, ou des techniques inconnues ?

Certains résultats sont contradictoires aux suppositions fréquentes, même lorsqu'elles proviennent de praticien.nes de la terre, à l'image du pisé à fort passant 2µm et CEC rencontré en Limagne (5.2.1.5). S'il s'agit bien des sols employés pour construire comme l'observation cartographique le laisse penser, alors ces caractéristiques suggèrent soit que les techniques employées aient été pénibles à mettre en œuvre car peu adaptées techniquement aux propriétés de la terre ; ou que les techniques employées étaient différentes des techniques contemporaines. Dans le premier cas, il peut s'agir de contextes particuliers, par exemple où des commanditaires bourgeois aient payé le travail nécessaire pour avoir la technique désirée malgré son inadaptation. Dans le second, il s'agit peut-être d'astuces de mise en œuvre locales qui ne sont pas connues des artisan.es que nous avons rencontré.es. Dans les deux cas, l'investigation des territoires concernés par ces « anomalies » pourrait être intéressante. Elle apporterait des éléments de compréhension de l'influence du contexte sur les choix techniques, ou permettrait éventuellement de redécouvrir des procédés qui faciliteraient l'intégration d'une plus grande diversité de terres dans la construction en terre crue contemporaine.

6.3 Croiser des données pédologiques et patrimoniales : quelles données, quelle méthode ?

6.3.1 Estimer la composition de la terre des murs à partir de croisements bâti/bases de données pédologiques : incertitudes et potentiels

Dans ce chapitre, nous extrayons les données pédologiques sous-jacentes aux points-bâtiments localisés sur le terrain pour observer les liens entre choix d'une technique-type et propriétés pédologiques des terres employées. Cette méthode permet d'éviter l'analyse des terres des bâtiments étudiés. Par simple géolocalisation des bâtiments et des techniques qui les composent, elle permet de réaliser des traitements statistiques d'ampleur. L'emploi de cette méthode ne prédit cependant pas parfaitement la composition des murs des bâtiments, pour plusieurs raisons :

1) la qualité des prédictions des bases de données pédologiques,

2) les choix de transformation des données pédologiques, notamment pour les données DoneSol3 (vecteur-STU, vecteur-SMU).

3) le fait que ce ne sont pas toujours les sols sous-jacents qui sont employés dans la construction

4) l'incertitude sur la profondeur d'extraction du sol.

Dans une première analyse, nous avons comparé des analyses d'échantillons de terre prélevés dans 22 bâtiments Rhône-Alpins composés de pisé vernaculaire pré-industriel (Rojat et al. 2020). Aux quatre incertitudes déjà décrites, s'ajoute alors 5) la différence entre les méthodes de mesure des propriétés

pédologiques pour les échantillons de pisé et pour les échantillons de sols dans les bases DoneSol3. Dans cette comparaison, plus les corrélation entre les propriétés des échantillons et celles extraites de la base de données sont intenses, moins ces 5 biais sont impactants. Les résultats montrent dans l'ensemble une corrélation existante mais relativement faible entre les données granulométriques extraites et les propriétés mesurées (2.4), et une absence de corrélation entre les données de CEC de DoneSol3 et les mesures de VBS des échantillons de pisé. Cela indique que pour dépasser les incertitudes liées à la méthode et aux données, un nombre de 22 échantillons est 1) à peine suffisant pour que les tendances observées sur la granulométrie représentent effectivement les sols employés ; et 2) peut-être insuffisant pour les données type CEC, bien que VBS et CEC soient difficilement comparables. Puis, dans les résultats des analyses sur le patrimoine bâti dans 4 régions et pour 4 techniques-type, nous avons observé qu'à partir d'une centaine d'échantillons les tendances de choix préférentiels pouvaient se révéler pour les variables de granulométrie, a l'exemple du transect unique réalisé en Bretagne (Figure 107).

6.3.1.1 Données pédologiques : DoneSol3 comme référence, mais GlobalSoilMaps se défend dans la facilité d'emploi

Pour la granulométrie, les données issues de DoneSol3 (vecteur-STU et vecteur-SMU) montrent de meilleures corrélations avec les données mesurées sur les échantillons de pisé Rhône-Alpins que GlobalSoilMaps (GSM), et encore plus que SoilGrids (SG).

Pour la Bretagne, la source de données raster-STU, représentant directement les STU du RRP Breton, est considéré dans cette étude comme l'information de référence. Comparé à raster-STU, la version vecteur-SMU de DoneSol3 aux valeurs pédologiques moyennées par SMU présente des résultats dont nous doutons de la fiabilité pour le croisement avec des données patrimoniales. En effet, le moyennage des données par SMU rapproche artificiellement les données de texture de sols « équilibrés » : la moyenne est bonne, mais l'étendue des valeurs est fausse. Pour ce type d'utilisation des données DoneSol3, une extraction aléatoire d'une STU par SMU pour chaque bâtiment (vecteur-STU) semble plus pertinente car les valeurs des variables pédologiques correspondent à des vrais sols. Utiliser cette méthode nécessite cependant un échantillon de bâtiment conséquent afin de ne pas subir l'effet de l'aléa. La méthode employée par Hamard et al. (2018) consistait à « distribuer » les bâtiments en terre et Vernaculaires aux STU de manière proportionnelle à leur surface dans les SMU ; ici, on distribue les STU aux bâtiments, introduisant une composante aléatoire ; mais le résultat est le même lorsque le nombre d'échantillons tend vers l'infini, ce qui peut être réalisé artificiellement par réplication du nombre d'échantillons. En pratique, dès l'emploi des 22 échantillons de pisé en Rhône-Alpes pour comparaison avec les données pédologiques, l'impact du choix aléatoire de STU s'est montré négligeable. Il y a en général trois ou quatre STU par SMU : un échantillonnage d'un ordre de grandeur supérieur à ce nombre (une vingtaine semble un minimum) permet une bonne répétabilité des résultats par choix aléatoire.

GlobalSoilMaps (GSM) donne de bons résultats dans nos études: les résultats sont la plupart du temps en accord avec vecteur-STU et raster-STU, et présentent une très faible variabilité ce qui a l'avantage de faciliter la lecture. Cependant, cela nous fait émettre des doutes sur la fiabilité des données quant à la capacité à appréhender la variabilité des sols localement. Notamment, les densités bâties relativement aux teneurs en éléments grossiers (F2000µm_D) de GSM sont rarement les mêmes que vecteur-STU. La variabilité ultra-locale de cette propriété n'est peut être pas bien appréhendée par ce modèle raster, comme déjà remarqué dans la littérature (Mulder et al. 2016; Lemercier et al. 2022). Les données GSM-France relatives aux éléments grossiers sont ainsi peut-être adaptées à un usage de l'échelle hexagonale et moins pertinentes à l'échelle régionale. Pour les autres propriétés, tout constat

d'une relation lisse et claire entre les propriétés du sol et le choix technique doit se faire en connaissance de ces biais potentiels.

Dans les résultats de cette étude, SoilGrids semble combiner les désavantages de vecteur-SMU et GSM: d'une part les données son « moyennées », peut-être parce que développées à partir des des données vecteur-SMU ; d'autre part elles sont très fortement lissées, ce qui ne leur donne une variabilité qu'au delà de l'échelle régionale et ainsi ne capturent pas la variabilité locale. La faible acuité locale de SoilGrids a été remarquée par l'étude de (Lemercier et al. 2022). Finalement, SoilGrids ne semble pas adaptée à l'étude des choix techniques de terre crue, en tout cas pas à l'échelle d'un territoire comme la France hexagonale. Son emploi possible pour un travail similaire mais à une plus grande échelle (continentale) reste incertain.

6.3.1.2 Sol sous-jacent

Même si nous disposions de données pédologiques idéales, il est probable que l'incertitude sur la distance d'extraction de la terre apporte un fort aléa dans les résultats pour des bases de données patrimoniales d'ampleur inférieure à plusieurs centaines d'échantillons-bâtiments.

Lorsque nous avons observé des bâtiments aux compositions fortement contradictoires avec les recommandations de composition des terres de la littérature, nous avons mené des enquêtes cartographiques plus détaillées sur les sols alentours (Figures 102 et 103). L'une des enquêtes montre des bâtiments en pisé à CEC supérieures à 300 $g.kg^{-1}$. Pour ces bâtiments, on peut confirmer qu'il ne s'agit pas d'une erreur liée à l'incertitude de la distance d'extraction de la terre, car ils sont bâtis sur un plateau sédimentaire aux sols relativement homogènes.(Figures 102). L'autre enquête portant sur des bâtiments composés de bauge reposant sur des unités pédologiques de sols « sableux »montre qu'il est probable que les terres employées aient été transportées depuis des unités pédologiques plus limoneuses très proches, à moins de 500m, et situées en amont dans la topographie ce qui aurait pu faciliter leur transport.

A l'observation de la forte dispersion des densités relatives pour les techniques de briques de terre crue (p. ex. Figure 109) nous avons suggéré qu'au moins une partie de cette variabilité pouvait être due à l'incertitude sur l'emploi du sol sous-jacent au bâtiment, car ces techniques sont favorables au transport de la terre. L'incertitude sur le sol sous-jacent est donc d'autant plus probable pour les techniques adaptées au déplacement de la ressource (p. ex. adobes), mais ce peut l'être également pour des techniques massives (Hamard, Cammas, et al. 2016) (Chapitre 3A, 7.1) comme nous l'avons repéré pour les bâtiments en bauge du transect au sud-est de la Seine-et-Marne (Figure 103).

De cet ensemble de résultats, nous pensons que de manière générale dans notre étude, l'incertitude sur la distance d'extraction est négligeable dans la plupart des cas devant l'incertitude sur les données pédologiques. Cependant, il existe des exceptions qui peuvent concerner plusieurs dizaines de bâtiments dans un même pédopaysage. Ainsi, les croisements de données pédologiques et patrimoniales spatialisés doivent employer de grandes quantité d'échantillons de données géolocalisées, croiser différents contextes pédogénétiques et si possible plusieurs sources de données pédologiques indépendantes pour éviter d'être induit en erreur par des artefacts locaux. D'autre part, la validation par visualisation cartographique des observations apporte beaucoup aux résultats qualitatifs. Enfin, une bonne connaissance des cultures constructives des techniques étudiées mais également des autres techniques des régions étudiées est indispensable pour l'interprétation des résultats.

6.3.1.3 Profondeur d'extraction

Lorsque l'on compare la corrélation entre les données pédologiques et les données des échantillons de pisé pour différentes profondeurs d'extraction des données pédologiques, on constate l'existence d'un optimum de profondeur maximisant la corrélation pour l'ensemble des propriétés de granulométrie, autour de -45cm de profondeur (2.6). Cela suggère que cette profondeur peut représenter la profondeur d'extraction moyenne des terres utilisées par les constructeur.ices vernaculaires pré-industriels dans la région d'étude (située en Rhône-Alpes). Mais cette profondeur « optimum » dans les résultats a pu être influencée par le choix préférentiels d'autre sols que les sols sous-jacents.

6.3.2 La densité bâtie comme marqueur de choix préférentiel

Observer l'influence des paramètres des terres sur les choix techniques et réalisant des statistiques sur des bâtiments composés de terre crue ne permet de tirer des conclusions valides qu'à certaines conditions. Analyser des densités de bâtiments en terre *relativement* à la distribution des bâtiments vernaculaires construits en d'autres techniques de construction permet de réduire le biais d'*installation préférentielle des populations* mais également celui lié à *l'échantillonnage des sols* de la région d'étude. Maîtriser l'échantillonnage des bâtiments en terre peut permettre de réduire ces biais mais reste difficile à mettre en place. A minima, une représentation de la diversité des propriétés des sols est nécessaire pour réduire le *biais d'échantillonnage*.

6.3.3 Données de densité : une information de qualité nécessaire mais peu disponible

Dans cette étude, nous avons comparé plusieurs données pouvant représenter cette « densité bâtie générale »: des bases de données permettant de représenter directement la densité bâtie vernaculaire historique (Services de l'inventaire du patrimoine), la distribution contemporaine des bâtiments via la base de données OpenStreetMap testée dans le but d'observer son potentiel pour représenter la densité bâtie vernaculaire, et la simple comparaison avec les données de distribution des propriétés des sols (points-bâtiments « Aléatoires »).

La distribution « Vernaculaire » est certainement la meilleure information possible. Sa qualité est cependant dépendante de l'adéquation entre la méthode d'échantillonnage des bâtiments en terre et des bâtiments Vernaculaires.

Les données OpenStreetMap permettent d'atténuer l'effet des biais d'installation préférentielle, mais pas de les supprimer. En effet, l'intensité de l'effort de construction contemporain a noyé les dynamiques d'installation préférentielle vernaculaires préindustrielles derrière une installation dont la dynamique est peut-être aléatoire vis-a-vis des propriétés pédologiques. En ce sens, OSM est un peu plus performant que Aléatoire, mais l'utilisation conjointe des deux données apporte un complément d'information intéressant.

Nous avons montré qu'en l'absence de données vernaculaires convenables mais en présence de territoires où sont présentes plusieurs techniques-type, il est cependant possible de réaliser une analyse où la distribution « vernaculaire » est représentée par l'ensemble des bâtiments en terre (5.2.2). Cependant ce type d'analyse ne permet pas de visibiliser les interactions des techniques de terre avec les autres techniques constructives (pierre, brique cuite, etc.), seulement les dynamiques relatives des techniques-types de terre entre elles, ce qui limite la portée des résultats. Nous l'avons donc plutôt considérée comme un complément d'analyse.

Lorsque la cartographie du patrimoine bâti en terre crue est réalisée par transects, la trace GPS du parcours a permis le tri des données OSM par analyse de visibilité des bâtiments. Avec cette méthode, nous pensons que la densité bâtie relative est plus performante qu'avec une simple méthode limitant les données de densité à une distance D du point-bâtiment collecté. Mais nous n'avons pas réalisé de comparaison directe avec des données filtrées à la même distance et sans analyse de visibilité, ce qui aurait pu valider le gain d'acuité permis par cette méthode et s'il vaut la complexité algorithmique apportée.

Pour les comparaisons de la densité relative de bâtiments en terre par rapport aux Vernaculaires, OSM ou aléatoire, il est indispensable de bien appréhender la notion d' « effet de bord », qui nécessite d'une part l'établissement de seuils minimums de quantité de données pour calculer des densités relatives, et d'autre part nécessitent un bon dimensionnement de la distance D dite « de connaissance » qui correspond à la distance de captage des bâtiments vernaculaires autour des bâtiments composé de terre. Les facteurs menant à un choix raisonné de D et ce qu'elle représente réellement n'est pas certain et nécessite plus d'investigations.

6.3.4 Bâtiments composés de terre crue : maîtriser l'échantillonnage

Les données de bâtiments en terre localisées doivent être à la fois d'une quantité suffisante et d'une bonne cohérence dans la méthode d'échantillonnage. Des tendances peuvent être observables localement parfois dès quelques dizaines de points, mais dans l'ensemble, capturer des vraies relations inter-techniques nécessite une analyse représentative de toute une région partageant des cultures constructives partagées. Comprendre une distribution des techniques de terre chacune directement en lien avec leurs propriétés de facilité de mise en œuvre indépendamment du reste du contexte constructif nécessite de grandes quantités de données distribuées sur plusieurs régions pédogénétiques et culturelles. Pour de telles études locales ou de plus grande échelle, une attention devra être donnée à la maîtrise des méthodes d'échantillonnage.

Dans cette étude, sur l'ensemble des données initialement disponibles (Tableau 8) nous n'avons utilisé finalement que les données issues de l'inventaire du patrimoine de Bretagne, les données de la Piséthèque en Rhône-Alpes ainsi que nos transects. Lorsque nous avons tenté re rajouter les autres sources de données au traitement, il n'est pas apparu d'amélioration de la qualité des corrélations observées. En effet, pour les autres sources de données, nous ne maîtrisons pas l'échantillonnage réalisé, et il est probable que de ce fait la variabilité apportée dépasse l'amélioration statistique d'apport de nouvelles données.

Pour obtenir de grandes quantités de données rapidement et en maîtrisant la méthode d'échantillonnage, l'emploi de la méthode par transect se révèle performante, mais elle pourrait peut-être présenter de meilleurs résultats en équilibrant l'intensité des relevés entre les différentes zones d'études : ici, les données issues des transects réalisés en Occitanie et en Champagne-Ardenne dominent pour l'adobe ; l'Ouest domine pour la bauge, la Limagne domine pour le pisé.

6.3.5 Perspective méthode

Cette méthode d'étude des liens entre choix techniques et variables « environnementales » n'est pas spécifique à la construction en terre crue et aux variables pédologiques. Elle pourrait être réalisée pour d'autres techniques de construction que la terre crue, dans d'autres contextes, et en considérant d'autres paramètres. Plusieurs perspectives restent ouvertes pour approfondir l'analyse et améliorer la méthode.

6.3.5.1 Approfondir les analyses

6.3.5.1.1 Analyse de visibilité depuis le transect

Cette méthode a été complexe à développer, mais peut aisément être reproduite. Sélectionner uniquement les bâtiments ayant été observés au cours du transect permet de réduire significativement la taille des jeux de données traités et améliore probablement l'acuité des résultats. Il serait intéressant de comparer l'acuité d'un traitement « simple » limitant les bâtiments étudiés à D km autour des bâtiments en terre, comme réalisé pour la bauge, avec un traitement par analyse de visibilité. Cela permettrait de quantifier l'apport de cette méthode et de le mettre en balance avec la complexité algorithmique apportée.

6.3.5.1.2 Modéliser les choix techniques pour faciliter des traitements statistiques

Pour l'ensemble des variables pédologiques étudiées, les analyses qualitatives que nous avons réalisées gagneraient à être validées par des tests statistiques adaptés. Peut-être que ceux-ci permettraient de quantifier la part de variabilité des choix techniques qu'apportent chacune des variables pédologiques, ce que l'analyse qualitative ne permet pas de conclure. Des traitements statistiques pourraient aider à l'optimisation des choix des paramètres de modélisation, de manière plus performante et robuste que nos méthodes de mesure d' « acuité ». Mais les corrélations densité relative/propriétés pédologiques ne semblent pas vraiment linéaires et les modèles statistiques que nous connaissons n'y sont pas adaptés. Ce travail nécessiterait donc de proposer des modèles de prédiction multivariés et non linéaires et de les optimiser sur les données. C'était initialement l'objectif des analyses des chapitres 2 et 3. Mais une modélisation mécaniste, partant des propriétés du sol jusqu'aux choix techniques, s'est révélée trop complexe dès l'échelle des propriétés mécaniques du matériau, ce qui rend impossible le passage à l'échelle des procédés, et encore moins à l'échelle des choix techniques intégrés dans les contextes constructifs. Un « modèle-expert » serait peut-être plus adapté ici, établi en concertation avec des expert.es de la maçonnerie terre crue.

6.3.5.2 Apporter de nouvelles données sur la terre

6.3.5.2.1 Analyser les variations des techniques-types

Les techniques repérées sont regroupées en techniques-types plus générales. Ce regroupement cache peut-être des variations internes à chacune des techniques-types. Visibiliser les « sous-techniques-types » permettrait peut-être d'aider à l'interprétation de l'adéquation aux propriétés du sol des procédés :

- en situant les « techniques intermédiaires » : l'adobe en pan de bois comme intermédiaire entre torchis et adobes ; les gros adobes comme intermédiaires entre adobes fins et bauge ; le caillebotis comme intermédiaire entre bauge et adobes ; etc.

- en détaillant les techniques-type : différentes tailles d'adobes pourraient montrer une dynamique différente vis-a-vis de la fraction « argileuse » (F2µm) du fait de l'impact du retrait au séchage.

Nous disposons du détail sur ces techniques pour certains bâtiments, mais il n'est pas certain que le nombre soit suffisant pour laisser apparaître des tendances. Au moins quelques centaines d'échantillons de chaque sous-technique-type (p. ex. adobes fins, adobes gros) seraient nécessaires pour dépasser l'aléa lié aux données pédologiques ou au contexte constructif. D'autant plus que les variations se situeraient sur des intervalles de propriétés réduites, au sein même des intervalles observés de la technique-type investiguée (p. ex. adobes).

6.3.5.2.2 Affiner l'« intensité » de l'emploi de la terre

Par le relevé cartographique, il est possible de relever des variables architecturales supplémentaires à la présence des techniques de construction en terre crue. Par exemple, nous avons relevé dans certains transects la hauteur des éléments composés de terre crue et leur épaisseur. Ces données pourraient indiquer un degré de maîtrise de la technique et/ou une qualité de terre à bâtir plus adéquate autorisant des élancements plus conséquents. Hueto-Escobar et al. (2022) ont montré une relation entre l'étendue des débords de toiture et la pluviométrie locale. Peut-être pourrions-nous analyser ce type de paramètres architecturaux en relation avec les propriétés pédologiques. En effet, il est possible que ce ne soit pas dans le choix de la technique-type mais dans l'aménagement architectural globale qu'a résidé le succès de l'adaptation des cultures constructives à l'emploi de la terre, comme le suggèrent les constructeur.ices contemporain.es (CCTC 2018).

Dans la même thématique, une catégorisation des typologies d'édifices (fermes, maisons urbaines, bâtiments publics, religieux, etc) permettrait d'illustrer les dynamiques de choix préférentiels selon la position sociale des constructeur.ices.

6.3.5.2.3 Apporter de nouvelles variables pédologiques

Dans l'interprétation des résultats, quelques variables pédologiques supplémentaires pourraient se révéler utiles :

- une discrimination de la taille des éléments grossiers. Au delà de deux millimètres, on pourrait diviser les catégories d'impacts sur les terres en au moins deux classes : l'une plus fine, les graviers, représentant la continuité du « squelette » dans les éléments composés de terre crue et ne présentant pas de contre-indication majeure avec la plupart des techniques ; l'autre plus grande, les cailloux et pierres, représentant à la fois une gêne potentielle pour certains procédés ainsi qu'un potentiel d'emploi pour bâtir en pierre maçonnée. Présente dans les données DoneSol3, il pourrait être intéressant de traiter cette donnée ; mais son renseignement sporadique dans les bases de données ainsi que la grande variabilité des résultats des STU aléatoires (vecteur-STU) ne laisse pas beaucoup d'espoir quant à sa valeur ajoutée.

- la forme des éléments grossiers : celle-ci aurait un impact sur la résistance et la compactabilité des éléments de pisé (Koutous & Hilali 2019b). Quelques informations sont présentes dans la base de données DoneSol3. Cela permettrait peut-être d'affiner les résultats relatifs à la teneur en sables ou éléments grossiers.

- le matériau parental du sol : cette information est systématiquement présente dans la description des STU. Elle pourrait suggérer des informations sur la minéralogie du sol, fortement gouvernée par le matériau parental (Chapitre 2, 3). Elle pourrait également être employée comme donnée précisant le « potentiel de construction en pierre », éventuellement conjointement avec la profondeur du sol, afin de discriminer ce qui relève de la préférence pour la pierre et de l'aisance de mise en œuvre de la terre. Enfin, si cette variable se révélait discriminante quant aux potentiels techniques des sols pour construire en terre crue, elle permettrait d'appuyer le potentiel de déploiement de la filière terre dans des zones sans couverture pédologique, car les cartes géologiques couvrent plus de territoire que les cartes pédologiques (Chapitre 3A, 4.1).

6.3.5.3 Apporter des nouvelles données de contexte

Afin de discriminer l'influence de la composition des sols de l'influence du reste du contexte constructif sur les choix techniques, d'autres variables explicatives sont à envisager :

- le climat : en forte interaction avec la teneur en eau du sol, ainsi que les contraintes météorologiques sur les éléments construits et leur durabilité, ou sur les besoins de performances hygrothermiques, l'influence du climat sur les choix techniques est inévitable et probablement conséquente. Nous n'avons pas pu mener à terme les essais d'intégration de la teneur en eau du sol au cours des saisons dans l'analyse des variables pédologiques, mais nous soupçonnons fortement cette variable d'être un paramètre décisif dans le non déploiement de cultures constructives du pisé dans certaines régions (Chapitre 3A, 3.4.1). Par exemple, l'évaluation de la durée de la saison pour laquelle la teneur en eau du sol est inférieure à sa limite de plasticité d'Atterberg (Chapitre 2, 5.2.3) pourrait indiquer l'étendue de la saison pour laquelle le matériau est « ouvrable » pour le pisé.

- le couvert forestier historique : plusieurs références (Chapitre 3A, 3.4.3) mentionnent l'influence des pénuries de bois sur le déploiement des techniques de construction en terre crue porteuse. A l'inverse, la ressource en bois est gage de déploiement des techniques de pan de bois. Dans une analyse comparant ces deux catégories de bâtiments en terre, la proximité du couvert forestier à l'époque de construction des bâtiments pourrait fournir des explications qualitatives ou quantitatives aux intensités bâties en terre de certains contextes spatio-temporels. Un piste intéressante est la vectorisation en cours des cartes de l'état-major, permettant peut-être prochainement ce type d'analyse quantitative ; en attendant, leur emploi qualitatif pourrait déjà se révéler intéressant.

- le contexte urbain/rural : nous avons relevé l'influence capitale de ce facteur sur les choix techniques, probablement pour toutes les époques. D'autre part, ce facteur est influent sur la réussite de la présente méthode d'évaluation de la densité relative : le masquage du gros œuvre et la destruction du patrimoine étant favorisé en milieu urbain (Mileto et al. 2019) (Chapitre 3A, 5.3.1.3.2), un aléa est introduit dans la relation entre sol et occurrence du patrimoine bâti en terre au niveau du repérage des bâtiments. Une donnée de densité bâtie autour des points-bâtiments en terre, intégrée en tant que variable explicative, permettrait probablement une bonne première approche de cette information. Pour cela, des données de bâtiments « Vernaculaires » de qualité seraient indispensable ; la densité bâtie OSM étant peut-être insuffisante pour représenter celle de l'époque.

- les espaces-temps culturels sont impossible à appréhender quantitativement. Un travail de compréhension du contexte historique multi-échelle de chaque région serait nécessaire pour comprendre ce qui a pu favoriser le déploiement des techniques de terre, au-delà des variables « environnementales », comme le travail de Mille (2023). Peut-être que de fortes limites culturelles pourraient cependant être représentées par la cartographie des langues locales : Pustoc'h (2020) suggère que la limite ouest de déploiement de la bauge en Bretagne pourrait avoir un lien avec la délimitation entre les territoires Breton et Gallo. Des « limites de déploiement géographique » de la terre crue pourraient être comparées à l'atlas culturel dédié du CNRS[48].

- Comme suggéré par Ford (2002), la méthode est utilisée pour les techniques de terre crue mais elle pourrait aussi être intéressante pour d'autres matériaux de construction. Décrire en parallèle l'intensité bâtie en différentes techniques-types de construction en pierre et en briques cuites pourrait éclaircir les relations que ces techniques ont avec les cultures constructives de la terre crue.

6.3.5.3.1 Développer le volet cartographique

L'observation directe de la densité relative selon les variables pédologiques est une première étape permettant de dégager des tendances et de démontrer le potentiel de la méthode. Nous avons vu que dès lors qu'un artefact ne coïncide pas avec ce que nous attendions dans la corrélation sol-technique, l'analyse cartographique directe apporte des éléments de discernement d'importance capitale. Le

48 https://atlas.limsi.fr/

volet de représentation cartographique des densités relatives mériterait d'être exploré, afin d'enquêter directement en observant les cartes.

En effet, de nombreux facteurs autres que les propriétés de la terre impactent les choix techniques (Chapitre 3A, 3.4), et certains peuvent être visibles sur des cartes et justifier des corrélations entre propriétés du sols et choix technique par l'occurrence de phénomènes spatiaux particuliers : un couvert forestier dense pourrait favoriser les techniques de torchis (Chapitre 3A, 3.4.3), la topographie peut favoriser ou non le transport de la ressource (Chapitre 3A, 7.1), ou encore la position en centre urbain ou à proximité des centres urbains qui a de nombreux impacts sur les choix techniques (Chapitre 3A, 3.5.7). Nous pourrions rechercher des données et des méthodes permettant d'intégrer ces facteurs dans une analyse quantitative, via leur extraction au niveau des points-bâtiments. Mais en l'absence de données quantitatives spatialisées sur ces variables, leur simple observation géographique peut apporter beaucoup de discernement à l'occurrence des techniques de construction en terre crue dans l'espace.

6.3.5.4 Préciser l'analyse de visibilité

L'avantage des méthodes d'analyse numérique est que chaque étude repose sur des algorithmes déjà réalisés au cours des études précédentes, et nous pouvons ainsi affiner chaque fois les méthodes. L'analyse de visibilité pourrait également être améliorée. Nous pourrions :

- prendre en compte le couvert végétal pour améliorer la mesure de visibilité

- considérer la direction de circulation au cours des transects comme facteur d'influence. Il est possible que selon son azimut, nous ayons moins bien repéré les éléments de terre crue des façades se présentant « derrière nous ». Ainsi, la direction pourrait apporter un biais. Une évaluation conjointe de la distribution des éléments en terre selon l'exposition des façades et de la visibilité selon l'angle de circulation permettrait de vérifier l'importance potentielle de ce biais.

6.3.5.5 Cartographie et étude du patrimoine bâti en terre : mettre en commun l'information pour visibiliser le patrimoine vernaculaire ?

Le patrimoine vernaculaire bâti en terre est « invu » : c'est à dire qu'il n'est pas invisible, mais que sa présence est peu remarquée dans de nombreuses régions, comme le suggère Aras-Gaudry (2023) pour le bâti Champenois. Cette *invision* est d'autant plus marquante que partout sont valorisés certains éléments de patrimoine d'« exception », bâtiments et monuments justement « hors du commun », donc finalement souvent hors du vernaculaire. Ceux-ci sont rarement bâtis en terre crue. Pourtant, ces ouvrages exceptionnels sont justement bien souvent à l'image des classes sociales dominantes de l'époque (Álvarez Mora 2013). Ne témoignent-ils pas du luxe et de l'exploitation des mondes de leur époque ? Si c'est le cas, on peut se demander si leur glorification et l'oubli de l'ouvrage des « petites gens » n'est pas la glorification de la violence de l'exploitation qu'ils peuvent symboliser (Davis & Peronny 2021:23).

Par ailleurs, des travaux comme cette présente étude nous montrent que le patrimoine vernaculaire est une bibliothèque de savoirs empiriques*, éprouvés au fil des générations et présentant de ce fait des adaptations non négligeable à l'environnement local par influence d'une *rationalité paysanne** (Hamard 2017; Rojat et al. 2020). La lecture du patrimoine bâti permet de remettre à la lumière ces savoir-faire, perdus au cours du XXe siècle, noyés dans l'abondance énergétique et le déploiement précipité des techniques industrielles*. L'étude de la composition des terres et sa mise en lien avec le choix technique est un angle de lecture du patrimoine, mais bien d'autres sont possibles. L'étude, et au moins temporairement la protection, du patrimoine vernaculaire est donc au moins aussi importante

que celle du patrimoine « d'exception » : il représente la vraie histoire des peuples, et serait sources de savoirs-faire pour les peuples futurs renouant avec des pratiques frugales de subsistance.

Visibiliser ce patrimoine et recenser son importance peut être un gage de préservation. Le rendre « remarquable » peut aider à ce qu'il soit remarqué. Le présent travail d'étude statistique nécessitant une masse de données significative pour son bon déroulement, nous avons réalisé un travail de repérage cartographique conséquent, participant à la collecte d'informations sur le patrimoine bâti en terre. Ce fut également l'occasion de se rendre compte de la disparité de l'information le concernant. Le travail réalisé par les services publics d'inventaire du patrimoine bâti régionaux ou départementaux ne couvre hélas pas l'ensemble du territoire. Des chercheur.euses et/ou passionné.es (n'est-ce pas la même chose?) disposent dans leurs tiroirs d'inventaires locaux du patrimoine bâti en terre. Des habitant.es se sont montré.es enthousiastes à l'idée de nous transmettre leurs connaissances du bâti local et de participer à leur échelle à notre enquête.

C'est pourquoi le présent travail cartographique a débouché sur la volonté de créer un inventaire du patrimoine bâti en terre par la construction d'un outil commun permettant la cartographie du patrimoine bâti. Ce travail est en cours, et nos essais de cartographies réalisés dans le cadre de différents travaux d'enquête architecturale ont permis d'éprouver des formes de bases de données potentielles. Dans la dynamique des sciences dites « participatives », un tel outil devra inclure les personnes intéressées au-delà de la sphère académique : d'une part, parce que l'essentiel des connaissances à ce sujet est entre les mains des non-académicien.nes, et d'autre part parce que la participation à ce type d'enquête pourrait être un bon moyen d'entraîner activement chacun.e dans la visibilisation du patrimoine bâti de son quotidien.

7 Conclusion des chapitres 3A et 3B

Le choix d'une technique de construction est ancré dans un *contexte constructif*, composé de l'éco-socio-système dans lequel les constructeur.ices construisent. Un travail bibliographique traitant des influences potentielles de divers facteurs socio-environnementaux sur les choix techniques pré-industriels a permis d'en décrire les principaux facteurs. Il n'est pas holistique, et sa vocation « universelle » est limitante car l'influence culturelle doit être appréhendée localement. Mais il permet de visibiliser un ensemble de facteurs importants à considérer lorsqu'un phénomène social comme le choix d'une technique de construction est étudié avec l'approche naturalisante du Génie Civil et des sciences des matériaux.

L'environnement matériel a pu être d'influence majeur, car en l'absence de systèmes de transports de masse, la disponibilité immédiate de gisements de matériaux et leur qualité a pu gouverner les choix techniques. C'est en cela qu'un certain déterminisme environnemental a pu être suggéré par de nombreux.ses auteur.ices. Mais les techniques de construction sont fortement ancrées dans des mécanismes socio-historiques dont l'influence sur les choix techniques a pu déformer voir masquer l'influence de l'environnement. Par exemple, localement, la domination économique permet de s'abstraire de la rationalité paysanne* et choisir des techniques de « luxe » ; ou plus largement, l'inclusion de l'économie constructive dans l'ensemble des activités de subsistance (agriculture, économie) a pu favoriser les techniques se montrant les mieux adaptées à chaque contexte culturel spécifique. Les cultures constructives de l'adobe semblent particulièrement ancrées dans les systèmes socio-économiques du fait de la préfabrication des éléments, qui permet de déplacer dans le temps et l'espace la majeure partie du travail de façonnage et rend possible leur commerce, voir la centralisation de leur production.

Les bâtiments que l'on observe aujourd'hui ont pour la plupart été bâtis au cours de l'époque moderne. Durant cette période, la croissance énergétique et le déploiement de nouvelles techniques a progressivement mais profondément transformé les usages vernaculaires, dont les techniques de construction. C'est dans une superposition d'époques, aux usages en perpétuel changement, que nous cherchons aujourd'hui la trace des déterminismes environnementaux sur les choix des techniques de construction en terre crue. Nous supposons que l'augmentation de la disponibilité énergétique et technique est 1) favorable à un déracinement de l'environnement matériel, pouvant masquer le déterminisme environnemental, particulièrement à l'approche du XXe siècle ; 2) favorable aux techniques gourmandes en énergie externe* comme la brique cuite, la chaux ou la pierre de carrière, donc défavorable aux pratiques de cueillette* comme la pierre de champ et les techniques de terre crue en général, mais peut-être pas équitablement pour toutes. Cependant, la complexité des changements techniques du bâtiment ne nous permet pas d'universaliser ces tendances avec certitudes sur notre espace-temps d'étude, la France hexagonale* pré-industrielle.

Par le passé, plusieurs auteur.ices ont tenté de démontrer le déterminisme des propriétés des sols sur l'occurrence du patrimoine bâti en terre crue. Une analyse rigoureuse des méthodes employées suggère que dans de nombreux cas, d'importants biais ont été négligés et mènent à des conclusions trop radicales. Ces biais peuvent être liés aux méthodes d'échantillonnage du bâti en terre, à la mauvaise prise en compte du biais de densité bâtie (l'*installation préférentielle*), ou encore à l'absence de considération pour les intercorrélations entre variables environnementales.

La méthode de croisement développée pour ce travail s'inspire de la méthode de Hamard et al. (2017; 2018). Convertie en calculs algorithmiques, elle gagne en flexibilité et peut ainsi être adaptée à diverses données pédologiques et patrimoniales. Plusieurs jeux de données ont été testés. L'usage de données de couvert bâti « tous matériaux » s'est révélé indispensable pour interpréter la distribution du patrimoine bâti en terre crue. Pour cela, l'idéal est de disposer de bases de données patrimoniales spécialisées, mais nos analyses montrent que les données OpenStreetMap peuvent s'avérer satisfaisantes si employées en connaissance de leurs biais potentiels. La qualité des données pédologiques est probablement la variable la plus limitante, car des erreurs sur la répartition des sols de quelques centaines de mètres peuvent induire en erreur dans l'interprétation des résultats.

L'analyse des résultats de croisement de données est prudente, du fait de la présence de nombreux biais d'interprétations possibles, et de la sensibilité du sujet au-delà du champ académique de la terre crue (Chapitre 1, 1.3).

En ce qui concerne l'occurrence des techniques de terre crue dans le patrimoine bâti, nous avons observé quelques tendances claires:

- la bauge se déploie plus intensément dans les sols limoneux et profonds. Aisés à homogénéiser et modeler, ils garantissent un procédé peu gourmand en travail;

- l'adobe, comparée aux autres techniques-type de terre crue, est la plus favorable aux sols cohésifs. Ces terres nécessitent beaucoup d'eau pour être façonnées et apportent du retrait au séchage, et les petits éléments moulés facilitent le retrait dimensionnel plutôt que la fissuration. Mais l'occurrence des bâtiments en adobes couvre une grande diversité de sols, pour deux raisons 1) la grande versatilité de cette technique-type*, 2) l'impact du transport qui apporte beaucoup de variabilité dans les sols sous-jacents aux bâtiments considérés par notre méthode d'analyse.

- le pisé se déploie sur une grande diversité de sols, des plus grossiers aux plus cohésifs, mais n'est jamais rencontré sur sols très limoneux. Les sols limoneux n'apportent pas une cohésion satisfaisante lorsque la terre n'est pas pétrie à l'état plastique ou supérieur. Contrairement à la bauge, le pisé ne semble pas fortement affecté par la profondeur du sol : peut être du fait que les sols grossiers n'y

soient pas défavorables, ou par une désirabilité culturelle compétitive face à la pierre lui permettant de la concurrencer même en présence de gisements de pierre accessibles.

- pour le torchis, c'est la présence de fraction fine*, donc de cohésion, qui semble importer : plus la terre colle, plus il peut être fibré et aisément façonné. Les sols limono-argileux sont les plus représentés. Cela s'explique peut-être par le retrait au séchage des sols très argileux, ou par la concurrence avec l'adobe, technique compétitive avec les torchis dans ses usages constructifs en milieu urbain: parois construites rapidement et fines, adaptées à un besoin de légèreté des étages.

- pour l'ensemble des techniques, au moins une partie des bâtiments repérés repose sur des sols à granulométrie « équilibrée ». Il n'y a pas une seule technique qui serait adaptée à chaque terre, et dans la plupart des cas plusieurs techniques semblent possibles. Par ailleurs, toutes les « terres », à l'exception des sols extrêmement sableux ou sablo-limoneux que l'on appellerait plutôt « sables », présentent des bâtiments en au moins l'une des techniques-type étudiées. Finalement, si l'on définit la terre comme un « matériau meuble possédant des propriétés cohésives », alors il est tentant de conclure que d'un point de vue granulométrie, toutes les terres peuvent être favorables à la construction en terre crue. Cependant, le choix de construire en terre, et le choix de la technique, dépend de l'ensemble du contexte constructif, c'est à dire de ce qu'on a appelé l'« ouvrabilité holistique » au Chapitre 2.

Dans l'ensemble, les préférences *relatives* de techniques de terre crue en fonctions des propriétés du sol suivent les recommandations communément admises. On voit une succession pisé-bauge-adobe-torchis avec l'augmentation du passant à 2µm (passant « argileux) et de la CEC, variables représentant la cohésion de la terre ; et l'inverse pour la fraction F2000µm (sable). Pour les limons, l'enchaînement pisé-adobes-torchis-bauge n'est pas non plus surprenant. En revanche, les *valeurs* des paramètres pédologiques sont peu cohérentes avec les recommandations de la littérature, comme cela a pu être observé de nombreuses fois dans la littérature (Chapitre 1). La bauge est la plupart du temps bien plus limoneuse que le suggèrent les recommandations ; le pisé s'étend sur des plages de F2µm et de CEC bien plus conséquentes que celles habituellement recommandées ; les adobes semblent envisageables pour tout type de sol. Quant aux torchis, ils semblent faire rarement l'objet de travaux académiques.

Grâce à une attention minutieuse sur les potentiels biais de nos analyses, nous pensons que les conclusions tirées de nos résultats sont fiables, au moins en ce qui concerne nos régions d'étude. Cependant, nous manquons de données pour le pisé, et l'accès aux bases de données existantes pour le pisé en Rhône-Alpes pourrait beaucoup apporter à l'analyse. Nous disposons de peu de données relatives à la bauge hors Bretagne. Ce travail fut l'occasion d'expérimenter des méthodes de collectes de données relatives au patrimoine bâti en terre. Il appelle à la définition d'outils collaboratifs communs pour partager ces informations avec le plus grand nombre. Au delà d'un outil académique, il pourrait s'agir d'un outil de communication participant à un déploiement de la filière terre crue ancré dans les cultures vernaculaires historiques locales.

Les liens mécanistes entre propriétés des terres et choix technique sont complexes et difficilement modélisables (Chapitre 2). Par l'observation des corrélations bâti-propriétés du sol, on a malgré tout pu observer des tendances qui sont souvent cohérentes avec les propriétés que l'on pourrait suggérer d'après l'observation des gestes des constructeur.ices. Alors, si les recommandations actuelles de « convenance des terres » sont peu représentatives du patrimoine bâti (Chapitre 1), ce n'est pas que l'estimation de « convenance » est impossible à partir des propriétés mesurées en laboratoire. Mais il faut remarquer que :

1) toute estimation sera sujette à un aléa conséquent, et que en partie de ce fait

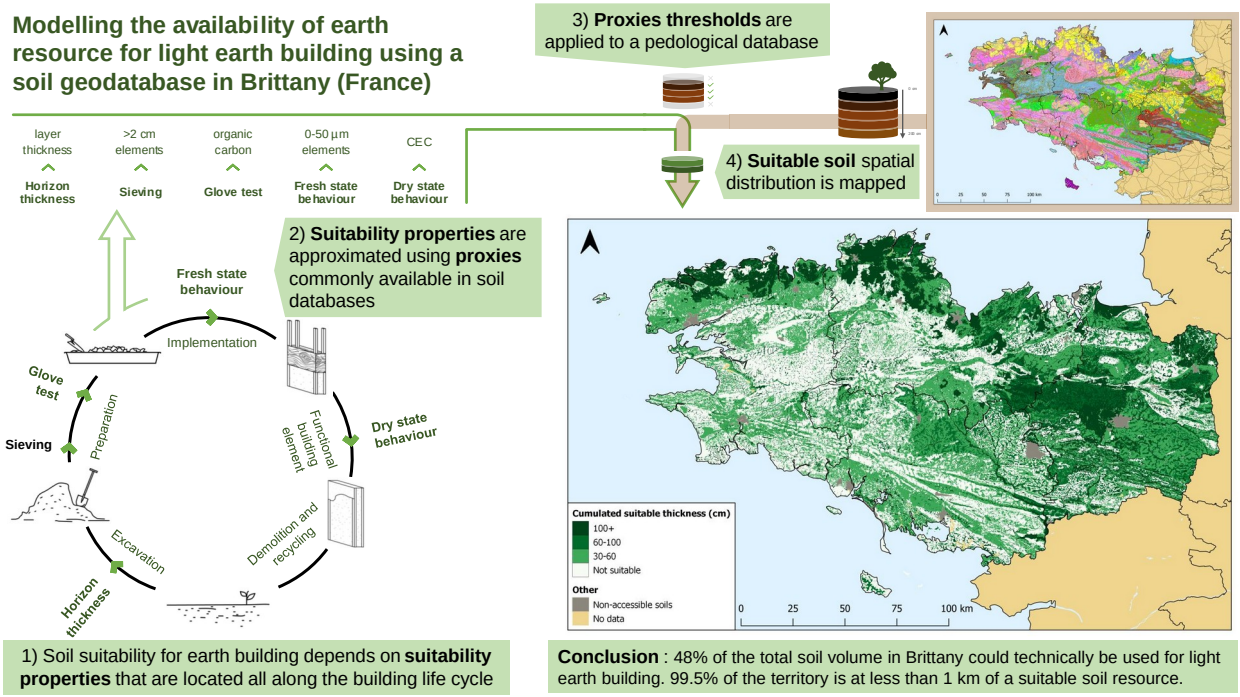
2) tout outil d'estimation devrait calibrée par un travail statistique de grande ampleur pour permettre d'établir des recommandations raisonnables.

La première remarque s'explique par la variabilité du contexte constructif. La diversité des contextes engendre un faible déterminisme relatif des propriétés de la terre par rapport au reste des enjeux des chantiers (hypothèse 3, Chapitre 1, 4). Les outils de prescription de choix des techniques de construction en terre crue à partir des propriétés du sol mesurées en laboratoire ne peuvent appréhender la dimension holistique des choix techniques, et ne peuvent qu'être *suggestifs* et non limitants. Nous avons indiqué que choisir les techniques sans considérer la terre à disposition était une approche « hors sol » difficilement soutenable. Mais ne considérer que la composition de la terre pour prescrire des choix techniques serait une réduction déterministe peu réaliste. Alors, faut-il intégrer le contexte constructif dans la modélisation, par des méthodes d'analyse de cycle de vie holistiques ? Ou faut-il sortir des approches de choix technique rationalisées et s'orienter vers des décisions « expert » par les constructeur.ices elleux-mêmes ? Le Chapitre 5 explore ces possibilités.

La seconde remarque éclaire notre seconde hypothèse (Chapitre 1, 4). Du fait de la forte variabilité des choix techniques, afin d'être en capacité de réaliser des prescriptions techniques à partir de propriétés de la terre mesurées en laboratoire, il serait nécessaire de calibrer les outils d'aide à la décision avec des milliers d'échantillons de terre effectivement mis en œuvre. C'est le cas dans notre étude, et les modèles développés pourraient être employés dans cette perspective. Mais la question de l'universalité des résultats, sa validité géographique et temporelle resterait incertaine, du fait des variations de cultures techniques et des pédopaysages dans l'espace et le temps. Surtout, si des outils d'aide à la décision étaient proposés, ils ne pourraient être *limitants* : plutôt que des prescriptions, ils pourraient fournir des *suggestions*. Dans les schémas organisationnels classiques du BTP conventionnel, ils pourraient être employés en amont des projets de construction, en mobilisant les données géotechniques disponibles pour diagnostiquer un potentiel pour la construction en terre crue. Les résultats seraient une première approche avant de mobiliser une équipe d'artisan.e expert.es pouvant effectivement prescrire les techniques adéquates. Par ailleurs, de telles suggestions présentent un intérêt politique dans l'évaluation des potentiels territoriaux pour la construction en terre crue, en évaluant les potentiels des sols pour les différentes techniques de construction. Le Chapitre 4 met en application une telle méthode.

Chapitre 4 : Cartographier les ressources : exemple pour la terre allégée

Les résultats présentés dans ce chapitre ont fait l'objet d'une publication dans la revue Resources, Conservation and Recycling *(Verron-Guillemot et al. 2022). Les algorithmes ont été publiés en accès libre (Verron-Guillemot 2021). Les figures les plus complexes ont été traduites; les discussions ont été harmonisées avec le récit global du manuscrit. Notamment, les expressions* proxies *et* propriétés de convenance *(« suitability properties ») employées dans l'article publié en anglais ont été traduites ici par respectivement* propriétés de prédiction *et* propriétés cibles*, terminologie préférée dans le reste du manuscrit de thèse.*



Résumé graphique de la méthode de croisement de données, proposé pour l'article publié (Verron-Guillemot 2021)

Résumé :

L'évaluation du potentiel des sols pour construire en terre crue à partir de cartes pédologiques vise à fournir un outil d'information sur les potentiels de déploiement de la filière terre crue en l'absence de patrimoine bâti faisant « précédent ». La terre allégée, technique « moderne », sert ici d'exemple. Des caractéristiques de convenance des terres pour construire en terre allégée sont proposées après discussion avec des expert.es de cette technique. Sous forme de seuils binaires sur les propriétés compositionnelles* des terres, ils représentent l'aisance de mise en œuvre en terre allégée. Ces critères sont employés pour filtrer la base de données pédologique DoneSol3 bretonne et sa représentation raster-STU. Les résultats du croisement de données sont traités dans des analyses de sensibilité. En Bretagne pour la terre allégée, ce sont les propriétés de CEC et de granulométrie qui sont les plus sensibles dans la définition des seuils de convenance. Des représentations spatiales des sols favorables à la terre allégée sont proposées. Puis, des estimations des volumes de terres excavées favorables produites annuellement en Bretagne sont calculées et des « scénarios de réemploi » sont envisagés. Les volumes considérables concernés dépassent largement les besoins estimés. Face à l'abondance de terres d'excavation, plutôt que de promouvoir le déploiment déraisonné de la construction en terre comme « exutoire » des déchets du BTP, peut-être faut-il questionner l'intensité des travaux de terrassement. Une prudence est de mise face aux promoteur.ices de « l'économie

circulaire » et au potentiel d'éco-brunissement* que représente la construction en terre crue pour le secteur du BTP industriel*.

1 Introduction : pourquoi cartographier les potentiels des sols pour la construction en terre crue ?

Il est communément admis que la présence de patrimoine bâti en une technique de terre crue renseigne sur les potentiels des sols alentours pour cette technique (CCTC 2018; Hamard et al. 2018; Goizauskas 2020; Fabbri et al. 2022). L'hypothèse est alors que les sols de proximité sont ceux employés dans les éléments bâtis, et que les constructeur.ices se seraient adapté.es à cette ressource immédiatement disponible. La présence de patrimoine bâti dans une zone atteste que la ressource (1) est largement disponible, (2) facilite la mise en œuvre selon la technique représentée, (3) permet une durabilité des bâtiments construits selon les techniques de maçonnerie, l'entretien et l'architecture de l'époque et (4) possède un contexte culturel favorable à son déploiement (Hamard et al. 2018).

La présence de sols techniquement employables serait donc une condition nécessaire à l'occurrence de patrimoine bâti en une technique de terre crue sur un territoire, mais pas une condition suffisante (Chapitre 3A, 3), car le déploiement d'une technique de construction est la « conjonction de nombreux critères socio-historiques et environnementaux » (Goizauskas 2020). L'absence de patrimoine n'est donc pas considérée comme étant une absence de convenance des sols locaux (CCTC 2018).

Nous avons remarqué que la cartographie du patrimoine bâti en terre crue révèle chaque année de « nouvelles zones » jusque là non référencées sur les cartes du patrimoine, ou des occurrences de techniques insoupçonnées (Contexte, 2.3.5). Mais peut-être que dans certaines régions nous ne trouverons jamais d'exemples de patrimoine bâti dans certaines techniques-types*. Même si c'était le cas, le redéploiement de la filière terre crue peut difficilement attendre le repérage général du patrimoine bâti dans les nombreuses régions où il n'est pas déjà identifié. Comment savoir où il est possible de bâtir en terre, sans présence du patrimoine pour l'attester ?

Nous proposons ici une méthode de cartographie de la ressource en terre disponible pour construire en terre crue, même en l'absence de patrimoine bâti sur le territoire. D'après une idée originale de Hamard (2017) et en collaboration avec des artisan.es* expert.es de la technique, une carte des potentiels techniques des sols pour la construction en terre allégée est proposée sur le territoire breton. Comme relevé au Chapitre 3A (4.1), la distribution spatiale de la ressource en terre sera analysée mais également les volumes disponibles localement.

Pour ce travail cartographique, nous avons eu une approche « convenance des terres » et non « convenance des techniques » (Chapitre 1, 4), ce qui impacte la progression logique : on définit d'abord ce qu'est une terre convenable pour la terre allégée, puis on localise et quantifie les terres favorables à cette technique. Cette progression facilite la modélisation de grande échelle pour la quantification de la ressource, mais va à l'inverse de la logique des constructeur.ices qui choisissent la technique-type* la plus adéquate après avoir pris connaissance des qualités des terres à disposition sur site.

Au vu de la résolution et de l'acuité des cartes pédologiques exploitées dans les chapitres précédents et de la forte dépendance au contexte des choix techniques*, une telle cartographie n'a pas de portée opérationnelle pour les chantiers terre crue. D'autre part, la question de la disponibilité de la ressource aux propriétés d'ouvrabilité* adéquates ne semble pas être une préoccupation majeure de la filière, plutôt concernée par la logistique autour du réemploi des terres d'excavations et par la pollution des sols.

Cependant, nous avons remarqué l'intérêt que peuvent susciter les représentations cartographiques : elles sont souvent reprises dans des supports de communication de la filière terre crue, ainsi que dans les publications académiques*. L'étude de la disponibilité de la ressource en terre devient alors un potentiel outil de projection des possibles sur les territoires. Elle peut aider à représenter les potentiels de la construction en terre dans des études de grande échelle, régionale ou nationale. Par exemple, le

nécessaire déploiement massif de centres de formation à la construction en terre crue, pour répondre aux besoins de la construction et rénovation écologique en pleine croissance (Contexte, 2.1), pourrait être facilité par une démonstration des possibles sur des territoires où (1) le patrimoine bâti en terre reste invisible ou *invu* (Contexte, 2.2), ou (2) pour des techniques-types non représentées dans le patrimoine bâti, comme les techniques de terre allégée.

2 Méthode

2.1 Définir les potentiels techniques de la terre allégée pour un sol donné

La terre allégée a été choisie comme première technique d'application de la méthode de projection cartographique des potentiels des sols pour construire. Ce choix se justifie par une considération prioritaire pour cette technique de construction de par sa pertinence dans la rénovation des bâtiments existants (Contexte, 2.3.3.1). D'autre part, les *propriétés cibles** identifiées sur le cycle de mise en œuvre de la terre allégée (2.1.1) sont essentiellement gouvernées par des fonctions monotones : maximiser la cohésion de la terre, minimiser sa teneur en cailloux, etc. ; ce qui facilite grandement l'établissement de seuils sur les *propriétés de prédiction** (2.1.2) et l'évaluation de la méthode.

2.1.1 Propriétés cibles

Les facteurs gouvernant le choix d'une technique de construction concernent l'ensemble des étapes de sa mise en œuvre, de ses propriétés d'usages, bref, de son cycle de vie (Chapitre 2, 6). La terre utilisée dans les techniques de construction en terre crue étant réversible (Contexte, 1.2) (Morel & Charef 2019), nous pouvons considérer le cycle de vie du matériau terre au cours du processus de construction comme circulaire. Pour la construction en terre allégée, l'impact des propriétés du sol sur ce choix a été défini en concertation avec des artisans experts de la terre allégée dans la diversité de ses techniques de mise en œuvre : coffrée, projetée manuellement ou mécaniquement.

La convenance de la terre pour la construction en terre allégée ne semble pas significativement impactée par le type d'agrégat ou de fibres végétales utilisées, ni par la méthode de mise en œuvre (coffrée, projetée) (Vinceslas 2019). Cette étude se concentre sur la terre-chanvre mise en œuvre dans un coffrage, cependant les résultats sont probablement applicables à d'autres mélanges de terre allégée avec des agrégats similaires, tels que le lin ou le roseau, ou à d'autres techniques de mise en œuvre, telle que la terre-chanvre projetée, ou les techniques-types de torchis en général.

Nous avons parcouru le cycle de vie du matériau sur le chantier et à chaque étape, nous avons défini des seuils sur les propriétés identifiées comme limitantes/facilitantes. Ces propriétés sont appelées *propriétés cibles*. Ces propriétés sont qualitatives : ce sont des représentations* d'un état idéal de la matière pour chaque étape, un compromis entre plusieurs propriétés physiques du mélange de terre crue (Chapitre 2, 6.1). Pour chaque *propriété cible*, nous définissons un *critère*, qui est une description qualitative d'un état au-delà/en deça duquel l'état du matériau est considéré comme approprié pour l'étape de construction correspondante.

Cinq *propriétés cibles* ont été identifiées tout au long du processus de construction en terre-chanvre. Elles sont résumées dans la Figure 114.

2.1.2 Propriétés de prédiction

En sciences de l'environnement, lorsqu'une donnée n'est pas directement mesurable ou estimable, nous utilisons des paramètres d'estimation de cette donnée, appelés *proxies*. Par exemple, les données spectroscopiques satellitaires sont souvent utilisées comme proxies pour estimer la teneur en matière organique et la texture de la couche arable : la teneur en matières organiques n'est pas mesurée

directement, mais des propriétés indirectes de rayonnement sont utilisées pour l'estimer (Knadel et al. 2013). Les *proxies* sont donc des *propriétés de prédiction* d'autres propriétés moins accessibles du système étudié.

Les propriétés cibles, qualitatives, nécessiteraient des essais sur des éléments de terre crue à l'échelle 1 pour être directement évaluées. Par exemple, pour évaluer la qualité d'une terre pour l'étape du tamisage, il faudrait en tamiser un certain volume et quantifier l'aisance de la manipulation. D'une part, cette aisance est relativement subjective. On pourrait tenter de l'objectiver, mais d'autre part, l'ensemble des sols du territoire breton ne peuvent être évalués de cette manière. La valeur du sol selon la propriété cible « facilité de tamisage » est donc inaccessible à grande échelle. On définit ainsi une *propriété de prédiction*, la teneur en éléments grossiers, sensé approximer l'aisance de tamisage.

Comme le soulignait un artisan expliquant les essais de terrain sensibles préalables au choix technique, « on mesure ce qu'on mesure » : le ressenti cohésif au toucher ou le ressenti graveleux ne sont pas des propriétés qui définissent une convenance en elles-mêmes. C'est après une conversion par projection de leur impact dans les procédés que ces propriétés deviennent des indicateurs, ou *propriétés de prédiction*, de la convenance de la terre pour une technique évaluée.

Cette approche est inspirante lorsqu'il s'agit de prédire la qualité technique d'une terre pour une technique-type de construction en terre crue. Dans cette perspective, la granulométrie ou la CEC ne sont pas directement des *propriétés cibles* mais leur mesure pourrait permettre d'approcher la facilité de mise en œuvre à certaines étapes du chantier. Dans cette étude, une *propriété de prédiction* est ainsi une propriété pédologique du matériau terre qui (1) est considérée comme représentative d'une ou plusieurs propriétés cibles dans le procédé et qui (2) est disponible dans la base de données pédologiques DoneSol3 Bretagne, source de données pédologiques de l'étude.

Étant donné qu'une propriété de prédiction donne une idée approximative d'une propriété cible, un *seuil* de propriété de prédiction estimera un *critère* de propriété cible, c'est-à-dire la limite théorique au-delà/en deçà de laquelle la terre évaluée n'est plus considéré comme approprié pour la construction en terre allégée. Ce *critère* peut varier en fonction de nombreux facteurs de contexte, par exemple, la méthode de mise en œuvre, le type de terre, les objectifs de performance du bâtiment, etc. Cela entraîne par conséquent une large plage possible de variation des valeurs *seuils* des propriétés de prédiction. Afin de prendre en compte l'impact de la variabilité des *seuils* sur les résultats, le modèle sera soumis à une analyse de sensibilité. Les seuils seront autorisés à varier à l'intérieur d'un intervalle (appelée *plage de variation des seuils*) en utilisant une analyse Monte Carlo (2.3.2). Comme les propriétés de prédiction et les *seuils* associés, les *intervalles de variation des seuils* sont également définis en concertation avec des maçons experts et en fonction des quelques informations disponibles dans la littérature académique. Ces intervalles visent ainsi à représenter une plage de variation réaliste des seuils des proxies dans des conditions réelles.

Pour chacune des propriétés de prédiction, le seuil considéré comme le plus représentatif par les artisans consultés, employé pour les calculs quantitatifs finaux, n'est pas publié explicitement dans le corps de texte de ce manuscrit. Nous espérons par son masquage éviter son réemploi en dehors de son contexte de validité (4.3).

De ce fait, dans le corps du texte et sur les figures, les *seuils* seront remplacés par un artifice : "[nom de la propriété de prédiction]unité" (ex : [F2000µm_D]%). Ils seront cependant disponibles sur demande aux auteur.ices. Les *plages de variations*, relativement larges, sont elles explicitées dans la description des propriétés et dans le reste du texte, ce qui permet d'illustrer les travaux.

Chaque *propriété cible* et *critère* correspondant, ainsi que les *propriétés de prédictions*, *seuils* et *plages de variations* permettant leur approximation, sont expliqués en 2.2 . Ils sont résumés dans le Tableau 9.

2.1.3 Sources d'informations

Les seuils des propriétés de prédiction et leurs plages de variation sont définis à partir de deux sources d'information. Pour E, C0, CEC, F50µm, les données de la thèse de Vinceslas (2019), basées sur 6 échantillons de terre collectés dans le Massif armoricain, nous ont fourni des seuils hypothétiques, validés par des maçons experts. Pour F2000µm_D, des maçons experts nous ont fourni des seuils théoriques basés sur leurs observations de terrain.

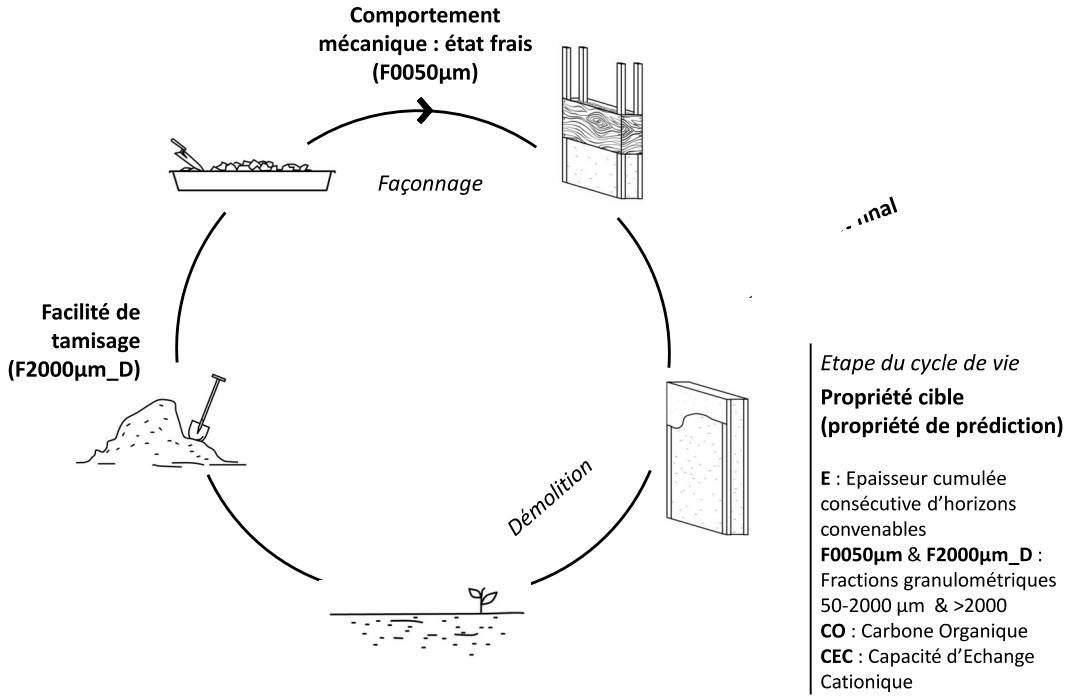


Figure 114 : Distribution des propriétés cibles identifiées le long du cycle de vie de la terre dans la construction en terre-chanvre, et propriétés de prédiction correspondantes.

2.2 Description des propriétés cibles et des propriétés de prédictions et seuils associés

2.2.1 Excavation

Bien que la terre puisse être excavée manuellement, dans la plupart des contextes contemporains en milieu industrialisé la terre semble être excavée mécaniquement. Au cours de cette étape, différents horizons de sol peuvent être excavés séparément. Dans cette étude, nous considérons que les machines d'excavation ont une précision limitée. Par conséquent, l'épaisseur cumulée des horizons de sol appropriés doit être supérieure à cette précision, autorisant l'excavation séparée des horizons convenables.

La propriété de prédiction utilisés, l'*épaisseur cumulée des horizons convenables consécutifs* (E), est calculé à partir de la base de données (2.3.1). La plage de variation des seuils va de 10 cm (excavation manuelle) à 60 cm (plus grandes excavatrices mécaniques).

2.2.2 Facilité de tamisage

La fraction granulométrique des cailloux (F2000µm_D) ne contribue généralement pas de manière significative à la cohésion du matériau, et augmentent la densité de la matrice terre-fibres. Afin de maximiser la propriété d'isolation du matériau, une densité suffisamment faible doit être obtenue. En

présence d'éléments grossiers, la terre est donc tamisée, par voie liquide, sèche ou sèche puis liquide. Puisque le tamisage mécanique est rare sur les chantiers de construction en terre allégée, la facilité de tamisage est garante de moindre effort, elle est donc une propriété cible.

La propriété de prédiction F2000um_D sera utilisé pour approximer la facilité de tamisage. Cette fraction granulométrique grossière doit être suffisamment faible pour que le tamisage manuel soit praticable. La plage de variation du seuil est définie par les artisans consultés et va de 5 %, où un processus de tamisage devient nécessaire, à 30 % si un tamisage mécanisé est envisagé.

2.2.3 Enrobage des fibres

La terre est mélangée avec de l'eau jusqu'à atteindre une fluidité adéquate. La barbotine de terre est ensuite mélangée avec la chènevotte afin de distribuer et d'enrober les fibres. Le processus d'homogénéisation/enrobage nécessite une consistance adéquate de la barbotine : trop épaisse, le mélange est pénible à homogénéiser et sera plus dense donc moins isolant après mise en œuvre ; trop liquide, peu de terre couvrirait les fibres et la cohésion ne serait pas garantie.

Le test du "gant" est actuellement le test le plus courant employé pour caractériser la consistance d'une barbotine de terre utilisée dans la terre allégée (voir Annexe IV). Les artisans plongent la main dans la barbotine, la retirent et observent l'écoulement et la cohésion de la barbotine sur la main, le résultat ressemblant à un gant. Vinceslas (2019) a constaté expérimentalement qu'une teneur élevée en matières organiques du sol peut perturber le test du gant, rendant complexe la prédiction et le suivi des propriétés de la barbotine sur le chantier. De ce fait, on peut supposer que la teneur en matières organiques pourrait également perturber la bonne couverture des fibres dans le mélange. C'est pourquoi les maçon.nes utilisant la terre locale pour construire sont formé.es pour identifier les terres pauvres en matières organiques (CCTC 2018).

La propriété cible identifiée au mélange est l'enrobage des fibres. Mais c'est également la praticabilité du test du gant, puisqu'il il s'agit du test le plus efficace sur le terrain pour caractériser la consistance adéquate de la terre (Vinceslas et al., 2020).

La teneur en matières organiques (MOs) serait donc une propriété de prédiction pour la propriété cible de l'étape d'enrobage. Les MOs étant principalement constituées de carbone, on évalue souvent leur teneur par l'évaluation de la teneur en carbone organique (CO) d'échantilons de sol. C'est donc généralement la teneur en CO qui est renseignée dans les bases de données pédologiques. On la convertit en teneur en MOs en la multipliant par le coefficient de van Bemmelen (1.724) (Baize 2016).

La teneur en carbone organique (CO) est donc utilisée comme propriété de prédiction. Dans les expériences de Vinceslas (2019), la terre la plus riche en matières organiques qui n'a pas perturbé le test du gant avait une teneur en CO de [CO] $g.kg^{-1}$. Au-delà, il y a un risque que la teneur en MOs perturbe l'enrobage et le test du gant. La plage de variation des seuils va de 33.0 $g.kg^{-1}$, correspondant à la deuxième teneur en CO la plus élevée des échantillons de Vinceslas (2019) qui n'a pas perturbé le test, à 63.1 $g.kg^{-1}$, ce qui correspond à la teneur en CO du matériau terre perturbant le test du gant dans l'expérience. A titre de comparaison, la teneur en CO des sols de surface du territoire hexagonal varie majoritairement dans des plages de valeurs de 5 à 30$g.kg^{-1}$, et de 0 à 10 $g.kg^{-1}$ pour les horizons profonds.

Étape dans le cycle de vie du matériau	**Propriété cible** (qualitative)	**Critère** sur la propriété cible	**Propriété de prédiction** (quantitative)	**Abb.**	**Unité**	**Seuil** sur la prop. de prédiction **[masqué]** Approxime l'atteinte du critère de prop. cible	**Plage de variation du seuil** Varie selon le contexte constructif	**Source**
Excavation	Aisance d'excavation	L'épaisseur cumulée d'horizons convenables est suffisante	Épaisseur cumulée d'horizons convenables	E	Cm	> [E]	10 – 60	Expert
Tamisage	Aisance de tamisage	Le tamisage manuel est envisageable	Pourcentage volumique d'éléments grossiers	F2000µm_D	%	< [F2000µm_D]	5 – 30	Expert
Mélange	Aisance d'enrobage des fibres	La matière organique ne perturbe pas l'enrobage	Teneur en carbone organique	CO	$g.kg^{-1}$	< [OC]	33.0 – 63.1	Vinceslas (2019)
Façonnage	Comportement mécanique à l'état frais	Le mélange posé est autoportant	Teneur en sable dans la fraction fine	F2000µm	$g.kg^{-1}$	< [F2000µm]	308 – 829	Vinceslas (2019), Brouard (2018)
Usage	Comportement mécanique à l'état sec	Le mur sec peut supporter un enduit	Capacité d'échange cationique	CEC	**cmol+**.kg^{-1}	> [CEC]	3.9 – 6.6	Vinceslas (2019)

Tableau 9 : Propriétés cibles et critères associés, propriétés de prédictions et seuils associés, plages de variation des seuils.

2.2.4 Comportement mécanique à l'état frais

Le mélange terre-chanvre est partiellement compacté dans un coffrage qui sera retiré rapidement pour permettre un séchage rapide. Par conséquent, le mélange compacté doit être suffisamment cohésif pour rester cohérent à l'état frais*, même lorsque le coffrage est retiré. La barbotine de terre se comporte comme un fluide de Bingham, c'est-à-dire un fluide avec une résistance en cisaillement (Vinceslas 2019). C'est la résistance en cisaillement qui maintient la cohésion des granulats de chanvre enrobés de barbotine (Chapitre 2, 5.2.1). La résistance en cisaillement est ainsi proportionnelle à la masse que peut supporter un élément de mur frais* décoffré avant décohésion et effondrement. Dans une mise en œuvre projetée, elle peut être considérée comme la capacité d'un mélange terre-chanvre frais à adhérer au mur (Vinceslas 2019). À cette étape, la résistance en cisaillement de la barbotine de terre doit être suffisamment élevée pour que le mélange compacté reste cohérent lorsque le coffrage est retiré.

La relation entre la contrainte de cisaillement et la teneur en eau est affectée par la composition du mélange, y compris la teneur en argile, la nature des argiles et la taille des particules (Nguyen et al. 2018; Bolleni 2019; Vinceslas et al. 2020). La teneur en eau est gérée sur chantier notamment à l'aide du test du gant. À teneur en eau équivalente, le paramètre dominant du comportement à l'état liquide est la surface spécifique des particules, qui peut être estimée par une maximisation de F2µm et F50µm (Coventry 2004; Bolleni 2019; Vinceslas 2019). Cela revient à réduire F2000µm lorsque les fractions granulométriques sont définies relativement à la *fraction fine** (=P2000µm). Par conséquent, F2000µm est utilisée comme propriété de prédiction de la cohésion de la barbotine de terre à l'état frais. Le seuil et la plage de variation du seuil [308-829$g.kg^{-1}$] sont définis selon les résultats de Vinceslas (2019). Le seuil utilisé est en adéquation avec les résultats expérimentaux de Brouard (2018). Au-delà de ce seuil, le matériau terre peut être considéré comme insuffisamment cohésif.

2.2.5 Comportement mécanique à l'état sec

Après séchage, la cohésion fournie par la terre dans le mélange terre-chanvre sec doit être suffisante pour supporter la masse d'un enduit, ce qui équivaut à un effort cisaillant ou extensif (Chapitre 2, 5.1.2).

Les paramètres mécaniques des matériaux en terre crue dans les efforts de cisaillement ou de traction dépendent principalement des phénomènes de cohésion électronique et de succion (Chapitre 2, 5.2.1). Ces deux types d'interactions électroniques varient en fonction du type et de la quantité d'argile (Curtin & Smillie 1976; Weil & Brady 2016; Meimaroglou & Mouzakis 2019). La capacité de liaison apportée par les minéraux argileux peut être vue comme l'action combinée de la surface spécifique développée par les argiles et de leurs charges électroniques (Meimaroglou & Mouzakis 2019). La capacité d'échange cationique (CEC) est un bon indicateur du potentiel cohésif apporté par les argiles dans les terres non organiques (Annexe I, 2.2.4.3) et donc dans les matériaux de construction en terre crue (Coventry 2004; Hamard et al. 2018; Meimaroglou & Mouzakis 2019; Vinceslas 2019). Dans cette étude, la propriété de prédiction CEC est utilisée pour approximer la propriété cible « résistance mécanique du matériau terre allégée sec ». Le seuil et la plage de variation du seuil [3.9 –6.6 $g.kg^{-1}$] sont définis selon les résultats de Vinceslas (2019).

2.3 Calculs et projection cartographique

2.3.1 Calcul des volumes et pourcentages de terre convenable

Les propriétés de l'ensemble des Unités Typologiques de Sol (STU) et des horizons des STU sont extraites de la base de données DoneSol3 Bretagne, selon une méthode décrite au Chapitre 3A (4.3.1). Pour chaque horizon, les 4 propriétés de prédiction qui y sont directement renseignées (F2000µm_D, CO, F2000µm, CEC) sont comparés aux seuils associés (Tableau 9). Si l'horizon valide l'ensemble des seuils, il est temporairement considéré comme « convenable » ou « non convenable ». Puis, l'épaisseur cumulée des horizons convenables consécutifs d'une même STU est comparée au seuil d'épaisseur cumulée (E). Si l'épaisseur cumulée satisfait le seuil E, les horizons concernés sont confirmés comme convenables, sinon ils sont non convenables. La somme de l'épaisseur de tous les horizons convenables de la STU est calculée et appelée *épaisseur convenable* de la STU. L'épaisseur totale de la STU est également calculée.

Une projection spatiale est alors nécessaire pour évaluer le volume total, car elle permet de quantifier la distribution des chacune des STU dans l'espace. La cartographie raster prédictive des STU produite par Vincent et al. (2018) est utilisée (raster-STU). Pour rappel, il s'agit du format cartographique que nous avons considéré comme le plus précis parmi les données pédologiques disponibles en Bretagne (Chapitre 3A, 4.2.1).

À partir de la représentation raster-STU, la surface totale que chaque STU couvre sur le territoire breton est quantifiée et extraite. Le volume total de sol de la STU et le volume de sol convenable de la STU sont alors obtenus en multipliant respectivement l'épaisseur totale de la STU et l'épaisseur adaptée de la STU par la surface de la STU. Enfin, tous les volumes totaux de sol et les volumes de sol convenables des STU sont sommés afin d'obtenir un volume total de sol et un volume de sol convenable sur l'ensemble du territoire Breton. Le Pourcentage de Sol Convenable (PSC*) est défini comme le rapport entre le pourcentage du volume de sol convenable et le volume total de sol.

2.3.2 Analyse de sensibilité sur les seuils des propriétés de prédiction

Afin de considérer l'impact de la variabilité des seuils initialement définis en accord avec des experts sur les résultats de convenance des terres, le modèle est soumis à une analyse de sensibilité de Monte Carlo.

Les coefficients de corrélation de Pearson entre les 4 propriétés de prédiction directement définis dans la base de donnée sont calculés à partir des données extraites de DoneSol3 (Tableau 10). Globalement, les propriétés de prédiction ne sont pas étroitement corrélées, condition nécessaire à l'emploi de la méthode d'analyse de sensibilité de Monte Carlo.

	CEC	**CO**	**F2000µm_D**
F2000µm	-0,27	-0,17	0,32
CEC		0,51	-0,19
CO			0,11

Tableau 10: Coefficients de corrélation de Pearson des proxies issus de la base de données DoneSol3.

Les seuils sont sélectionnés aléatoirement sur l'intervalle de variation des seuils, c'est-à-dire sur toute la plage de valeurs considérées comme réalistes (2.1.2). Une exception est faite pour E, car l'épaisseur convenable cumulée n'est pas directement disponible dans la base de données. Pour pouvoir évaluer sa variabilité conjointement aux autres, E est alors varié aléatoirement sur 3 valeurs fixes : les deux valeurs extrêmes de la plage de variation des seuils (10 cm, 60 cm) et la valeur du seuil ([E] cm). Ensuite, chaque ensemble de 5 valeurs de seuils défini par choix aléatoire est entré en paramètre du modèle et celui-ci est exécuté. Le Pourcentage de Sol Convenable (PSC) est calculé. Ce processus est répété 10 000 fois. Les résultats sont représentés sur la Figure 116. Des courbes de tendance sont tracées afin de pouvoir comparer l'impact des différents choix de seuils sur le PSC. Pour chaque propriété de prédiction, une courbe de lissage a été tracée pour chaque valeur de E (en rouge). Pour chaque propriété de prédiction, la différence entre la valeur maximale et minimale de la courbe de lissage E = [E] cm (rappel : valeur utilisée dans le modèle, masquée) est représentée sous forme de ligne pointillée.

2.3.3 Cartographie de la convenance des sols en Bretagne

L'épaisseur convenable calculée pour chaque STU est attribuée à chaque pixel du raster-STU (Figure 119a). Une estimation de la masse de terre qui serait nécessaire pour l'isolation en terre-chanvre de l'ensemble des logements susceptibles de le nécessiter sur le territoire Breton a été réalisée (Annexe V). Les données du gouvernement français sont utilisées pour estimer la quantité de matériau terre requise par maison isolée, le nombre de maisons à isoler et le nombre de maisons construites chaque année (CGDD 2014; INSEE 2017, 2020). Ces besoins de terre hypothétique sont ensuite répartis entre les communes proportionnellement à leur population (Figure 119b.).

En utilisant la carte vectorielle des communes (DREAL Bretagne & Institut national de l'information géographique et forestière (IGN-F) 2020), la proportion de surface des STU est calculée pour chaque commune. Lorsque les non-sols (Chapitre 3A, 4.3.1.1) représentent plus de 50 % de la surface de la commune, la commune entière est considérée comme non-sol. La *masse* de terre convenable par commune est ensuite déduite, a partir du *volume* estimé multiplié par un facteur de 1.3, valeur de densité de sols couramment utilisée en pédologie. Le Ratio de Disponibilité des Ressources (RDR) de la municipalité représente le rapport entre la terre disponible sur la commune et les besoins hypothétiques de terre pour l'isolation en terre-chanvre.

2.3.4 Outils de traitement des données

L'extraction des données et les analyses ont été réalisées via Microsoft Access 2018, Spyder 4.1.4 (Python 3.8.3 64-bit), QGIS 3.10.0 (QGIS Development Team 2020), fonctionnant sous Windows 10. Le modèle a été testé et appliqué à la base de données DoneSol3 Bretagne (InfoSol 2021) et sa représentation spatiale raster (Vincent et al. 2018) appelée ici raster-UTS. Afin de rendre ce travail

réplicable, reproductible et réutilisable comme proposé par Cohen-Boulakia et al. (2017), le flux de données complet de ce travail a été publié (Verron-Guillemot 2021). Il peut être consulté librement ou même reproduit à condition d'obtenir les droits d'accès à la base de données DoneSol3 Bretagne par les propriétaires (Grolleau et al. 2004). Il a notamment a été réemployé dans le cadre d'une cartographie des ressources* potentielles pour la construction en terre en Suisse (Lecaille 2023). Nous conseillons aux éventuel.les intéressé.es d'entrer en contact avec nous pour un accompagnement sur son utilisation et son éventuelle adaptation à d'autres contextes.

3 Résultats

3.1 Statistiques sur les données DoneSol3 Bretagne

La distribution du volume cumulé des horizons de la base de données, en fonction des valeurs des 4 *propriétés de prédiction* directement disponibles dans DoneSol3 permet de visualiser les valeurs couramment rencontrées pour ces propriétés dans les sols de Bretagne (Figure 115). De plus, cela permet aux lecteur.ices de situer la plage de variation proposée pour l'analyse de sensibilité dans cette distribution des valeurs. En effet, pour la CEC, F2000µm et F2000µm_D, la plage de variation couvre environ 50 % du volume des horizons pédologiques. Par conséquent, nous nous attendons à une sensibilité élevée du modèle à la variation des seuils de ces deux propriétés de prédiction.

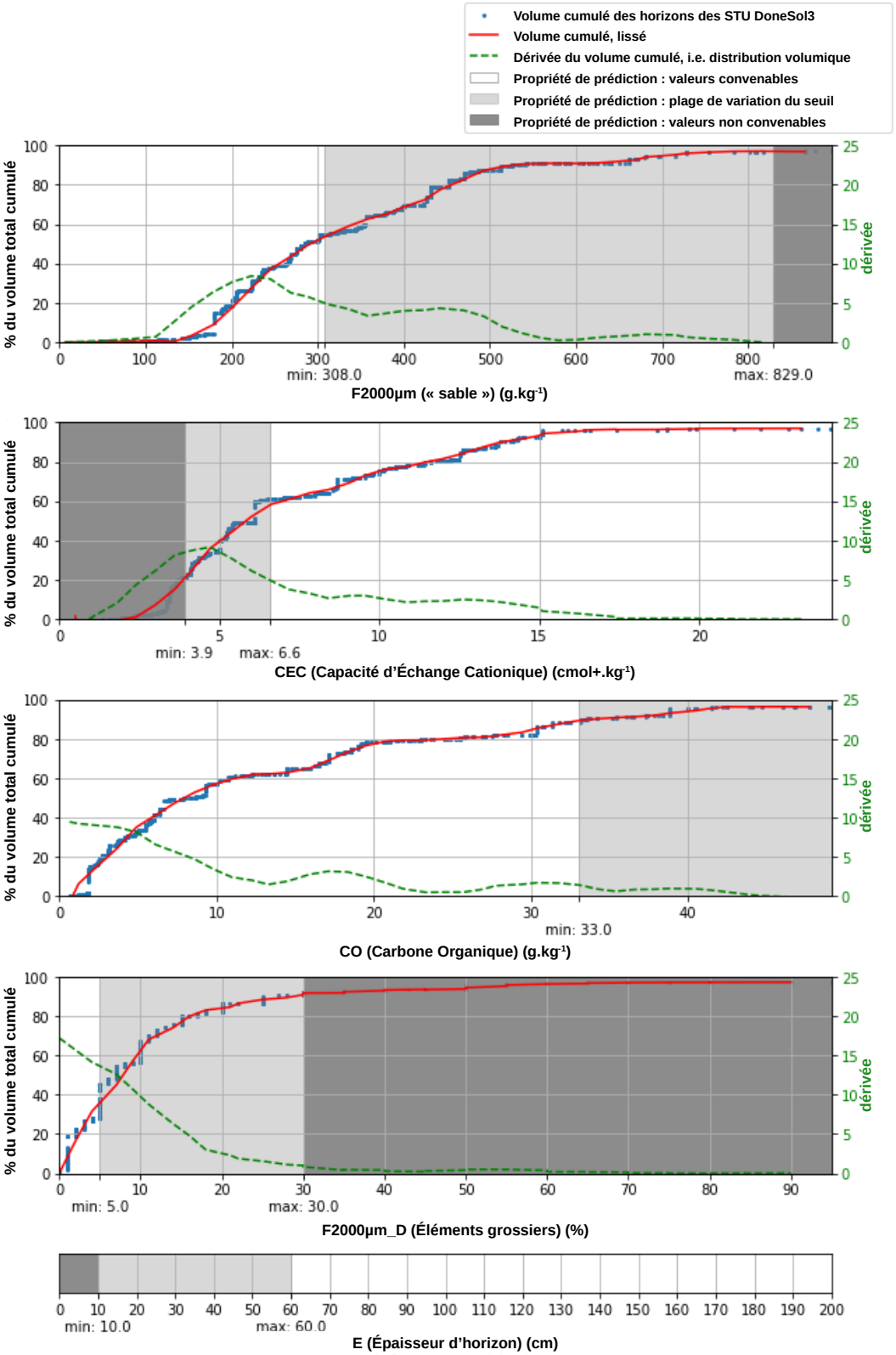


Figure 115: Comparaison de la distribution cumulée des volumes des horizons de DoneSol3 Bretagne et de sa dérivée (répartition des volumes) avec les plages de variations des seuils des proxies.

3.2 Analyse de sensibilité

La convenance augmente avec une *propriété de prédiction* lorsque le seuil associé est défini comme un maximum, et diminue lorsqu'il est défini comme un minimum (Figure 116). Les proxies E et CEC ont l'impact le plus élevé sur le Pourcentage de Sol Convenable (PSC), avec une variation de 24 % et 30 %, respectivement à l'intérieur de leur *plage de variation*. Cependant, la variation de la propriété de prédiction E n'a pas été calculée exactement de la même manière que les autres (2.3.1). Par conséquent, la comparaison avec les autres résultats de variation du PSC est seulement qualitative et non quantitative. F2000µm et le F2000µm_D montrent une variation de PSC de 16 % et 12 %, tandis que pour OC seulement de 5 %. Cela était attendu, car la *plage de variation des seuils* ne couvrait que 10 % de la courbe de distribution du volume des horizons de sol (3.1).

3.3 Volume et pourcentage de sol convenable

Le volume total estimé de sol en Bretagne est de plus de 27 558 000 000 m³ d'après les données DoneSol3. Le volume total de sol supposé convenable pour la construction en terre-chanvre est de plus de 13 277 000 000 m³ (17.3 Bt). Par conséquent, le Pourcentage de Sol Convenable (PSC) est de 48 %. Afin de représenter la terre réellement disponible après tamisage, on peut déduire du volume convenable le volume des "éléments grossiers" (F2000µm_D) : la quantité de ressource convenable descend à 12 636 347 046 m³, ce qui représente 46 % du volume total de sol.

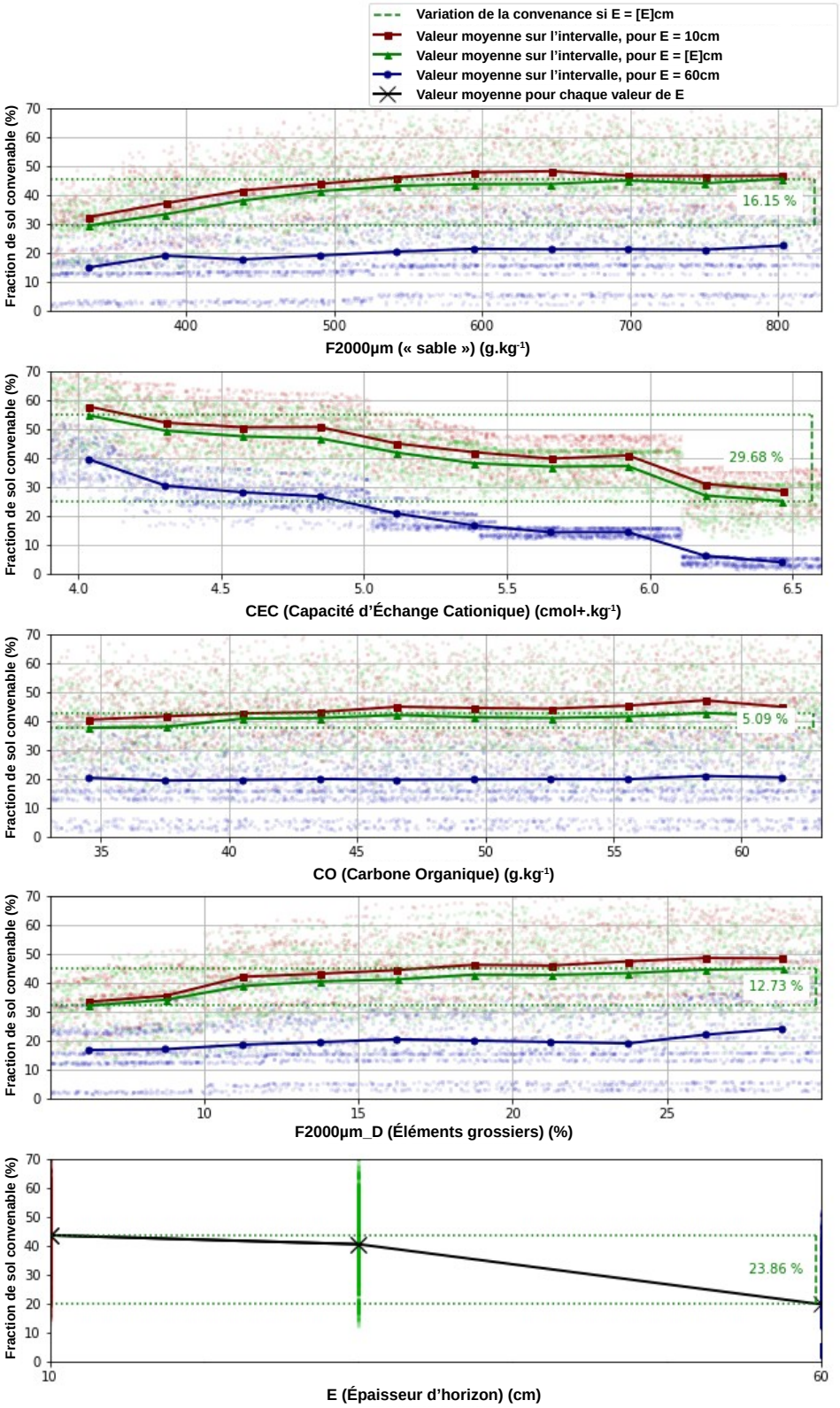


Figure 116 : Résultats de l'analyse de sensibilité de Monte Carlo. Les résultats des 10 000 exécutions du modèle ont été représentés sous forme de points colorés transparents en arrière-plan.

3.4 Cartographie de la convenance des sols

Les sols à la plus forte épaisseur convenable pour la construction en terre allégée (Figure 117a.) sont situés dans une zone qui débute le long de la côte nord-est de la Bretagne et s'étend vers l'est jusqu'à atteindre la ville de Rennes. Cette tendance suit la distribution de certains types de sols qui semblent particulièrement appropriés : Cambisols, Cambisols luviques et Luvisols développés à partir de dépôts profonds de limons éoliens (Jamagne et al. 2011), riches en fractions « argileuses » (F2µm) et limoneuses (F50µm), et pauvres en éléments grossiers (F2000µm_D). Le ratio de disponibilité des ressources communales (RDR) varie de 0 à 6802 (Figure 117b.). Presque toutes les municipalités présentent un ratio supérieur à 10, suggérant une ressource abondante. Le RDR diminue avec la population des communes et augmente avec l'épaisseur convenable des sols. Logiquement, le RDR est donc plus faible près des grandes villes comme Rennes, Saint-Brieuc, Vannes, Lorient et Brest, où la population est élevée et donc le besoin potentiel est important. Cependant, il subsiste la plupart du temps un ratio supérieur à 10, indiquant une quantité significative de terre convenable disponible localement. À l'inverse, le RDR est plus élevé au centre de la Bretagne, où la densité de population est la plus faible, et dans le nord de la Bretagne, où l'on trouve des sols profonds et supposés convenables.

3.5 Distance aux sols convenables

La carte de convenance des sols bretons (Figure 117a.) montre que dans près de tout le territoire (99,5 %) on peut trouver à moins de 1 kilomètre une ressource en terre adaptée à la construction en terre allégée. Le point le plus éloigné d'un sol supposé convenable l'est de seulement 2,3 kilomètres. La distance maximale acceptable pour le transport de la terre vers un site de construction est variable selon les contextes et la recherche de pertinence sociétale*. Mais l'échelle du kilomètre, qui paraissait déjà acceptable en contexte pré-industriel* (Chapitre 3A, 7.1), semble largement accessible. Cette proximité souligne que la construction en terre allégée peut se déployer comme une technique de construction « ultra-locale » en Bretagne, particulièrement dans le nord et l'ouest où la terre du site pourrait s'y prêter dans la plupart des cas.

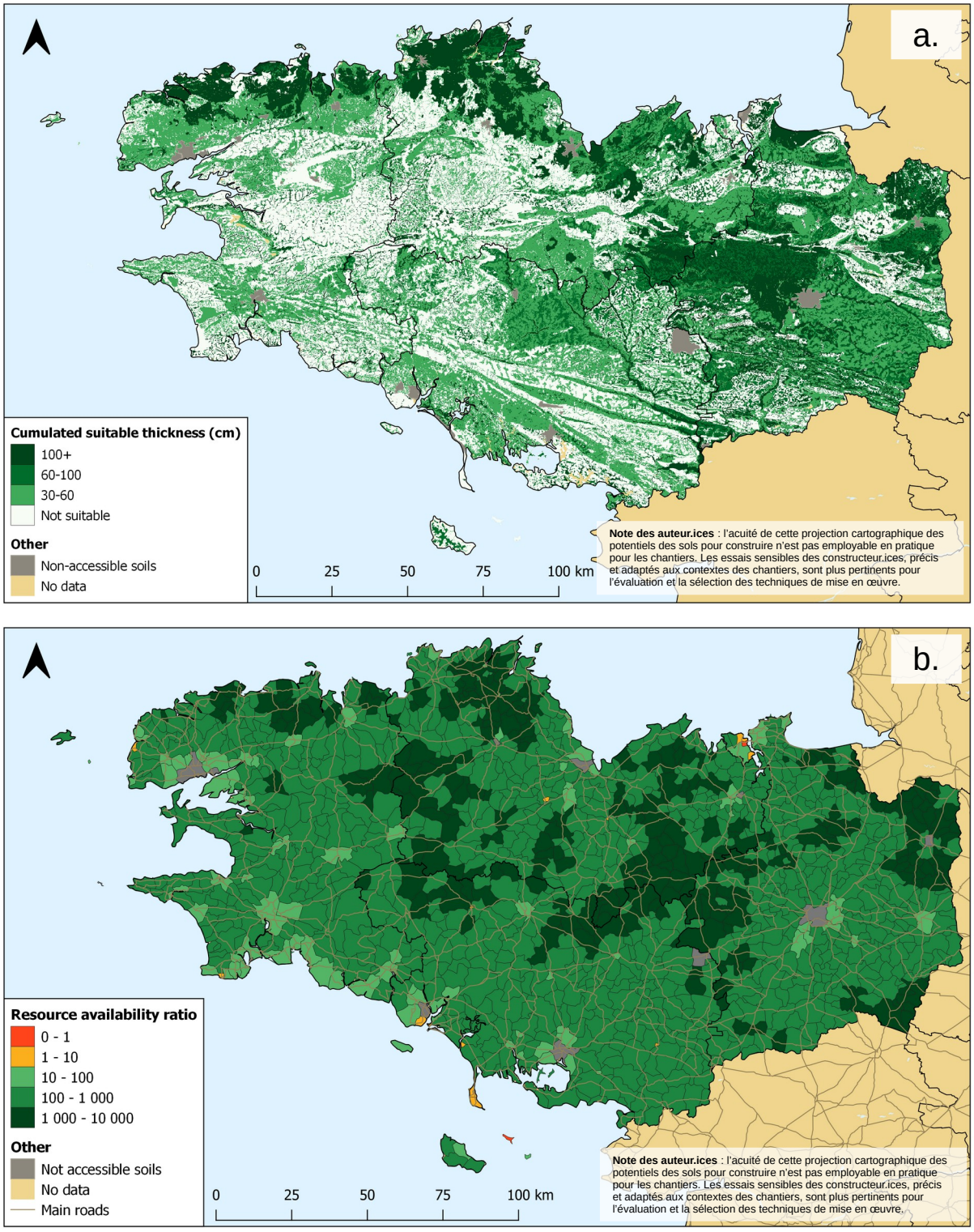


Figure 117 : Projection cartographique du potentiel de convenance des sols de Bretagne : a. épaisseur convenable ; b. ressource en sol convenable pour la construction en terre allégée, relativement aux besoins estimés des communes.

4 Discussions

4.1 La terre allégée en Bretagne

4.1.1 Disponibilité de la ressource, en volume

Selon le modèle, 46% du volume total des sols bretons pourrait être utilisé pour la construction en terre allégée. Étant donné que la masse de terre annuellement extraite dans des travaux de terrassement en Bretagne est environ de 2.8 Mt (Hamard et al. 2018), environ 1.3 Mt devraient alors être adaptés pour la construction en terre allégée. La ligne pointillée sur la Figure 118 représente cette masse, cumulée au cours des années.

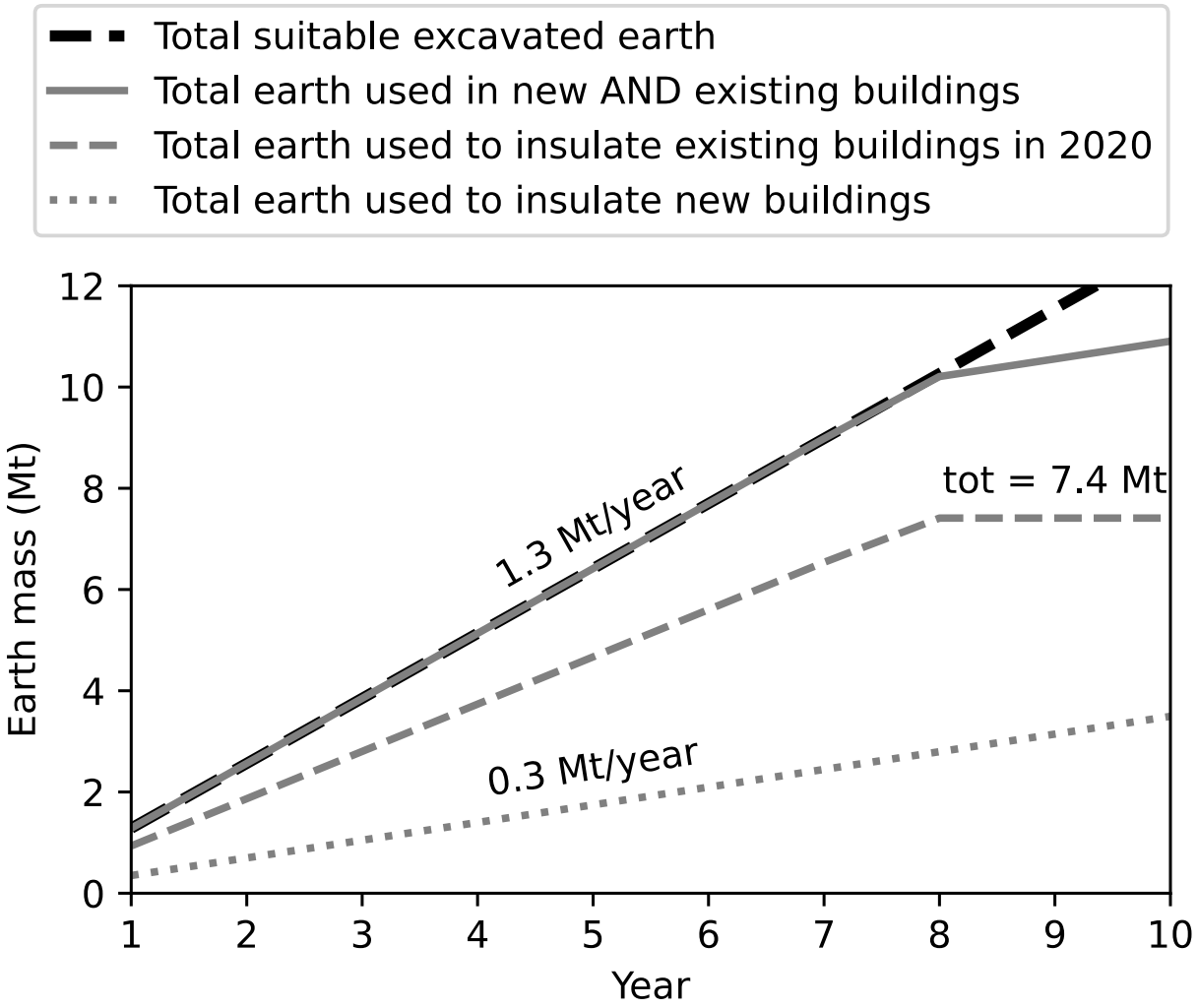


Figure 118 : Evolution des volumes extraits (tirets noirs), réemployés pour l'isolation de l'existant (tirets gris), réemployés pour la construction neuve (pointillé gris) dans un scénario maximisant le réemploi de la terre excavée considérée convenable pour la construction en terre allégée sur une période de 10 ans.

La masse totale de terre hypothétiquement requise pour isoler tous les bâtiments nécessitant une isolation en Bretagne avec de la terre allégée est estimée à 7,4 Mt (2.3.3). Cela correspond à moins de 6 années d'extraction de terres excavées convenables. De plus, si l'on souhaitait isoler également

l'ensemble des bâtiments neufs construits chaque année au rythme que poursuit actuellement la construction neuve, le besoin estimé de terre serait de 0,3 Mt par an, soit moins d'un quart de la terre convenable excavée annuellement. Dans un scénario où l'on cherche à remplacer l'ensemble des isolants du secteur de la construction par de la terre allégée, tous les bâtiments neufs utiliseraient 0.3 Mt/an de terre convenable, et les 1 Mt/an restants seraient employés pour isoler les bâtiments existants (Figure 118). Dans un tel scénario, il faudrait seulement 8 ans pour achever l'isolation de l'ensemble des bâtiments existants nécessitant une isolation en Bretagne (en 2020). En réalité, d'autres matériaux naturels peuvent être employés pour l'isolation, donc le besoin de terre est considérablement plus faible. Ainsi, même sans réduire l'intensité de l'activité de construction neuve actuelle et en démultipliant les efforts de rénovation de l'existant, nous supposons que le flux de terre excavée pourrait répondre aux besoins en terre pour la construction en terre allégée.

4.1.2 Sensibilité des seuils

L'analyse de sensibilité Monte Carlo montre que le Pourcentage de Sol Convenable (PSC) est particulièrement sensible aux *propriétés de prédiction* « Capacité d'Échange Cationique » (CEC) et « épaisseur cumulée des horizons convenables consécutifs » (E).

Comme discuté dans la section 2.2.1 , E dépend grandement du contexte de construction et de la précision de l'excavation. La sensibilité à E est élevée, mais on peut remarquer que le PSC reste stable pour des valeurs de E comprises entre environ 10 et 30 cm. La raison pourrait être que la majorité des horizons des STU sont plus épais que 20 cm, et que les horizons plus minces correspondent aux horizons O (organiques) et A (organo-minéraux) (Association Française pour l'Étude des Sols 2008), qui sont la plupart du temps déjà éliminés de la convenance par les seuil sur le Carbone Organique (CO). Les précisions actuelles des pelleteuses mécaniques sont d'environ 15 à 30 cm, ce qui leur permet de séparer les horizons convenables dans la plupart des cas. E n'est donc pas impactant sur le potentiel des sols pour construire en terre.

La CEC est une *propriété de prédiction* intéressante pour les *propriétés cibles* des techniques de construction en terre crue, car elle indique la capacité de cohésion apportée par les minéraux argileux. Ce paramètre est sensible dans la modélisation, notamment parce que le seuil défini se trouve sur un pic de la courbe d'occurrence des terres selon la propriété CEC (Figure 115). Comme il s'agit d'une propriété pouvant représenter plusieurs paramètres clef des procédés de terre crue (Chapitre 2, 5.2.1), il serait intéressant d'approfondir l'étude du lien entre la CEC et les *propriétés cibles* pour les techniques-types de terre allégée mais également pour les autres techniques de construction en terre.

Dans cette étude, la variation du seuil de Carbone Organique (OC) impacte seulement de 5 % le pourcentage de volume de sol convenable : peu de volume d'horizons est exclu de la convenance en raison des matières organiques. Cependant, la question des matières organiques ne peut simplement être appréhendée de manière statistique, particulièrement dans le cas de l'extraction de terre sur site. En effet, la plupart des sols comprennent au moins quelques centimètres d'horizons très organiques car ceux-ci sont plus concentrées en surface (Girard et al. 2017). Ce n'est donc pas la convenance de ces horizons qui compte mais plutôt la profondeur à excaver avant d'atteindre une terre minérale convenable. C'est une des limites du présent modèle où l'on a choisi d'établir des seuils binaires qui ne peut appréhender la réalité complexe des interactions entre matière et procédés techniques.

4.1.3 Comparaison avec d'autres techniques constructives

Les éléments composés de terre allégée ont souvent pour objectif d'être le plus isolant possible. Pour cela, les constructeur.ices cherchent à maximiser le volume de fibres relativement au volume de la fraction minérale (la terre). Cependant, une cohésion minimale est nécessaire car les éléments de terre allégée sont souvent auto-porteurs* (Flament 2013). Cette cohésion minimale dépend des contraintes appliquées au matériau, donc de ses dimensions et de la forme de la structure dans lequel il est

façonné. Or, c'est la fraction fine de la terre qui apporte cette cohésion, et particulièrement les minéraux argileux. Alors, plus la terre est fine et argileuse, plus le volume de terre nécessaire pour la cohésion minimale est faible, et plus le matériau terre allégée peut être isolant. Lorsque le matériau est façonné plus dense (plus de terre), pour des raisons hygrothermiques, acoustiques ou de mise en œuvre, on parle généralement de « torchis coffré ». Par ailleurs, en plus de l'amélioration des performances thermiques et mécaniques, le procédé de mise en œuvre de la terre allégée est facilité par l'absence d'éléments grossiers.

Ainsi, certains critères de convenance définis pour la terre allégée semblent s'accorder avec ceux favorisant l'occurrence relative des torchis traditionnels*, ou des adobes, parmi les autres techniques de construction en terre crue en période pré-industrielle (Chapitre 3B, 6.1.1.3). Les sols limono-argileux sont favorables à la terre allégée comme aux torchis traditionnels. Cependant, ce qui différencie la terre allégée des torchis traditionnels est la recherche de l'allègement maximal du mélange, favorisé par les terres les plus cohésives possibles, comme le peuvent être les techniques-type d'adobes de petit format. A l'inverse, les torchis tressés peuvent être moins favorables aux terres extrêmement argileuses du fait du retrait au séchage potentiel. Pour la terre allégée comme pour l'adobe et les torchis, la présence d'éléments grossiers est défavorable mais non limitante. L'adobe et la terre allégée sont ainsi relativement proches d'un point de vue « convenance des terres ».

Hamard et al. (2018) ont employé une méthode de projection cartographique similaire, présentée en Chapitre 3A (2.3). Deux différences méthodologiques majeures avec notre méthode peuvent être identifiées. Hamard et al. ont employé un traitement statistique sur des données de bâti historique (Chapitre 3A, 2.3) afin de définir les plages de convenance sur les *propriétés de prédiction*. Ce n'est pas possible pour la terre allégée en l'absence de bâti pré-industriel (1), nous avons donc établi des seuils en concertation avec des praticiens. Une autre différence est la représentation de la convenance des unités cartographiques par *surface* de sol convenable, permise par l'analyse de la convenance de l'horizon 30-60cm uniquement et imposée par le format de la base de données pédologiques employée (DoneSol3 format vecteur, Chapitre 3A, 4.3.1). Nos travaux représentent l'épaisseur d'horizons convenables cumulés pour la terre allégée. On peut suggérer que ces deux représentations ont chacune leurs applications :

- une cartographie exprimée en terme de surface de sols convenables est appropriée à l'analyse de potentiels locaux pour l'emploi de terre du site de construction et excavée spécialement pour ce fait. C'est la représentation à privilégier pour l'étude des choix techniques pré-industriels.

- une analyse détaillant les convenances des horizons est plus adéquate si l'on considère le réemploi de flux de terres d'excavation contemporains car elle permet des calculs statistiques sur les volumes de terre. On s'approche alors de l' « aléa » du tas de terre excavée dont la provenance exacte et éventuellement la profondeur d'excavation n'est pas choisie *a priori*.

Les résultats de Hamard et al. (2018) pour la bauge (Figure 119) sont relativement concordants avec les projections pour la terre allégée (Figure 117a.), par exemple dans la convenance de la couverture de sols issus de limons éoliens. Au sud de la Bretagne, les potentiels pour la bauge semblent cependant bien moins généreux que ceux de la terre allégée. La quantité de ressource disponible et la fraction des terres excavées susceptible de convenir pour la bauge (23%) sont également sensiblement différentes, même si dans les deux cas elles restent largement supérieures aux besoins constructifs à long terme.

Plusieurs éléments peuvent expliquer les variations entre les deux projections.

(1) Les convenances des terres pour les techniques-types de bauge vernaculaire* et de terre allégée contemporaines, bien que se superposant sur de grandes plages de propriétés pédologiques, ne sont pas équivalentes. La bauge semble être gouvernée par la présence de limons, qui sont également bénéfiques aux techniques de terre allégée et de torchis (Chapitre 3B 6.1.1.2). Mais la bauge apparaît

limitée en présence de fraction granulométrique argileuse conséquente, tandis que la terre allégée, comme les torchis, est valorisée pour cette propriété (F2µm et CEC). Cela peut expliquer la plus grande abondance de terres propices à la terre allégée en sud Bretagne, dans les sols sablo-argileux (Figure 117). Surtout, l'évaluation de la convenance par l'emploi dans le patrimoine bâti est probablement une hypothèse minimisant le potentiel de convenance. D'une part, on a vu que l'analyse de patrimoine bâti dans d'autres régions permet souvent d'augmenter la diversité des sols employés pour bâtir (Chapitre 3B, 5.2.1). D'autre part, il n'est pas certain que la projection pour la bauge pré-industrielle corresponde aux choix contemporains. L'abondance technique et énergétique permet probablement d'envisager une ouverture des possibilités, avec des procédés type bauge adaptés à d'autres terres que les sols limoneux.

(2) Les choix de modélisation sont différents : Hamard et al. (2018) imposent un tri des horizons pédologiques préalables à l'évaluation de convenance, en éliminant les horizons organiques selon leur dénomination, et non selon leur teneur en carbone organique. La représentation cartographique est également basée sur les SMU et non directement sur un raster-STU, ce qui donne une impression de limites strictes aux résultats là où raster-STU permet de montrer une distribution plus nuancée.

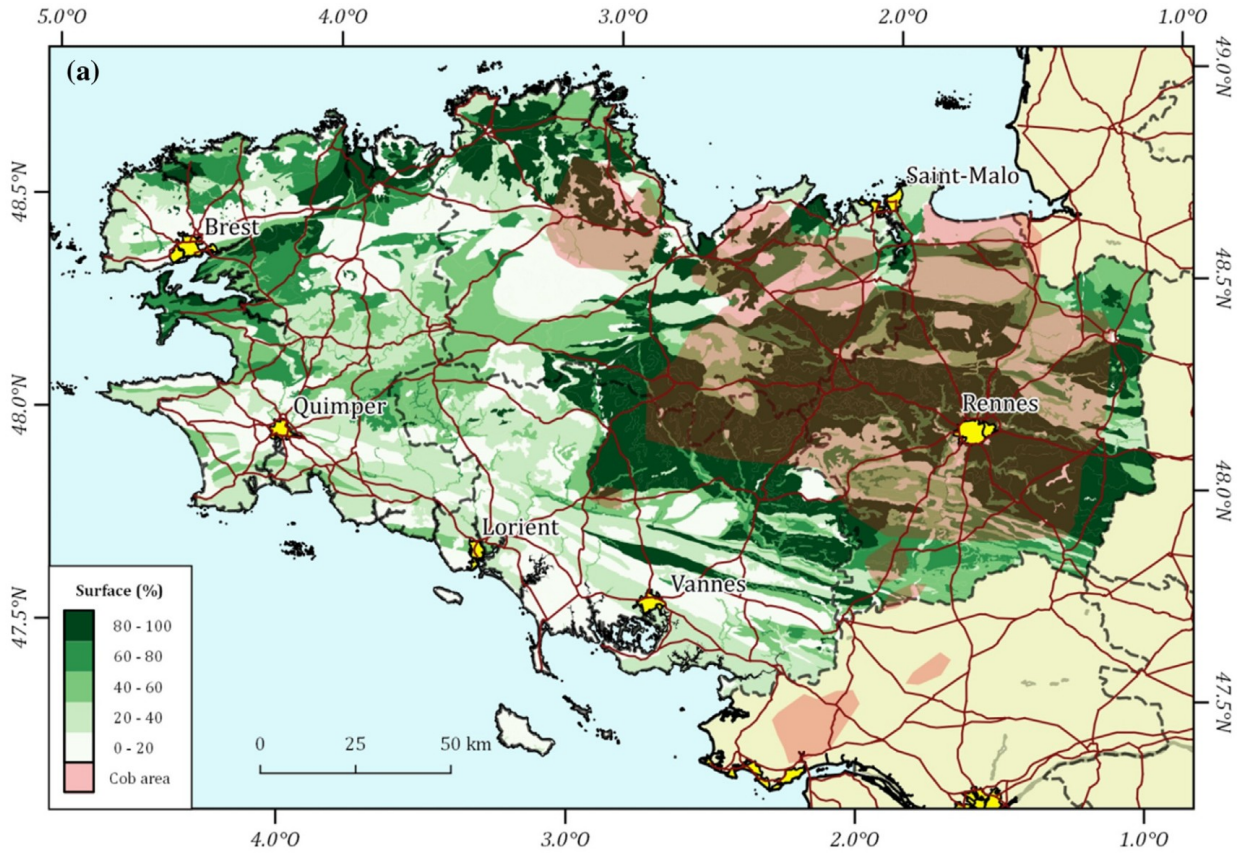


Figure 119 : Carte représentant la surface de sols supposés convenables pour la bauge en Bretagne. Réalisée à partir de statistiques sur les sols employés dans le patrimoine bâti, la convenance est projetée sur les SMU DoneSol3. La zone de distribution du patrimoine vernaculaire bâti en bauge est également représentée (Hamard et al. 2018).

Ces résultats alimentent la compréhension des choix techniques traditionnels et contemporains selon les propriétés des terres à disposition, et particulièrement selon la composition de la fraction fine. Au sein de cette fraction, le pôle limoneux est très favorable à la bauge ; les sols limono-argileux favorables aux torchis tressés mais également convenables pour la bauge, la terre allégée et les

adobes ; le pôle argileux est très favorable à la terre allégée et aux adobes de petit format, mais également aux torchis tressés.

La cartographie du potentiel des sols pour construire en terre crue montrera tout son potentiel lorsque l'ensemble des techniques-type aura été considéré. Au vu de la grande diversité des terres employées pour construire en terre crue, toutes techniques confondues, montrée dans l'étude des densités bâties en terre sur le territoire hexagonal (Chapitre 3B, 6.1.4), il est assez probable que la plupart des sols présentent du potentiel pour au moins l'une des techniques-type. On peut dès lors imaginer qu'une carte de convenance des terres pour la construction en terre crue, toutes techniques confondues, montrerait des potentiels considérables tant en termes de distribution dans l'espace que de volumes disponibles.

4.2 Limites de la méthode et précautions d'usage

4.2.1 Un outil non adapté à la prise de décision in situ

Dans ce premier essai de calcul et de représentation de la disponibilité de la ressource pour bâtir en terre allégée, nous avons défini des seuils binaires de convenance/non convenance selon des proxies, propriétés pédologiques sensées représenter la qualité d'une terre pour son emploi dans les procédés de mise en œuvre et d'usage. Ces seuils binaires présentent l'intérêt d'être rapides à définir et à modéliser. Cela facilite également l'analyse des résultats et leur analyse de sensibilité. Cependant, la relation entre les choix techniques et les propriétés des sols présentent des corrélations relativement faibles, et surtout montrent des tendances croissantes ou décroissantes de convenance continues plutôt que des limites strictes (Chapitre 3B). Une conception binaire des propriétés de convenance n'est donc pas réaliste, et ne doit pas dépasser le cadre expérimental. Notamment, il serait regrettable qu'une approche binaire serve de base à l'élaboration de cadres réglementaires.

L'approximation de la prédiction des propriétés pédologiques que permettent les données pédologiques spatialisées ne permet pas une prédiction exacte de l'occurrence d'un sol ou de ses propriétés à un endroit donné (Chapitre 3A, 4.2). Pour l'évaluation des besoins de rénovation et de construction neuve, des évaluations approximatives ont été réalisées. Ces calculs ne permettent que l'établissement d'ordres de grandeur et ne peuvent être considérés comme exacts.

La présente évaluation de la quantité et de la distribution de ressource en terre convenable n'est donc pas un calcul d'optimisation technique visant une gestion des ressources en matériaux de construction. La précision des cartes ne permet pas leur utilisation à l'échelle d'un projet de construction pour la prospection des ressources en terre, ou pour valider la convenance d'une terre selon son origine géographique. En pratique, l'expertise de l'artisan.e appliquée aux tests sensibles et aux essais sur des éléments d'ouvrage sont les seules sources fiables d'information concernant la convenance d'une terre pour la construction en terre crue (CCTC 2018).

Dans tous les cas, le modèle de calcul de convenance a été conçu avec l'objectif de sous-estimer la ressource potentielle et surestimer les besoins lorsqu'un processus d'évaluation précis n'était pas possible, résultant en évaluation probablement « pessimiste » des potentiels. De ce fait, on suppose que les potentiels réels pourraient être plutôt supérieurs à ceux présentées dans les résultats de cette étude. Cela ne pourrait qu'affirmer plus encore le sentiment d'abondance qui s'en dégage.

4.2.2 Pollution et propriété privée : les vraies limites de convenance des terres ?

Dans le choix d'une technique de construction et d'une terre parmi un ensemble de terres disponibles, d'autres critères devraient être considérés : la propriété privée et l'artificialisation limitant l'accès aux sols, les contaminations physiques ou chimiques naturelles ou anthropiques du sol, et probablement d'autres paramètres « pratiques » d'accessibilité de la ressource.

La présence de polluants dans une terre est une caractéristique très difficile à prédire sans analyses de laboratoire, tant la contamination des sols est généralisée, et particulièrement en contexte urbain. Certaines études évaluent la pollution chimique urbaine à environ 10% des sols urbains (Ferreira et al. 2019). Puisque la majorité des terres d'excavation provient des zones urbaines, cela pourrait avoir un impact significatif sur les résultats de ressources disponibles. Certains rapports d'évaluation de convenance des terres du Collectif des Terreux Armoricains (2022b) précisent d'ailleurs que « le réemploi de terres d'excavation considérées comme remblais car remaniées par l'Homme n'est pas envisageable car l'adjonction et mélanges de matériaux et la régularité de l'horizon ne peuvent être assurés. ».

Malgré tout, au vu des quantités disponibles, considérablement plus grandes que les besoins estimés, il est probable que les conclusions de cette étude sur la disponibilité de la terre pour l'isolation en terre allégée ne soient pas significativement impactées par les freins d'accessibilité à la terre.

4.2.3 Une évaluation limitée à la terre allégée

Afin de calculer et de représenter spatialement la disponibilité de la ressource en terre pour bâtir en terre allégée, il a été nécessaire de poser des seuils ou des fonctions de convenance relativement aux propriétés du sol. Ceux-ci doivent idéalement être définis dans un travail de synthèse combinant idéalement :

- l'analyse des terres employées dans le patrimoine vernaculaire, préindustriel et/ou contemporain (Chapitre 3B) (Hamard et al. 2018);

- l'étude de la mécanique de la matière dans les procédés-types concernés, dans une approche holistique intégrant l'ensemble des étapes de la mise en œuvre et la diversité des sous-procédés (Chapitre 2, 6) ;

- la concertation avec les praticien.nes dans la définition et/ou la validation des propriétés ou des seuils/fonctions choisies (2.1.3).

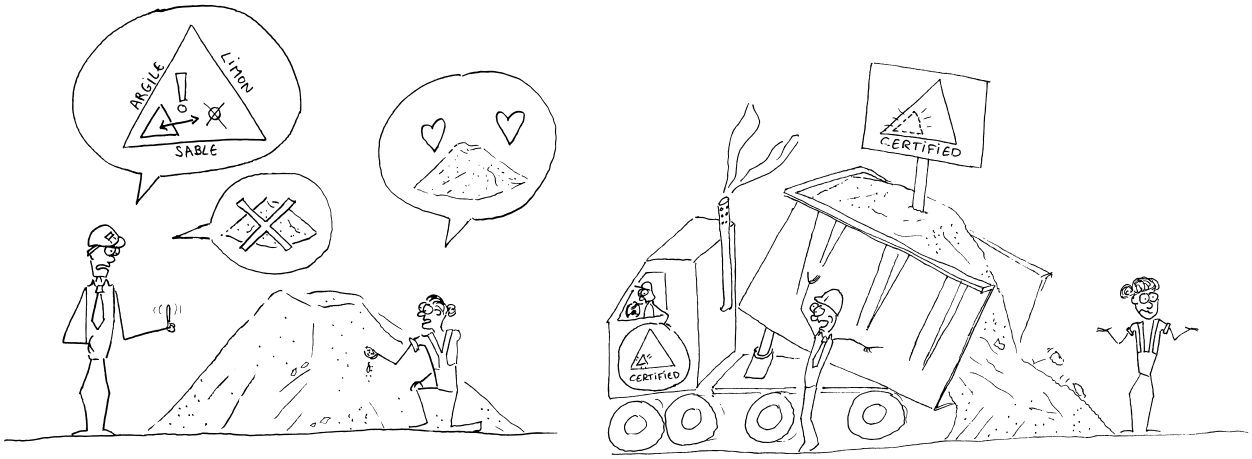
Pour la terre allégée, il n'existe pas de patrimoine pré-industriel bâti en cette technique puisque son invention aurait eu lieu au cours du XXe siècle. Cependant, un travail d'analyse de l'influence des propriétés des terres sur les barbotines au cœur des procédés de terre allégée a été réalisé par Vinceslas (2019). En concertation avec des constructeur.ices expérimentées sur différents procédés de terre allégée, nous avons ainsi pu nous baser sur ces résultats pour l'établissement de propriétés de prédiction et de seuils.

Pour les autres techniques-types de construction en terre crue considérées dans ce travail de thèse (bauge, pisé, adobes, torchis traditionnel), nous ne disposons pas d'une telle base académique, car à notre connaissance la thèse de Vinceslas (2019) est l'un des seuls travaux conséquent d'analyse des propriétés mécaniques et pratiques des mélanges de terres au cours des procédés de mise en œuvre, à l'exception de récentes recherches sur des procédés robotisés (Pinel et al. 2017; Ji et al. 2023). Nous avons en effet relevé que la plupart des études analysent l'impact des propriétés des terres sur les propriétés d'usage du matériau (Chapitre 1), alors que dans l'étude des choix techniques la considération des interactions en cours de fabrication est indispensable (Chapitre 2, 6). Cependant, nous disposons au terme de cette étude d'indications de convenance relative entre les techniques-types de terre crue. Mais nous ne pensons pas que cela soit suffisant pour les projeter dans des évaluations cartographiques de disponibilité de ressources. D'une part parce que les cultures constructives contemporaines, mêmes frugales, s'inscrivent dans des contextes constructifs différents qui pourraient changer les préconisations relatives à la convenance des terres. D'autre part, du fait de l'impact potentiel de ce type de travail sur le déploiement de la filière terre (4.3), (im)poser ce type de représentation nécessiterait une prise de recul que nous ne pensons pas avoir au terme de cette étude. En revanche, nous espérons que les résultats produits alimenteront un débat qui, après

consultation des principales.aux intéressé.es (constructeur.ices et habitant.es), pourra déboucher sur la production d'une série de cartes pour l'ensemble des techniques-types et du territoire si cela s'avère pertinent.

Ainsi, proposer une carte de la distribution de la ressource pour la terre allégée en Bretagne peut être vu comme un premier essai de diffusion, dont l'observation de l'impact a moyen terme indiquera l'intérêt de reproduire un tel travail à plus grande échelle. Aujourd'hui, deux ans après la publication de la première version de ce travail cartographique, peut-être serait-il temps de faire le point et de proposer à la filière ces nouveaux outils pour lesquels nous disposons d'une méthode de conception flexible et éprouvée.

4.3 Risques et mésusages des outils proposés



En l'absence de documents techniques, les publications académiques peuvent rapidement devenir normalisantes. Cela peut déposséder les constructeur.ices de leur autonomie de décision et finalement nuire à la qualité des choix techniques.

4.3.1 Mésusages des outils et mesures de protection

Lorsque des seuils quantitatifs sur des propriétés du sol représentant la convenance d'une terre relativement à une technique de construction en terre crue sont proposés dans la littérature, l'expérience montre qu'ils sont souvent repris comme référence dans des documents académiques et/ou techniques (Chapitre 1, 1.3). Souvent, cette reprise dépasse le cadre de pertinence de la recommandation initiale. Par exemple, le fuseau granulométrique publié par Houben & Guillaud (2006) est presque systématiquement employé comme référence technique ou académique, alors même que ses auteur.ices précisent que les limites sont simplement indicatives (Gomes et al. 2014). Ji et al. (2023) comparent leurs échantillons de terre à la plage de valeur de VBS des échantillons de pisé de Rojat et al. (2020) (Chapitre 1, 1.1 , Figure 27) : les échantillons en dehors de la plage de valeurs sont indiqués comme des matériaux « non convenables pour construire en terre »… alors que la représentation de Rojat et al. n'est pas proposée dans ce but, mais plutôt au contraire pour montrer que la limitation de convenance par seuils est inadaptée (Rojat et al. 2020).

Ce phénomène est bien connu des géotechniciens, pédologues et dans d'autres sciences de modélisation : lorsqu'une relation mathématique, voir une simple corrélation, est mise en évidence entre deux propriétés, celle-ci est presque systématiquement reprise hors du contexte désiré dans un but de prédiction. Cela, même lorsque des limites d'applicabilités sont précisées dans la source initiale.

On pourrait être tentés de dire que la responsabilité du mésusage des recommandations n'incombe pas à leurs producteur.ices, d'autant plus lorsque celles-ci sont publiées avec des « précautions d'usage ». Cette question est récurrente en philosophie des techniques : l'outil serait neutre, seul importerait l'usage qui en est fait. Pourtant, la plupart des théoricien.nes des techniques s'accordent

aujourd'hui sur le fait que les outils et techniques portent en elles-mêmes des valeurs d'usage qui sont plus ou moins prévisibles. Ainsi, la divulgation d'un outil entraîne l'ensemble de ses usages potentiels et peut entraîner globalement un impact négatif malgré des potentiels usages positifs (Illich 1973; Ellul 1988), et potentiellement malgré des avertissements.

L'expérience nous montre ici qu'il est hautement probable que des seuils produits soient réemployés hors de leur contexte de pertinence. Notamment, il serait particulièrement regrettable que ceux-ci permettent l'établissement de normes-produit qui *in fine* restreindraient les possibilités constructives des techniques de terre crue et/ou en feraient perdre les intérêts socio-environnementaux (Chapitre 1, 1.3). Ainsi, afin d'éviter les abus potentiels dans l'utilisation des seuils utilisés dans cette étude, ceux-cis ne sont pas explicitement visibles dans le corps de texte de cette thèse (2.1.2) ni de l'article publié (Verron-Guillemot et al. 2022).

Par ailleurs, nous espérons que l'outil de production de cartes de disponibilité des ressources et les cartes produites puisse permettre la visibilisation des potentiels des procédés de construction en terre crue sur les territoires (1). Mais calculer la disponibilité des terres se rapproche d'une perspective de l'environnement comme écosystème à services : le service écosystémique « approvisionnement en matériaux de construction » est reconnu dans la littérature académique agricole, forestière, minière et géotechnique, mais très peu dans la littérature pédologique (Brevik et al. 2019). Dans ces conceptions de l'environnement, donner une nouvelle « valeur » aux sols est supposé favoriser sa protection en rappelant aux décideur.euses la valeur des écosystèmes par sa quantification. Pourtant, cette conception du monde est aujourd'hui critiquée (Maris 2014; CGDD 2015; Bérard 2021; Autard 2022; Delord & Devictor 2023). La valorisation de la « nature » peut notamment être vue comme une prolongation du système extractiviste* dans de nouveaux services, nourrissant la spéculation et la croissance économique par intégration de nouveaux biens à commercialiser, ou plus simplement, comme une dépossession des moyens sensibles de percevoir le monde (Maris 2014).

Nous avons bien décrit la complexité de ce qui fait la « valeur » du sol relativement à son potentiel constructif et tous les facteurs faisant varier cette valeur, intimement liés au contexte du chantier. Dès lors, une quantification ne peut qu'être arbitraire et utilisée à des fins illustratives, car toute utilisation décisionnelle de grande échelle ne saurait être sociétalement pertinente. A l'inverse, les évaluations sensibles de la pertinence des choix, s'adaptant aux contextes ultra-locaux, semblent bien plus pertinentes, mais ne sauraient être généralisées et donc intégrées dans un marché à valeurs homogènes. Une partie de la profession artisanale refuse l'appropriation par les industriels des compétences liées aux choix techniques (p. ex. les essais sensoriels, voir Chapitre 5, 2). Une homogénéisation des choix techniques nuirait à la qualité sociale et environnementale des chantiers (Contexte, 3).

Dans ce sens, la cartographie de la « ressource convenable » est à double tranchant. Elle peut servir à la conscientisation des possibilités constructives locales pour toutes et tous, en permettant à chacun.e, d'un coup d'œil, de *prendre conscience que la terre est possible* sur son territoire. C'est ce que permettent déjà les représentations cartographiques de la présence de patrimoine bâti en terre crue, très souvent réemployées dans les publications relatives à la terre. D'un autre côté, ce nouvel outil cartographique ouvre la possibilité d'installation d'une logique mercantile et/ou normalisante en apportant une (forcément fausse) *preuve de valeur*, par exemple en autorisant la vente de terres « caractérisées comme convenables ».

Si nous avons montré dans ce travail de thèse que cette prédiction de valeur est très peu « fiable », on a vu que la fiabilité n'est pas un critère limitant pour le réemploi d'outils de prédiction, comme l'a montré le réemploi massif des fuseaux granulométriques du laboratoire CRAterre pourtant publiés « à titre d'exemple » (Chapitre 1, 1.3).

Dans une logique de moindre mésusage de ces travaux, nous proposons deux aménagements dans la publication et le réemploi de tels outils :

- éviter la publication de seuils quantitatifs, trop aisément réemployables hors contexte expérimentaux et sans réflexion de fond sur leur sens, et sans valeur généralisable ;

- accompagner les outils proposés par des rappels indiquant clairement les limites de ces travaux, et éventuellement des propositions d'alternatives aux mésusages possibles. Par exemple, nous accompagnerons désormais les « cartes de convenance » de ce message :

> « L'acuité de cette projection cartographique des potentiels des sols pour construire n'est pas employable en pratique pour les chantiers. Les essais sensibles des constructeur.ices, précis et adaptés aux contextes des chantiers, sont plus pertinents pour l'évaluation et la sélection des techniques de mise en œuvre. »

4.3.2 La terre crue, « éco-brunissement » de la filière terrassement ?

Cette cartographie est donc plutôt une vue de l'esprit permettant de prioriser des actions a impact positif pour le secteur de la construction : construire en terre *crue*, dans un contexte de construction frugale, ne demandera jamais de grandes quantités de sol et ne détruit pas la ressource ; tandis que le secteur du BTP excave et artificialise massivement les écosystèmes pédologiques, à des vitesses dépassant complètement toute possibilité de réemploi dans la construction en terre crue (Contexte, 1.3).

Même si la demande de construction en terre crue était démultipliée et venait à concurrencer les techniques industrielles, les capacités de production du secteur de la terre crue seraient de toute façon limités à court terme par la disponibilité de la main d'œuvre qualifiée pour réaliser et/ou accompagner les chantiers (Contexte, 2.1). Pour la rénovation, la transmission des savoir-faire semble être un chantier conséquent et une coordination territoriale est probablement nécessaire pour accompagner le déploiement des filières artisanales écologiques jusqu'à ce qu'elles remplacent totalement les produits pétrosourcés et industriels (Contexte, 1.1). Pour la construction neuve en revanche, à moyen terme, on peut espérer que ce soit surtout la baisse considérable du rythme qui permettra à la demande de rejoindre la capacité de production.

Dans tous les cas, l'intensité de l'excavation du secteur du BTP doit être réduite drastiquement. Si la ressource en terre semble abondante en quantité totale dans de telles représentations, le sol est également un écosystème qui subit déjà de nombreuses pressions d'origine anthropiques (FAO 2015). Tous les sols doivent être préservés en tant qu'écosystèmes de haute valeur et essentiels pour le bien-être humain et non humain. On peut espérer que la rencontre entre la demande de terre pour la terre crue et l'offre de terres extraites arrivera lorsque la construction conventionnelle* aura suffisamment ralenti ses cadences, plutôt que par un développement déraisonné de la construction en terre. Dans cette perspective, la conception de l'économie « circulaire » dévoile ses limites : il semble bien plus pertinent de laisser la filière terrassement s'effondrer sous le poids de ses déchets que de l'encourager dans sa perpétuation en « valorisant » ses excédents :

> « L'optimisation du recyclage est à l'origine d'un paradoxe productif : plus on recycle, mieux on recycle, plus la production de déchets augmente. C'est un effet rebond* caractéristique de l'optimisation des systèmes techniques modernes : loin de garantir la réduction nécessaire du flux de matière en amont ou en aval de la consommation, le recyclage s'inscrit tel un moteur productif, comme un outil permettant de légitimer la production de déchets réputés recyclables. […] Aussi, plutôt que de constituer un rempart au consumérisme, l'économie circulaire et ses principaux relais politiques et industriels permettent de renforcer un modèle productif par ailleurs critiqué. » (Monsaingeon 2023:113-14)

Finalement, le potentiel de réemploi des terres d'excavation dans l'isolation en terre allégée ne signifie pas que les opérations de construction et de terrassement ne doivent pas être considérablement ralenties. La communication autour de la « valorisation des déchets », de la « circularité » peut souvent être attribuée à une opération de greenwashing* (Contexte, 1.3). Le terme « éco-brunissement* » pourrait qualifier cette écologie de façade qui se nourrit du regain d'intérêt pour la construction en terre pour justifier des modèles industriels obsolètes (Terres Chercheuses 2024).

Les constructeur.ices terre crue emploient des terres d'excavation parce qu'elles sont démesurément extraites, transportées et mises en décharge ; mais il est certain qu'en l'absence de ce système extractiviste* le choix de l'extraction sur site est le plus pertinent. L'extraction peut même être envisagée de manière « régénérative* », par exemple en participant à la création de mares qui accueilleront la biodiversité.

5 Conclusion du Chapitre 4



Figure 120 : Résumé graphique de la méthode d'évaluation de la ressource convenable pour construire en terre allégée (Verron-Guillemot et al. 2022).

En l'absence de bâti préindustriel témoignant des possibles constructifs, évaluer les propriétés des sols favorables au choix de la technique-type de terre allégée ne peut se faire par une approche statistique sur les terres employées pour bâtir comme nous avons pu le faire pour quatre techniques-type traditionnelles (Chapitre 3B). Puisque les propriétés pédologiques impactent les potentiels techniques de construction sur l'ensemble du cycle de vie du matériau (Chapitre 2), une approche possible est de rechercher quelles sont les gestes ou étapes qui sont impactées par la qualité de la terre, et comment certaines caractéristiques pédologiques les facilitent ou les freinent (Figure 120, 1). Les fractions de cycle de vie impactées sont appelées *propriétés cibles*, et les propriétés pédologiques supposées les impacter sont nommées *propriétés de prédiction*. Par la discussion avec des expert.es de la construction en terre allégée et en complétant par la littérature académique existante sur le sujet, cinq propriétés cibles sont identifiées : aisance d'excavation, aisance de tamisage, aisance d'enrobage des fibres, comportement mécanique à l'état frais*, comportement mécanique à l'état sec. Cinq propriétés de prédiction sont définies : épaisseur du sol convenable, F2000µm_D, carbone organique, F2000µm, CEC (Figure 120, 2). Lorsqu'une terre valide les seuils définis sur les cinq propriétés de prédiction, elle est supposée convenable pour construire en terre allégée.

A partir de cette méthode, un tri algorithmique est réalisé sur les horizons pédologiques décrits dans la base de données pédologiques DoneSol3 Bretagne (Figure 120, 3). Sont estimés sur ce territoire : les volumes totaux de sol (27.5 Gm^3), les volumes supposés convenables pour construire en terre allégée (13.3 Gm^3), la fraction totale convenable (48 %).

En appliquant cette fraction aux volumes de terres excavées chaque année en Bretagne, on estime qu'environ 1.3 Mt de terre convenable pour l'isolation en terre allégée seraient excavées sur les chantiers de terrassements. Au rythme actuel de construction, en considérant que l'ensemble des bâtiments neufs étaient construits en terre allégée, on utiliserait 0.3 Mt de ces terres convenables. En employant le flux restant (1 Mt) pour l'isolation thermique, celui-ci serait suffisant pour isoler l'ensemble du parc bâti nécessitant une isolation thermique en Bretagne en seulement 8 ans. Ces

estimations suggèrent une abondance de la ressource terre convenable pour la technique-type terre allégée en Bretagne. Tant que celle-ci reste crue et non polluée, la question de l'abondance de la ressource en terre pour la construction n'est pas un problème significatif face à la dévastation des sols réalisées dans le cadre du BTP conventionnel.

Sur ces résultats quantitatifs, une analyse de sensibilité est réalisée via l'emploi d'une analyse de Monte Carlo. L'impact du choix des seuils définis sur les propriétés de prédiction ne remet pas en question les résultats obtenus, mais montre l'importance de la CEC dans le mécanisme de validation de la convenance des horizons de sol. Cela suggère que cette propriété pourra être investiguée en priorité pour améliorer la précision d'évaluations similaires.

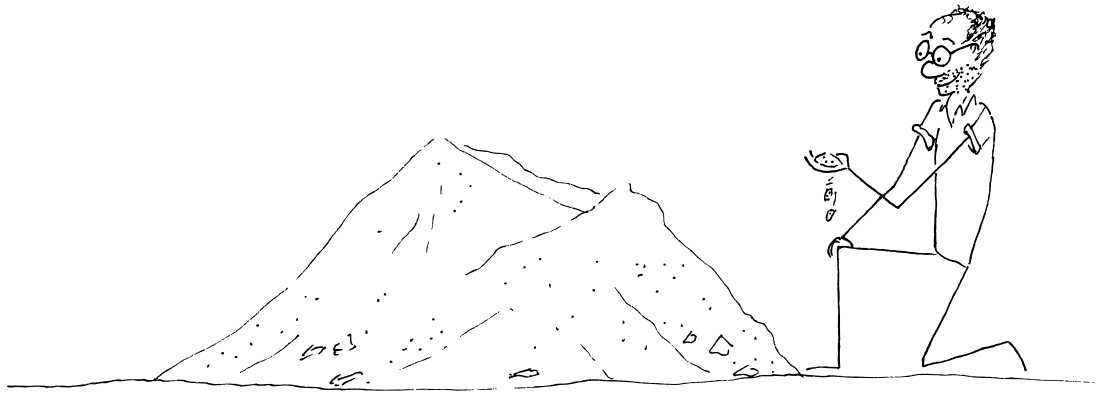
La base de données pédologiques DoneSol3 permet également de représenter les propriétés pédologiques dans l'espace. Par calcul algorithmique, on projette dans l'espace la disponibilité de la ressource en terre convenable (Figure 120, 4). On observe que celle-ci n'est pas équitablement répartie, mais que sur la plupart des communes de Bretagne, les quantités disponibles sont largement supérieures aux besoins estimés pour l'isolation thermique. La terre convenable pour construire en terre allégée est donc abondante, mais également spatialement accessible. 99,5 % du territoire est situé à moins d'1km d'une ressource convenable. Les fibres employées étant souvent disponibles à proximité immédiate des chantiers, on peut considérer la terre allégée comme une technique de construction potentiellement « super-locale ».

Prenant en considération l'ambivalence des techniques (Illich 1973; Ellul 1988), nous avons cherché à évaluer les usages potentiels des outils produits dans le cadre de cette recherche et à minimiser les risques de mésusage. Notamment, la publication de seuils sur des propriétés pédologiques pourrait « faire référence » (Chapitre 1, 1.3) alors qu'ils ne représentent pas la diversité des possibles constructifs. Cela pourrait compromettre un déploiement équilibré de la filière terre allégée. Par ailleurs, nous questionnons le fond même de ce type de travail de recherche, visant à quantifier des ressources et participant ainsi à leur « valorisation économique » : de tels travaux poursuivent la vision marchande des écosystèmes alors que cette philosophie est motrice dans la perpétuation des catastrophes contemporaines.

Ce travail a mis l'accent sur le potentiel de réemploi des terres d'excavations issues des chantiers de BTP conventionnel. Cependant, nous attirons l'attention sur l'effet rebond* potentiel du réemploi de terres et plus généralement de l'« économie circulaire » à travers l'usage « greenwashing* » ou d'« éco-brunissement* » qui en est fait (Contexte, 1.3). Au vu de l'intensité du terrassement du monde, il est irrationnel de voir la construction en terre crue comme exutoire des terres de déblai sans réduction radicale de la production de ces « déchets » ; ceci d'autant plus si l'on considère que le rythme de construction neuve doit considérablement réduire (Contexte, 1.1). En pratique, un équilibre doit être trouvé entre d'une part, le gain d'effort stratégique que permet le réemploi de terres déjà excavées par les constructeur.ices terre crue, qui facilite économiquement* le déploiement de la filière ; et d'autre part la perpétuation du système extractiviste* par la réduction de ses coûts logistiques et surtout par le bénéfice d'une image faussement « circulaire ».

Chapitre 5 : choix technique et enracinement

Ce chapitre s'écarte de la discipline « Génie civil » et de l'étude des procédés. Il gagnerait probablement à mieux s'ancrer dans des travaux académiques précédents d'économie, de sociologie et d'anthropologie. En l'état, il peut être considéré comme une prise de recul sur ce qui gouverne les choix techniques contemporains au-delà de la physique des matériaux. C'est pour moi une expérimentation d'autres approches scientifiques et philosophiques.*



Résumé :

Les choix des techniques de construction en terre crue sont guidés par les propriétés physiques et chimiques des terres à disposition. Guidés par des essais dits « de terrain », « sensoriels » ou « sensibles », les artisan.es* choisissent les procédés qu'iels jugent adaptés, principalement en amont du chantier, mais affinent leurs choix et les contrôlent au cours même du façonnage. Ces essais peuvent mobiliser les 5 sens et le corps entier, et parfois du matériel simple.

Le choix technique* ne s'effectue pas en consultant des abaques de comportement de la matière au cours de l'essai, mais en mobilisant une expertise, nourrie par : l'expérience des chantiers précédents et celle transmise par des pairs ; la connaissance des enjeux spécifiques au chantier à venir ; l'implication des choix techniques pour le déroulé du chantier. Les artisan.es engagées considèrent également les impacts de leurs choix au-delà du chantier, dans les ramifications des chaînes de productions d'outils et matériaux lorsque leur approvisionnement est externalisé. Pour elleux, une quête permanente d'information sur ces procédés est indispensable, car les chaînes de production mondialisées sont souvent opaques. Des principes éthiques permettent cependant de faciliter les choix, en visant des produits « locaux » ou « artisanaux ».

L'approche scientifique des choix techniques échoue à les prédire par modélisation mécaniste. En revanche, elle pourrait accompagner les choix techniques en développant des outils d'aide à la décision facilitant l'auto-détermination, pour la construction en terre crue et plus généralement pour les techniques de subsistance.

1 Introduction : du déterminisme dans les choix techniques

Les approches considérant que les choix techniques* des populations humaines sont gouvernés par l'environnement matériel sont appelées *déterministes* (Chazelles & Klein 2003; Goizauskas 2020). Nous avons référencé une diversité considérable de facteurs non « environnementaux » sur les choix des techniques de construction en contexte pré-industriel (Chapitre 3A, 3), ce qui nous a indiqué que le déterminisme de l'environnement sur ces choix ne pouvait pas être parfait. Nous observons malgré tout un impact conséquent des propriétés des sols sur les choix des techniques de construction en terre crue. Il y a bien une préférence technique pour certains procédés plutôt que d'autres, selon la composition des sols ; c'est à dire un certain déterminisme :

> « La nature même du matériau terre et le début de la chaîne opératoire (choix des sédiments, prélèvement) témoignent de la connaissance du milieu et des savoirs, souvent empiriques*, des propriétés des différentes terres. » (Cammas, 2015, p. 58, dans Goizauskas, 2019, p. 60)

L'impact du sol sur le choix est ténu, parfois difficile à expliquer mais semble bien présent. Par ailleurs, le choix technique relativement aux propriétés de composition de la terre semble avoir été relatif à l'aisance de mise en œuvre, en relation avec les bénéfices que procuraient chacune des techniques dans leur relation aux usages locaux : temporalités et espaces disponibles, savoir-faire, *etc*..

Pourtant, les constructeur.ices vernaculaires* pré-industriel.les n'avaient pas accès à des analyses de composition de la terre, à des essais mécaniques sur les matériaux et finalement à des abaques de « convenance des terres » pour prendre une décision sur la technique optimale à choisir. Par ailleurs, les constructeur.ices contemporain.es indiquent que les approches prédictives des choix techniques à partir de la composition de la terre sont inadaptées, ce qui semble désormais faire consensus (Chapitre 1, 1.2).

Alors, comment étaient réalisés les choix techniques face aux terres à disposition? Comment le sont-ils aujourd'hui ? Quels compétences sont mobilisées pour prédire la réponse d'un matériau à un procédé envisagé ? La méthode scientifique peut-elle accompagner les choix techniques ?

A partir d'une analyse des « essais sensibles » réalisés par les constructeur.ices au contact de la terre pour évaluer le potentiel de techniques de construction, nous explorons ici leurs capacités à sélectionner des techniques sociétalement* pertinentes grâce à leur expérience et leur engagement politique.

2 Le choix technique en pratique : recours au précédent et essais sensibles

Le choix d'une technique de construction est une étape primordiale, qui nécessite une connaissance des enjeux impliqués dans plusieurs procédés-types et une capacité de projection dans le chantier à venir. Les propriétés de la terre à disposition influencent fortement l'aisance de mise en œuvre (Chapitre 2), c'est donc après évaluation de la ressource qu'un choix adapté aux conditions du chantier peut être réalisé. Dans le processus initial de choix d'une technique, les constructeur.ices contemporain.es mobilisent des essais dits « de terrain », « sensoriels » ou « sensibles » qui les éclairent sur les propriétés du matériau terre à disposition.

2.1 Essais « de terrain » : un compromis entre précision et frugalité ?

Les méthodes d'évaluation dites « de laboratoire » des caractéristiques d'une terre peuvent être décrites comme cherchant à maximiser la précision de la variable évaluée, ainsi qu'à maximiser la réplicabilité des résultats. Ce dernier objectif se traduit notamment dans une recherche de réduction de la dépendance de la méthode de mesure au savoir-faire d'un.e opérateur.ice.

Ce n'est pas l'objectif principal des essais sensibles, aussi appelés « essais de terrain ». Ils intègrent d'autres considérations que la précision et la répétabilité, qui peuvent finalement devenir prépondérantes. Notamment :

- *la rapidité d'obtention du résultat* permet de répondre rapidement à une situation de choix de terre à bâtir ;

- *la simplicité des outils employés* permet à la fois une accessibilité matérielle à l'évaluation pour toutes et tous et une mobilité du processus d'évaluation ;

- *la multifonctionnalité d'un essai*, qui permet une évaluation de plusieurs variables d'intérêt de la terre en un seul procédé d'essai.

Par exemple, les essais de toucher sec ou humide couramment utilisés en pédologie (Vos et al. 2016; Salley et al. 2018; Richer-de-Forges et al. 2022; Turk & Young 2022) sont également employés sur le terrain par les constructeur.ices pour une évaluation rapide du potentiel constructif des terres à disposition. Ils ne nécessitent pas de matériel (éventuellement un peu d'eau), montrent des résultats en quelques secondes, et peuvent être enchaînés dans une suite rapide de gestes permettant l'évaluation de plusieurs propriétés avec un même échantillon (p. ex. l'enchaînement suivant toucher sec ; toucher humide ; façonnage de boudins ; nettoyage des sables et graviers ; lavage des mains).

Ainsi, il est généralement considéré que l'usage des essais de terrain plutôt que d'essais de laboratoire réside dans un compromis entre la simplicité d'exécution et la précision d'évaluation. En cela, on sacrifierait la précision pour la rapidité. Par ailleurs, il est également souvent considéré que les essais de terrain mesurent des *propriétés compositionnelles** ou des *propriétés comportementales** et que c'est à partir de la connaissance de celles-ci que s'évalue le choix des techniques de construction, que le choix technique passe nécessairement par une caractérisation *abstraite* de la matière. Pourtant, quelque chose semble échapper à ces deux conceptions des essais de terrain. Lorsqu'ils sont mobilisés dans le choix des techniques de construction en terre crue, ces essais ne semblent pas se résumer à la mesure de variables « géotechniques ».

2.2 Essais « sensoriels » : le corps comme appareil de mesure, l'expérience comme calibration

Les essais de terrain mobilisent peu d'outils de préparation et de matériel de mesure. Souvent, ils mobilisent le corps, à travers des gestes de façonnage et les sens comme instruments de mesure. Certains essais sont ainsi de véritables techniques du corps (Goizauskas 2019). On les appelle alors également essais « sensoriels ». Le « dispositif sensoriel » (Pillon 2012) mobilisé dans ces évaluations est multiple : toucher, son, odorat, vue, voir goût. De ce fait, comme pour des appareils de laboratoire neufs, une « calibration » des sens est nécessaire pour atteindre une précision d'évaluation[49]. Il faut avoir rencontré une diversité de terres suffisantes pour que toute nouvelle terre puisse être rapprochée d'un comportement connu ou « interpolée » entre deux terres connues. L'expérience s'acquiert par la pratique, mais celle-ci peut être provoquée par des mises en situation volontaires par

49 L'importance de la calibration dans l'évaluation de la texture du sol est explicitée dans le champ des sciences pédologiques, p. ex. (Turk & Young 2022)

exemple par un accompagnement dans des ateliers de comparaison de terres aux propriétés variées (Turk & Young 2022). Leur précision augmente avec l'expérience de l'opérateur (Vos et al. 2016). Vos et al. (2016) montrent que les essais sensoriels mobilisés par les pédologues de terrain pour mesurer la granulométrie peuvent dépasser la précision de protocoles d'évaluation de laboratoire (Vos et al. 2016). Les essais sensoriels ne sont donc pas nécessairement une perte de précision, même lorsqu'il s'agit de mesurer des propriétés compositionnelles* « abstraites » comme la granulométrie.

Mais surtout, ce ne sont pas que des caractéristiques abstraites de la matière qui sont mesurées. Face à une terre, au cours d'essais sensoriels préalables au choix technique, les mots choisis pour expliquer une préférence technique décrivent l'adéquation de la terre à l'une ou l'autre des étapes, qui serait « impossible à compacter », ou « ne collerait pas les fibres », etc. Les constructeur.ices se projettent dans l'ensemble du cycle de vie du chantier pour considérer la qualité du matériau *vis-a-vis de l'usage qui en est fait*. Ce ne sont pas forcément des propriétés géotechniques classiques qui sont évaluées (p. ex. texture, résistance en cisaillement, etc.), bien que celles-ci puissent être mobilisées pour faciliter la compréhension/transmission des phénomènes physiques à l'œuvre et se retrouvent ainsi dans les discours. Finalement, les essais sensoriels se rapportent la plupart du temps à des propriétés complexes d'« ouvrabilité » (Chapitre 2, 6). Complexes, car chaque geste mobilise un ensemble de variables de composition en interactions, et chaque étape de transformation de la matière impacte les suivantes ; car la qualité d'une terre pour un procédé dépend des infinies variantes envisageables par la constructeur.ice, donc de son expérience et ses objectifs. Ainsi, on ne peut comparer directement les essais dits de laboratoire et les essais sensoriels sur leur capacité à mesurer une variable compositionnelle ou comportementale, car ces derniers sont des outils de mesures de variables bien plus complexes et difficilement *caractérisables*.

2.3 Un dispositif sensoriel et un apprentissage plus ou moins explicite

Les essais sensoriels sont mobilisés pour choisir les techniques en amont, mais également tout au long du procédé de mise en œuvre, dans une vérification permanente de l'adéquation des choix de transformation de la matière. Par exemple, le « test du gant » permet de vérifier la proportion terre-eau dans la barbotine, assurance de son pouvoir couvrant des fibres dans le mélange de terre allégée (Vinceslas 2019) (Chapitre 4, 2.2.3). Les évaluations sensorielles sont à la fois contrôle des étapes précédentes et prédictions de la suite du chantier. Ils font l'interface entre l'artisan.e et la matière, en permettent d'établir un rapport à la temporalité spécifique à l'artisanat :

> « La capacité d'anticipation peut également être rapprochée de la métis, cette ruse de l'intelligence qui caractérisait le travail des artisans pour les Grecs à l'Antiquité (Detienne & Vernant, 2018). Selon Detienne et Vernant, la métis consiste à « voir en même temps devant et derrière, c'est-à-dire d'abord avoir l'expérience du passé pour deviner ce qui va se produire, mais aussi rapprocher le futur des événements passés » (Goizauskas 2019)

Située au cœur de l'action technique, c'est une approche « incrémentale » (Paquot 2013, dans (La Facto 2023:62)) où les choix techniques s'affinent en continu au fil de l'expérience.

Sennett (2009) différencie les savoirs *explicites* ou *conceptuels*, qui peuvent être verbalisés à l'oral ou à l'écrit, des savoirs *tacites* qui ne peuvent être transmis que par l'imitation, la répétition et la mise en pratique des gestes (La Facto 2023). Les essais mobilisés sur les chantiers terre crue peuvent être positionnés sur un *continuum* entre ces deux catégories. Les plus explicites sont décrits dans les guides d'initiation à la terre : test du cigare, de la pastille , *etc.*. Ils ne participent pas au façonnage de

la matière et sont spécifiquement destinés à guider la décision. Ils sont souvent un peu conceptualisés, voir rationalisés: des conditions de répétabilité sont conseillées, des guides de lecture des résultats sont proposés. Ces essais sont communicables aux non initié.es comme aux praticien.nes. D'autres « essais » sont plus implicites, et se font au cours du geste de travail de la matière. L'écoute de la résonance du pisoir au cours du compactage renseigne l'ouvrier.e avisé.e sur l'état de compaction de la matière ("Meunier", dans Goizauskas 2019), mais le geste de compaction a pour but initial de façonner l'élément d'ouvrage. Le corps entier peut être mobilisé, à la façon d'un instrument de mesure, « pour interroger et vérifier l'état de la matière au cours de sa transformation, avec des correspondances subtiles entre les sens qui attestent d'une connaissance approfondie des substances travaillées » (Lanoë 2016). Plus qu'une simple mesure, c'est en partie par ces essais sensoriels permanents que se façonne l'expertise : la compréhension de la matière et de son impact sur un choix technique pertinent, en quelque sorte la calibration du corps-outil, se fait « au cours même de l'action technique » (Lanoë 2016).

Pour les essais sensoriels plus *tacites* et implicites, les artisan.es ne disposent pas de grilles de lecture des phénomènes ressentis pour guider les choix. La « calibration » du corps-outil est alors également implicite. Elle se fait à travers l'expérience vécue de travail de la matière. La projection des potentiels de la terre pour construire, de ses « affordances » (Goizauskas 2019), à partir d'essais sensoriels sur le tas de terre, se fait en interpolant ou extrapolant par rapport à d'autres terres déjà connues ("Meunier", dans Goizauskas 2019). Le suivi de l'état hydrique de façonnage (p. ex. compaction du pisé) est réalisé par toucher de la terre, mais s'appuie sur la connaissance de l'ouvrabilité du façonnage des levées précédentes selon leur état hydrique. C'est un retour d'expérience sur l'ensemble des chantiers précédents qui est mobilisé dans le cas d'essais réalisés pour le choix de la technique au début du chantier amont ; l'expérience du chantier en cours et du façonnage des éléments précédents s'y ajoute pour certains essais de suivi de l'état de la matière. L'expérience peut s'acquérir par la pratique, par essai-erreur. Mais elle peut être transmise par d'autres constructeur.ices. Au cours de formations à la construction en terre crue, on enseigne l'interprétation des sens au cours des gestes de façonnage. L'observation du bâti traditionnel* est également source de savoir-faire : certain.es artisan.es considèrent que la pratique de la réhabilitation du bâti existant est une étape indispensable à la maîtrise du métier ("Dugelay" et "Meunier" dans Goizauskas 2019:54), car elle permet d'observer les pathologies à éviter. Elle fut en tout cas une étape inévitable pour les artisan.es qui redécouvrirent les techniques de construction en terre crue à la fin du XXe siècle (Villain 2020).

2.4 Essais « sensibles » : « évaluations holistiques spontanées »

Le choix de la technique de construction, ainsi que celui de la terre la plus adaptée lorsque plusieurs choix sont possibles, est une étape « totale » (Goizauskas 2019) qui conditionne le déroulé de l'ensemble du chantier. C'est un moment stratégique qui mobilise une « forte vigilance » des constructeur.ices (Goizauskas 2019) :

> « Parfois, je passais mes week-ends à chercher des tas de terre » ("Meunier", dans Goizauskas, 2019, p. 53)

La décision de la technique à employer dépend des propriétés physiques de la matière, de leur interaction complexe au sein des procédés. Mais elle dépend également du contexte du chantier, de l'expérience personnelle des constructeur.ices, et de leur système de valeurs : les enjeux des différents choix possibles sont pondérés plus ou moins explicitement avant de prendre une décision. La conception politique est indissociable de l'expérience vécue ou du savoir faire technique au contact du matériau. Le choix technique s'opère dans toute la complexité de la perception des enjeux individuels et sociétaux de celui ou celle qui en prend la décision.

Avec la prise en considération des enjeux sociétaux dans le choix technique, le moment du choix assisté par les essais sensoriels, au contact de la terre à disposition, mobilise les capacités prédictives des constructeur.ices à l'extrême. C'est un moment *total* et *situé* :

> « Total, car c'est un moment qui invite à penser l'ensemble des relations à la matière, à l'environnement, aux chantiers passées et au chantier à venir. Situé, car la sélection d'une terre est avant tout la rencontre d'un individu avec une matière dans un lieu. »
> (Goizauskas, 2019, p. 67).

L'évaluation est spontanée, *sensible*, ce qui lui permet d'intégrer le particulier du contexte : préférences et compétences, environnement naturel, objectifs spécifiques locaux. Mais elle peut avoir une portée holistique, et les enjeux *collectifs*, notamment ceux qui sont impliqués au-delà de l'espace-temps du chantier, peuvent être considérés.

Ainsi, il semble que les essais *sensibles* soient plus que des essais *sensoriels*. Ce ne sont pas simplement des essais de terrain, à bas coût, permettant de s'abstraire d'essais de laboratoire « plus performants ». Ce ne sont pas non plus simplement des tests abstraits, où les conditions de réussite sont invariables et universelles. En étant imprégnés du ressenti, ils induisent un choix technique spécifique au systèmes de valeur de chacun.e. Ils sont donc « opérateur-dépendants » : dans le cadre de la recherche académique, d'une quête de réplicabilité universelle, ils semblent alors de moindre qualité. Mais les agents qui mobilisent ces essais et les valeurs qui les influencent n'apportent pas que de l'aléa. Leur expertise, leur ancrage local, est peut-être garante de meilleure adaptation aux enjeux spécifiques des contextes des chantiers.

3 Propositions : l'économie doit-elle guider les choix techniques ?

Le contexte constructif a une influence sur les techniques choisies, particulièrement si les choix de techniques de construction mobilisent des considérations allant au-delà du bénéfice individuel, au-delà des enjeux de l'espace-temps « chantier ». Les constructeur.ices vernaculaires pré-industriel.les* opéraient en contexte économique et énergétique plus contraint que les constructeur.ices contemporain.es. Les choix techniques contemporains conventionnels sont souvent décrits comme « hors sol », du fait de leur faible corrélation à l'environnement humain et non-humain alentours. Même pour celles et ceux cherchant à s'ancrer dans le contexte local, faire des choix sociétalement* pertinents au quotidien semble aujourd'hui nécessiter une attention considérable, un savoir-faire dédié. Comment l'industrialisation et la mondialisation de l'économie ont-elles complexifié notre rapport aux procédés de production, à l'environnement ? Nous proposons ici de décrire deux contextes économiques types, potentiellement stéréotypes, dans lesquels se sont déroulés et se déroulent les choix de techniques de construction.

3.1 L'économie mondialisée

Dans le cadre de sociétés industrielles mondialisées, la longueur des chaînes de production invisibilise le *travail** qui dépasse le cadre du chantier lorsqu'il se situe dans un champ « dominé » de la production : c'est le travail fantôme (Illich 1981). Ce travail invisible peut prendre plusieurs formes (Figure 121): exploitation sexiste et sexuelle (patriarcat), travailleur.euses pauvres (Piketty 2013) du même pays que les bénéficiaires (précarité) ou bien souvent de pays dominés économiquement (impérialisme), travail des écosystèmes non-humains (extractivisme*) (Mies 2005). Afin de ne pas

perpétuer cette invisibilisation, certain.es philosophes suggèrent qu'il faut sortir de la scission entre le travail « rémunéré » et l'ensemble des autres « activités » des humain.es (Pruvost 2016).

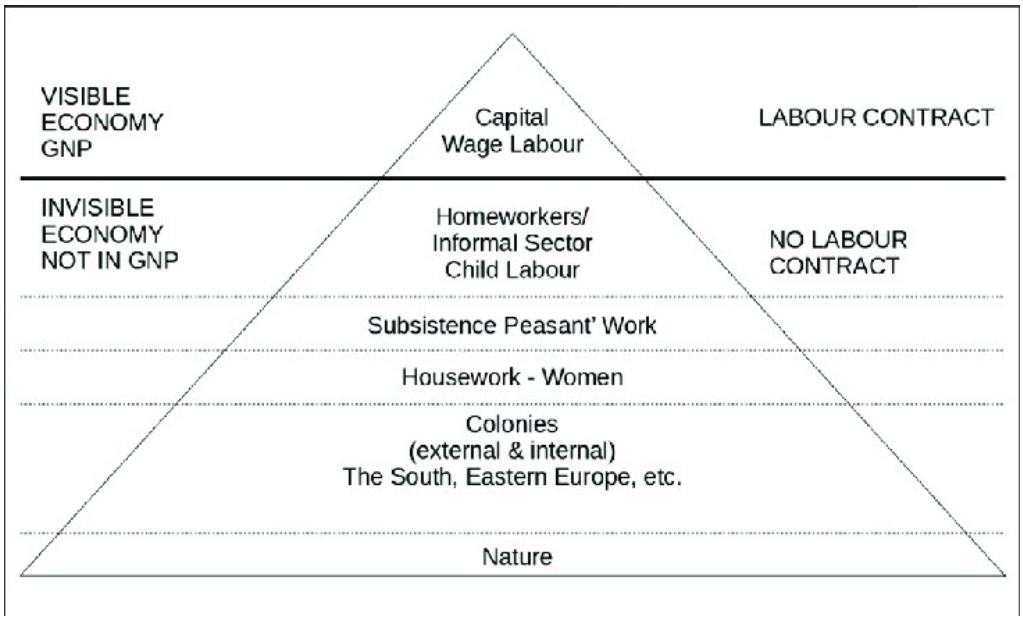


Figure 121: Représentation des catégories de production de travail. Le travail financièrement rémunéré est la seule « économie visible » mais ne représente qu'une fraction du travail global. Le reste des catégories appartient à l'économie « invisible ». [CC BY 4.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=116956924]

Dans le cadre d'un chantier gouverné par la rationalité financière, en contexte économique dominant (Nord Global*), seuls les coûts visibles sont comptés. Dans le cadre de la construction en terre crue, c'est le travail humain *sur chantier* qui coûte cher : le reste du travail (p. ex. fabrication des outils, extraction de l'énergie) est essentiellement importé. Ainsi, la mécanisation, la reformulation granulaire, l'adjuvantation biosourcée industrielle*, facilitent la mise en œuvre sur chantier, ou plutôt réduisent la main d'œuvre à rémunérer, en la déplaçant en partie vers du travail fantôme, humain ou non humain. Cela ne garantit pas une réduction du travail de production : si parfois la centralisation permet des économies de travail dans une « économie d'échelle », la délocalisation induit de nouveaux travaux (transport, logistique, gestion de l'approvisionnement, coût démocratique des techniques de grande échelle[50]). En revanche, le travail et les impacts de la production sont « supraliminaires » ((Anders 1977), dans (Mengard 2014)) : ils sont invisibles aux personnes réalisant les choix techniques, dans l'espace du chantier. Cette invisibilité place les individus « en situation de ne plus assumer la responsabilité de ce qu'ils produisent » (Mengard 2014). C'est l'« amnésie » des impacts des choix techniques (Crawford 2022, dans (Sabbah et al. 2024)). Notamment, l'amnésie de la quantité de travail impliquée dans les chaînes de productions peut donner une impression de forte productivité. Une invisibilisation conséquente, fréquente dans les procédés de robotisation de la construction en terre crue : on y met en scène un chantier sans humain.es en omettant un nombre considérable de ramifications de la chaîne de production*, par exemple, le travail de fabrication et d'entretien des machines et de leurs composants. Le « travail fantôme » inclut ici par exemple, les ressources

50 Plus l'échelle d'un procédé technique est importante, plus sa gestion démocratique est complexe (Illich 1973; Gordon 2020). On peut alors considérer que puisque la délocalisation et la centralisation de la production impliquent la croissance de l'échelle spatiale ou de l'intensité des flux des procédés, un des effets rebonds* de l'économie d'échelle est l'augmentation du travail de gestion démocratique ou en son absence, le déploiement de mécanismes de domination.

métalliques et énergétiques issues de l'extraction minière, la manufacture des composants électroniques, etc..

La surexploitation de la main d'œuvre dans le secteur du bâtiment est en partie attribuable à l'hyper-spécialisation et l'externalisation du travail. La rationalisation* des étapes de mise en œuvre du béton compose des métiers aux activités simplifiées à l'extrême, permettant l'emploi et la mise en concurrence de main d'œuvre peu qualifiée (Poste 2020). En France, les entreprises de travaux délèguent en chaîne ce type de tâches spécialisées. Malgré que les travailleurs se côtoient sur les chantiers, plus le travail est au bout de la chaîne d'externalisation, plus les cadences sont rapides pour rester dans les coûts, et plus les contrats sont précaires (Jounin 2008). La production externalisée dédouane les commanditaires des travaux des ingérences du travail, par exemple en ayant recours massivement aux agences d'intérim. Dans la chaîne de valeur* de production des matériaux, la surexploitation de la main d'œuvre est également invisibilisée par la délégation des tâches et leur délocalisation (Chapitre 1, 1). Les chaînes d'approvisionnement des métaux sont notamment citées pour leurs manque de transparence, entraînant des conditions de travail forcé précaires et dangereuses de l'extraction au façonnage des éléments.

Ainsi, dans un système économique mondialisé, l'effort déployé dans la mise en œuvre d'une technique de construction n'est pas qu'une « aisance de manipulation » de la matière sur le chantier. L'ensemble de l'écosystème social et environnemental participe à l'établissement d'une chaîne de production dont le chantier et son économie directement visible ne représente souvent qu'une maigre « partie émergée ». Considérer l'ensemble des enjeux des chaînes de production nécessite un travail d'enquête conséquent. Et plus celles-ci sont longues et ramifiées dans l'espace et le temps, moins il devient possible d'avoir la souveraineté dans le choix des impacts engendrés par ses choix techniques. Par ailleurs, l'arrivée permanente de nouveaux produits industriels renouvelle perpétuellement le besoin d'enquête.

Dans ce contexte, l'influence de l'environnement direct sur l'économie visible des chantiers est négligeable. Autrement dit, lorsqu'un choix technique est sociétalement irrationnel, il peut très bien être financièrement avantageux. Préfabriquer des éléments d'ouvrages en usines centralisées et délocalisées évite du travail rémunéré sur les chantiers des pays aux économies fortes, et rend le procédé financièrement efficace, malgré l'impact considérable du transport des matériaux. La valeur financière et le « travail sociétal » sont décorrélés. Un outil ou matériau « peu cher » ne veut pas dire qu'il n'a pas nécessité beaucoup de travail. Alors, suivre une optimisation des coûts financiers ne permet pas de s'assurer qu'il s'agit d'un optimum sociétal.

3.2 L'économie du marché du bourg

Dans le cadres de sociétés antérieures aux circuits de transformation-commerce mondialisés, on peut supposer que la plupart du *travail** était visible dans l'économie « du marché du bourg » (Marcom & Pruvost 2021), ou du moins pouvait l'être à qui voulait le voir:

> « Ce marché du bourg, c'est une économie de marché, mais les choses sont transparentes. Dans le marché du canton où tout le monde va une fois par semaine, le paysan qui vient avec 3 canards, 2 douzaines d'œufs et 5 kg de blettes, tout le monde sait comment il fait pousser ses blettes, comment il nourrit ses poules et ses canards. Donc quand il propose un prix qui est accepté, c'est que tout le monde voit où se situe le bon prix, c'est-à-dire le prix juste de la rémunération de son travail. C'est aussi un peu parce que tout le monde fait à peu près la même chose, a à peu près les mêmes conditions de travail, bien qu'il y ait des variations. Il y a quelque chose d'assez transparent et d'évident pour tout le monde. » (Marcom et Pruvost, 2021, p. 145)

La relative simplicité des systèmes de production, leur proximité physique, la présence d'espaces d'échange et de création de culture commune, visibilisent les enjeux des procédés. On ne peut ignorer déléguer une tâche pénible en achetant un produit. Il est alors possible de considérer l'impact sociétal des choix techniques.

En revanche, la prise en compte effective de ces impacts demande une culture de la recherche du bien commun avant l'avantage individuel. Mais l'économie locale a également pour avantage de faciliter la création d'une culture commune et donc potentiellement d'une solidarité collective, par un partage spontané de valeurs et d'informations sur les procédés.

C'est ainsi que peut se définir la « rationalité paysanne » : chercher l'efficacité dans le travail, traquer le « gâchis » et le « pénible », pas uniquement d'un point de vue individuel mais dans une considération du travail collectif impliqué. Dans le champ de la construction, la rationalité paysanne dans le choix technique considère un « travail total », qui peut être sur chantier ou en amont dans les chaînes de production des matériaux et outils. Ce « travail total», c'est un ensemble d'externalités induites par les procédés de production, et leur pondération dans les choix techniques qui dépend de leur perception par les acteur.ices impliqués dans les choix.

Ce contexte est favorable à l'apparition d'un déterminisme environnemental. Sur un chantier inscrit dans une économie paysanne, les constructeur.ices sont directement au contact de la plupart des impacts de leurs choix techniques. Par exemple, la diversité des terres à disposition est limitée ; le coût des outils simples, s'ils sont fabriqués localement, peut être considéré comme proportionnel à l'intensité de travail mobilisée dans leurs procédés de production ; la pénibilité du travail est visible sur le chantier et peut être considérée par la connaissance des méthodes de travail des vendeur.euses d'outils et matériaux. Les choix techniques ne sont pas pour autant forcément démocratiques ou justes, mais au moins les conséquences doivent être assumées. C'est ainsi que l'économie* est ancrée dans le contexte environnemental et autorise l'emploi de techniques sobres si celles-ci sont recherchées.

3.3 Le déracinement des sociétés industrialisées

Nous avons relevé des indices de ce qui nous ont semblé être des préférences dans le choix des lieux d'installation ou dans l'impact sur le développement des populations pré-industrielles : les bâtiments vernaculaires ne sont pas distribués « aléatoirement » selon les variables pédologiques, mais préférentiellement sur des sols particuliers, dont la typologie varie selon les régions d'étude (Chapitre 3B, 4.3.4). Avant le déploiement des matériaux et techniques industrielles, l'économie paysanne contraignait les choix techniques de la plupart des habitant.es, jusqu'au lieu d'implantation des bâtiments.

Nous avons par ailleurs remarqué que contrairement aux bâtiments vernaculaires pré-industriels, la distribution des bâtiments contemporains n'est presque plus corrélée aux variables pédologiques et se rapproche d'une distribution aléatoire (Chapitre 3A, 4.3.4). C'est une manifestation intéressante du « déracinement » provoqué par l'avènement des systèmes industriels (Pruvost 2021b) (Chapitre 3A, 3.3.1): des sols auparavant peu propices à la production végétale agricole sont « amendés » et deviennent super-productifs (Pirard & Schruijer 2022), les routes qui traversent les montagnes effacent la friction avec la topographie, le travail manuel au contact de l'écosystème est délégué aux machines où au Sud Global* (Berlan 2021; Pruvost 2021b) et les habitant.es ne savent plus reconnaître le potentiel agricole des sols qui les entourent, car ceux-ci sont couverts de béton. La vie au sein de la technosphère* s'intensifie et l'accélération des modes de vies de la possibilité de se relier au paysage (Rosa 2012). L'industrialisation déracine lorsqu'elle fait perdre le lien économique* et sensible au paysage.

4 Au-delà du chantier : l'approche holistique du choix technique malgré le déracinement

4.1 Des convictions qui portent les chantiers au-delà de l'économie financière

Construire en terre crue peut être un outil « convivial » au sens de Illich (1973), inclus « dans les dynamiques organiques du vivant et dans le tissage social » (Anfray 2023), c'est à dire un outil à haute valeur sociétale. Mais cet ancrage convivial dépend du procédé choisi. La perception de l'« ouvrabilité sur chantier » n'est pas suffisante pour réaliser des choix éthiques. Les essais sensoriels n'aident pas directement aux choix de techniques conviviales, mais peuvent le permettre en intégrant les valeurs acquise, apportant une dimension sensible.

Faire des choix sociétalement pertinents, et les percevoir dès l'emploi d'essais de terrain, nécessite la construction d'un prisme éthique et politique. En l'absence de prisme éthique, c'est souvent la rationalité financière qui gouverne les choix, ce qui en contexte industriel est souvent loin d'une économie de moyens, d'une rationalité paysanne.

C'est ainsi que jusqu'à aujourd'hui, construire en terre crue ne s'est pas présenté comme un choix financièrement rationnel. Le schéma social de la construction en terre ne tient que parce que celles et ceux qui y participent croient suffisamment fort à ce qu'iels imaginent comme étant leur impact sociétal (Villain 2020) : travailler plus sur le chantier plutôt qu'acheter des produits préfabriqués à bas coût serait rentable pour l'écosystème sociétal qu'iels projettent dans l'ensemble des chaînes de valeur amont, et la rentabilité financière n'est pas centrale. Il semble qu'une majorité des artisan.es terre crue contemporain.es soient des personnes « engagées » (Villain 2020; CCTC 2023). Leur radicalité qui s'exprime par les choix de techniques de construction frugales n'est pas un repli sur un passé idéalisé : leur refus de la « modernité » mécanisée voire industrialisée découle d'une perception des impacts générés par leurs choix techniques. Cette perception n'est permise que par la confrontation au réel que permet la pratique du travail artisanal, et un travail de politisation permanente de chaque acte (Marcom & Pruvost 2021).

Ces constructeur.ices engagé.es cherchent à « se réapproprier la comptabilité du temps, de l'argent, des distances, des quantités » (Marcom & Pruvost 2021). Reprendre racine dans un système mondialisé est un acte de chaque instant, ou chaque geste est politisé (Pruvost 2021b). Puisque les choix techniques pertinents ne se déploient pas spontanément dans une sphère dominée par l'économie financière, l'engagement des constructeur.ices est indispensable à leur réalisation. Nos échanges avec les artisan.es nous laissent penser que dès lors qu'un produit façonné « hors chantier » est envisagé, une enquête est mobilisée, plus ou moins explicitement. Au fil des enquêtes, une expertise de l'analyse des impacts des choix techniques se tisse. Les choix suivent des principes qui permettent de guider l'action sans toujours évaluer le détail des chaînes de productions de l'ensemble des produits du marché. Par exemple, une évaluation rapide de la « localité » d'un produit permet de lui donner une première valeur. Dans cet exemple, la localité n'est pas un critère en soi, mais c'est un indicateur d'autres éléments (transport, qualité du produit, garanties de conditions de travail, etc.). On peut faire un parallèle avec les « essais de terrain » : les « principes » sont plus ou moins rationalisés, comme les calculs d'*intensité sociale* (Marcom 2011), ou plutôt sensibles comme la projection du *plaisir au travail* engagé dans la chaîne de production d'un produit. Comme les essais de terrain pour le comportement du matériau, ces évaluation permettent une prise de décision rapide sans enquêter sur l'ensemble des chaînes de production des produits du marché.

La relocalisation du travail de production, comme indicateur-guide, semble tenir une place centrale. Dans le cadre de cette « enquête holistique permanente », ce critère est particulièrement important car la réduction spatiale et temporelle des chaînes de production permet d'avoir la *possibilité* d'enquêter personnellement sur chacun des impacts engendrés. L'emploi des techniques de construction vernaculaires historiques, ou leurs évolutions contemporaines sobres en ressources, en transport et en machines, est dans ce sens non seulement un gage de performance environnementale mais d'autodétermination collective, car les procédés impliqués permettent une visibilité quasi-exhaustive sur les enjeux des chaînes de productions mobilisées. C'est en effet dans l'emploi de techniques d'échelle et de complexité réduite que peuvent se faire des choix réellement éclairés, donc démocratiques (Gordon 2020).

L'importance relative de ces « principes » sur les choix finaux et leurs modes d'évaluation est propre à chacun.e et leur efficacité s'adapte au contexte local, s'affûtant au cours du temps et des retours d'expérience. Comme pour la calibration des essais sensoriels d'ouvrabilité dans les procédés, la perception de la pertinence sociétale se calibre également dans la transmission. Les rencontres du collectif Ecobâtir témoignaient du questionnement permanent des constructeur.ices engagé.es et de leur recherche d'espaces de partage sur ces questions (Réseau écobâtir 2019). Les formations à la construction en terre crue intègrent souvent les questionnements éthiques et politiques propres à la filière dans les temps de transmission. C'est une forme de transmission « qui s'apparente aux modes de transmission des techniques constructives vernaculaires pré-industrielles » (La Facto 2023)

Choisir une technique de construction n'est donc pas qu'un enjeu « individuel » au sens de l'individu, ou des enjeux « du chantier ». C'est un enjeu sociétal, et un choix pertinents pour le collectif ne peut être réalisé sans prisme de lecture éthique intégrant le collectif. Or, le choix d'une technique de construction en terre crue pertinente d'un point de vue ouvrabilité doit être réalisé par les constructeur.ices du fait de la complexité des enjeux. Alors, leur engagement éthique et politique devient un atout, car il intègre leur monde sensible. Dans la confrontation sensible à la matière à disposition pour construire, sont alors mobilisées à la fois des conceptions techniques d'ouvrabilité mais également des enjeux sociétaux plus large, dans un système de décision « spontanée et holistique ».

4.2 Un choix facilité par l'enracinement local

Dans les contextes vernaculaires pré-industriels, le savoir-faire se transmettait localement, notamment par la pratique sur chantier (Huitorel 2018). Or, nous avons remarqué (Chapitre 2, 3) qu'à l'échelle communale, peu de variables guident la pédogenèse ce qui induit une certaine homogénéité des pédopaysages. On peut considérer que la variabilité des sols devait être appréhendable assez rapidement par l'expérience des bâtisseur.euses local.es. A partir de leurs propres retours d'expérience ou de ceux transmis par leurs formateur.ices, il aurait été relativement aisé d'« interpoler » les propriétés des sols rencontrés entre ceux qu'iels connaissaient déjà, appartenant à un nombre limité de séries pédogénétiques (Annexe I, 1.1.1). Cet enracinement dans un territoire autorise une compréhension plus spontanée des affordances de la terre pour bâtir. La terminologie du potentiel des sols pour bâtir est souvent partagée pour la construction en terre crue et l'agriculture. Par exemple en Occitanie : la « terrefort », argilo-calcaire, est à la fois « plus collante à la charrue » et « plus propice aux fissurations après séchage » (Klein 2011). La plupart des bâtisseur.euses avaient d'autres activités de subsistance en rapport avec la terre : l'ancrage local permet de guider implicitement, *tacitement* (2.3) le choix technique. La lecture du paysage comme la topographie ou l'usage agricole des sols, ou même les zones d'excavations précédentes, étaient autant d'indices qui ont pu accompagner la confrontation directe à la matière pour la sélection des terres et des techniques.

Les chantiers terre crue contemporains se font dans des contextes moins enracinés. La mobilité facilitée, associée à une relativement faible densité de la demande de chantiers terre crue, pousse à parcourir de grands territoires. On change alors de pédopaysage, de sols, donc de comportement de la terre. Le réemploi de terres d'excavations génère un aléa supplémentaire dans les propriétés des terres rencontrées: en profondeur, on peut extraire des couches aux propriétés parfois très différentes des terres de surfaces ; ou en distance, par le déplacement de terres provenant d'autres villes voir départements. Les tas de terre excavée sont hors contexte, *hors sol*, et disent peu sur leur potentiel sans confrontation directe. Enfin, le contexte industriel démultiplie les procédés possibles, ce qui peut paradoxalement rendre plus complexe le choix technique : les retours d'expérience par procédé sont plus rares, chaque chantier emploie des outils différents. En l'absence de patrimoine local identifié bâti avec une technique-type*, difficile de savoir si les sols locaux y sont favorables. C'est peut être à cause de ce contexte qu'il faut plusieurs années voir dizaines d'années de pratique pour reconnaître une bonne terre « à l'œil » (Goizauskas 2019).

Lorsque le choix technique ne se fait pas en contexte enraciné, il n'est donc pas intuitif et doit faire l'objet d'un apprentissage spécifique. La convenance des techniques à la terre à disposition devient un sujet explicite. Il faut réaliser *a minima* quelques tests d'ouvrabilité pour s'assurer de la bonne compréhension du matériau, avant de choisir les techniques à mettre en œuvre.

4.3 Un capital culturel indispensable ?

L'invisibilité des impacts des choix techniques en système industriel mondialisé nécessite un travail d'enquête permanent et un bagage éthique pour affirmer des choix sociétalement pertinents. C'est une caractéristique qui rend le choix éthique socialement sélectif : en l'état, choisir de construire en terre, plus encore choisir des techniques « radicalement éthiques », nécessite l'accès et la compréhension à des contenus du monde des experts, notamment académiques*, tout en évitant les impasses Progressistes et Scientistes qui jalonnent les travaux relatifs aux systèmes techniques. Ce besoin de capital culturel, ou de temps et d'énergie disponible pour le constituer, pour considérer la terre crue artisanale comme une opportunité conviviale, pourrait expliquer la forte proportion de reconversions vers l'artisanat terre crue de personnes ayant de haut degrés de formation et des capacités d'abstraction: ingénieur.es, architectes, etc. (Villain 2020; CCTC 2023). Ce décalage entre rationalité sociétale et financière, et l'observation de la reconversion de surdiplômé.es, se retrouve par ailleurs dans l'installation agricole paysanne agroécologique (Sébastien 2018).

A défaut de politiques publiques favorisant financièrement les techniques paysannes et les rendant « économiquement pertinentes », le développement et le maintien d'une culture intégrant l'éthique sociétale comme valeur centrale est indispensable. Les espaces d'échanges entre constructeur.ices (formations, séminaires, associations et collectifs, chantiers coopératifs etc.) sont des lieux répondant à ce besoin de consolidation d'une culture commune. Des collectifs et associations intègrent ce travail de construction d'une nouvelle culture économique collective au sein même des chantiers, en proposant des systèmes d'échanges de services non financiers ou des mécanismes de redistribution (La Facto 2023).

5 Le rôle d'une approche scientifique dans les choix techniques

On ne peut pas dire que les essais sensibles mesurent uniquement des « variable compositionnelles de la terre », puisque le résultat alimente une réflexion bien plus holistique sur le choix des techniques. Au cours de l'essai, c'est un ensemble de considérations pratiques et éthiques qui sont mobilisées, sans forcément les nommer, pour le chantier et éventuellement au-delà.

Alors, l'approche de caractérisation en laboratoire et de décision par le calcul, pour être aussi efficace, devrait imiter ce processus d'évaluation holistique, ce qui est impossible du fait de la diversité des contextes constructifs : interactions complexes entre étapes de façonnage et matière, diversité des procédés, savoir-faire et envies des constructeur.ices, etc.. Nommer, modéliser, c'est forcément réduire l'envergure de ce qui est perçu par le *sensible*. L'approche prédictive universelle du génie civil est inopérante car les techniques vernaculaires sont des entités vivantes. On peut questionner la quête de modélisation des choix techniques et la recherche d'abaques permettant des choix techniques rationnels, alors qu'*a priori* les artisan.es n'en bénéficieraient pas directement. Permettraient-ils un gain de lisibilité de la construction en terre crue pour une société qui n'écoute que les experts académiques, ou est-ce une mise en cage maladroite de savoirs vivants par la classe ingénieure ? Dans les précédents chapitres, nous avons considéré que les outils et résultats que nous avons proposés vont dans le sens de la première proposition, car ils mettent en avant la diversité et la complexité des savoir-faire. Mais d'autres outils publiés en tant qu'aide à la décision se sont révélés contre-productifs pour la filière terre (Chapitre 1, 1.3).

En parallèle du travail de modélisation, nous avons exploré les outils académiques d'aide à la décision des choix techniques. Comme pour les autrices de La Facto (2023:70) Il nous est rapidement apparu que « pour encourager l'observation, la réflexion, l'expression de nos sensibilités, ou encore le dialogue entre usagèr.es, artisan.es et concepteur.ices, il nous semble que les outils de conception eux-mêmes doivent être questionnés au prisme de la décroissance et de la convivialité (selon la définition de Ivan Ilich [...]) ». Les modélisations type Analyse de Cycle de Vie nécessitent de déléguer le choix des valeurs évaluées aux expert.es, et les méthodes de calcul sont opaques en dehors des spécialistes : cela n'aide pas l'appropriation des choix techniques, et l'opacité permet une manipulation aisée des résultats[51].Par ailleurs, leur vocation « rationnelle et universelle » rend impossible l'intégration de questions sociales et culturelles, *sensibles*. D'autres outils plus simples type « intensité sociale » (Marcom 2011) présentent la limite d'être peu holistiques et d'invisibiliser beaucoup d'enjeux, mais leur usage peut cependant avoir une portée pédagogique. Le prisme « low tech* » montre quelques perspectives intéressantes, car les techniques sont envisagées d'un point de vue sociétal relativement holistique et le choix s'effectue selon des « principes » sans recherche de quantifications (Tanguy et al. 2023). Cette approche par principe semble plus proche des modes de décision actuels des artisan.es engagé.es, car l'approche par principe permet un affûtage progressif de la décision tout en permettant des choix rapides lorsque l'enquête n'est pas possible. Dans un précédent exemple, nous avons vu que face aux ramifications mondialisées des chaînes de production le principe du « local » est peut-être la réponse la plus simple, car il permet à la fois de réduire de nombreux impacts et de remettre les enjeux « à portée de vue » pour être considérés dans les choix.

La question de l'accompagnement des choix techniques est un sujet à creuser car, dans un contexte sociétal de perte de repères, la construction écologique et plus généralement le monde des techniques alternatives bénéficierait peut-être du développement d'outils d'aide à la décision holistiques, démocratiques. S'il n'est pas financièrement rationnel de construire en terre crue, d'autant plus dans des techniques radicalement sobres, peut-être que le développement d'outils d'aide à l'auto-détermination dans les choix techniques pourrait faciliter la consolidation d'une culture commune dans le champ de la construction écologique.

51 Un exemple est l'usage de résultats d'ACV « truquées » dans la communication autour du béton bas carbone https://elioth.com/le-vrai-du-faux-beton-bas-carbone/

6 Conclusion du Chapitre 5

Le redéploiement de la construction en terre crue dans un contexte industrialisé et rationalisé fait face à une absence de rationalisation des choix techniques : choix des procédés, dimensionnements, prédictions des propriétés. En l'absence de standards, comment réaliser des choix techniques pertinents ?

La recherche académique a tenté de proposer des standards sur les propriétés des terres employées, ce qui a ce jour ne peut être considéré comme une approche pertinente (Chapitre 1). En effet, comment imaginer des essais standardisés pour évaluer le choix technique, alors que les procédés artisanaux ne sont pas standards ?

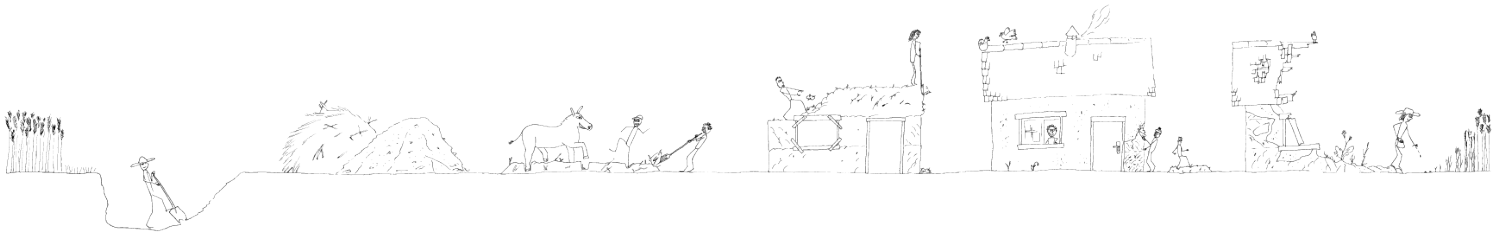
Pour choisir les techniques de construction en terre crue, les essais *sensibles* d'évaluation de la qualité de la matière permettent une projection dans les enjeux du chantier à venir. Plus subtils que de simples essais « de terrain », qui seraient des mesures médiocres de propriétés compositionnelles ou comportementales des terres, les essais des constructeur.ices évaluent des propriétés d'ouvrabilités complexes dépassant les propriétés géotechniques classiques.

Certains essais sont plus explicites que d'autres : les phénomènes mobilisés sont décrits et des guides sont fournis à l'écrit ou à l'oral pour les interpréter. D'autres sont plus *tacites* (Sennett 2009) et forment la « partie immergée » du savoir-faire artisanal. Souvent, les essais sont mobilisés au cœur même des gestes de façonnage de la matière : l'artisan.e écoute la réponse du matériau qui se matérialise dans un langage plurisensoriel, que seule un apprentissage par l'expérience vécue ou transmise permet d'interpréter. Plus que des mesures de composition des terres, ces essais « sensoriels » peuvent solliciter l'ensemble du corps et des sens, calibrés par l'expérience des chantiers précédents. Enfin, au-delà du corps comme outil, l'essai sensoriel se mue en essai sensible, *situé*, lorsque l'on considère que l'éthique et le ressenti propre des constructeur.ices est intégré dans les décisions au contact de la matière.

Les artisan.es engagées de la filière terre crue, confrontées à l'impact réel des choix des techniques de construction sur l'aisance du travail de la terre, sont particulièrement bien placé.es pour proposer des orientations pertinente dans les choix techniques des projets. D'une part, c'est la connaissance fine des procédés et de leurs enjeux qui permet la prévision des qualités d'ouvrabilité du matériau dans les techniques choisies. D'autre part, l'engagement éthique de nombre d'entre eux, et leur attention de tous les instants aux impacts sociétaux des outils et techniques mobilisées, semblent indispensable pour une prise en compte réelle d'enjeux collectifs, allant au-delà de l'espace temps du « chantier ». Cet engagement permet une mise en œuvre pertinente, conviviale, en la *situant*: un projet situé considère l'ensemble du contexte sociétal du projet (La Facto 2023). Les espaces d'échanges collectifs entre constructeur.ices et habitant.es permettent la consolidation d'une culture commune d'éthique sociétale.

Pourtant, la mondialisation des chaînes de production rend difficile la perception des enjeux des choix de matériaux de construction et outils industriels : ils sont « supraliminaires », insaisissables, et cette invisibilité empêche une responsabilité dans les choix techniques. Afin de permettre à toutes et tous de faire des choix techniques pertinents sans devoir passer par des années d'enquête sur le fonctionnement des sociétés industrielles, la filière terre crue semble en quête de principes, d'outils méthodologiques, pour accompagner les non initiés à la compréhension des enjeux éthiques des choix techniques. Malheureusement, les méthodes académiques actuellement privilégiées sont des modélisations complexes, comme l'Analyse de Cycle de Vie, et semblent ainsi hors de portée du débat démocratique. Une approche par « principes » plus que par la tentative de modélisation universelle permettrait peut-être de faciliter la prise de décision. Par exemple, le principe de la « relocalisation »

est un indicateur intéressant, car il permet à la fois de réduire de nombreux impacts environnementaux et de visibiliser les enjeux en les mettant à portée d'enquête. En tout cas, la construction en terre crue peu mécanisée, sur site et non adjuvantée de produits industriels a dans cette optique un potentiel intéressant : en plus d'être généralement sobre en travail et en ressources, la réduction de l'échelle des chaînes de production qu'elle engage permet de choisir une technique *en conscience* des impacts associés.



Conclusion générale

1 L’échec des approches « de caractérisation »

Dès la fin du XXe siècle, le regain d’intérêt pour la construction en terre crue par des artisan.es et architectes « consacré.es » (Villain 2020) s’est accompagné d’un intérêt croissant de la recherche académique* pour la caractérisation de ces techniques. C’est une approche dite « de caractérisation » du matériau terre qui y est suivie, « naturaliste et abstraite » (Goizauskas 2019), à l’instar de celle engagée pour les matériaux de construction industriels* comme les bétons de ciment au cours du XXe siècle. Sont alors proposés des guides de choix des terres à bâtir selon leur composition physique et/ou chimique pour optimiser les « performances » des matériaux et techniques.

Cette approche est aujourd’hui considérée comme inappropriée. D’une part, les artisan.es* la refusent car elle ne permet pas de composer des choix techniques* adaptés aux enjeux des projets de construction. D’autre part, l’analyse du patrimoine bâti historique montre un emploi de terres de natures très diverses pour la plupart des techniques-type de construction en terre crue, bien au-delà des caractéristiques recommandée (Chapitre 1, Chapitre 3B). Pourtant, l’approche de caractérisation préalable du matériau demeure une étape souvent sollicitée par les organismes de contrôle des chantiers de construction en terre. En l’absence de standards auxquels se référer pour satisfaire l’approche d’optimisation et de prédiction nécessaire aux fonctionnements du BTP conventionnel*, toute recommandation proposée, même non justifiée ou indiquée comme expérimentale, finit par *faire référence* et est finalement employée pour « certifier » les performances techniques des matériaux (Chapitre 1).

Dans notre approche du sujet de la « convenance des terres pour construire », la première crainte est que les résultats et outils développés soient employés au-delà de leur champ de validité, l’expérimentation académique (Chapitre 4, 4.3). Malgré quelques mesures visant explicitement à freiner leur réemploi hors cadre expérimental, nous sollicitons l’attention des lecteur.ices de ce travail pour ne pas employer ces résultats en dehors de leur champ de validité, par exemple pour dimensionner des procédés sur des chantiers réels.

2 La résistance mécanique, facteur anecdotique du choix technique ?

L’échec des prédictions des choix techniques via des propriétés de composition des terres peut s’expliquer par un échec de compréhension des enjeux des chantiers de construction en terre crue par le champ scientifique académique. Là où la culture scientifique « vise surtout à savoir ce qu’est la matière pour mieux la contrôler », les artisan.es « se concentrent avant tout sur ce que la matière peut faire » (Goizauskas, 2019, p. 97). Ainsi, les artisan.es sont non seulement guidé.es d’abord par *l’aisance de mise en œuvre* avant les performances d’usage des matériaux, mais surtout intègrent les

caractéristiques de *contextes constructifs* bien plus larges et holistiques qu'une simple comparaison des propriétés physiques des matériaux de construction disponibles.

Un premier constat est que si les propriétés de composition de la terre guident les choix techniques, c'est avant tout par leur impact sur le comportement des mélanges de terre crue au cours de la mise en œuvre, c'est-à-dire sur l'ouvrabilité* des matériaux (Chapitre 2). La granulométrie des terres employées dans le patrimoine étudié en France hexagonale* est plus cohérente avec les préférences à l'ouvrage déclarées par les artisan.es contemporain.es, qu'avec les compositions supposées les plus résistantes mécaniques (Chapitre 3B). La bauge est plus fréquente sur les sols limoneux car leur faible cohésion facilite le pétrissage du mélange et le modelage des éléments. Les adobes acceptent une diversité conséquente de sols, mais sont les seules techniques-types présentes pour les sols les plus argileux : même si beaucoup d'eau est nécessaire pour rendre ces terres modelables, le séchage de petits éléments moulés autorise un retrait dimensionnel plutôt qu'une fissuration au séchage. Le pisé est privilégié pour les sols les plus grossiers car la compaction est aisée et permet de profiter d'une faible fraction argileuse. Les torchis, plus fréquemment rencontrés sur sols limoneux-argileux, bénéficient de la facilité de modelage sans retrait des fractions limoneuses et de la cohésion des argiles. Ces quatre interprétations des préférences techniques selon la typologie des terres sont basées sur *l'aisance de mise en œuvre*. Le choix du pisé pour les terres grossières est parfois interprété comme une optimisation de la résistance mécanique par la présence d'un empilement granulaire adéquat. Mais pour la bauge, il est certain que les sols limoneux ne sont pas ceux permettant la meilleure résistance mécanique. La diversité des sols employés pour les adobes, parfois également très limoneux, suppose aussi un choix déconnecté d'une optimisation mécanique. Alors, si les résistances mécaniques des matériaux terre crue sont d'importances dans les choix techniques, ce ne peut être que de manière secondaire. On peut suggérer que la résistance mécanique est alors une variable à seuil plus qu'une variable à maximiser : les constructeur.ices s'assurent que la résistance sera suffisante, mais ensuite, ce sont d'autres paramètres qui gouvernent le choix technique, notamment l'aisance de travail* de la matière. Le seuil de « résistance suffisante » est relativement bas pour la plupart des architectures vernaculaires* pré-industrielles* rencontrées (<1MPa), donc souvent aisé à atteindre, ce qui n'en fait pas un facteur de choix différentiel entre les techniques-types de construction. Pour les chantiers contemporains, nous pensons que la plupart des contextes où construire s'avère pertinent relèvent d'architectures de dimensions raisonnables et permettent ainsi des choix techniques relativement libres du point de vue des résistances mécanique.

3 Des choix techniques holistiques

Certains types de sols favorisent le choix d'une technique plutôt qu'une autre du fait de l'aisance de mise en œuvre ; mais la plupart des techniques-types sont également rencontrées sur des sols aux propriétés différentes de leur « sol-type » de prédilection, bien que moins fréquemment (Chapitre 3B). Il y a une certaine flexibilité du choix technique par rapport aux sols. Le choix des techniques de construction ne peut alors être guidé seulement par l'impact des propriétés de composition des terres, d'autres propriétés du *contexte constructif* orientent les décisions.

Les choix des techniques de construction pré-industrielles étaient gouvernés tant par des facteurs « environnementaux » que « sociaux » (Chapitre 3A). L'accès aux ressources*, dont les matériaux de construction, constituait un facteur économique contraignant. L'existence d'une corrélation entre sols et choix techniques est un marqueur de ce *déterminisme environnemental*. Mais la diversité des procédés de transformation, des contraintes architecturales spécifiques, la désirabilité des matériaux ou encore la puissance des systèmes de hiérarchie sociales entraînent des choix techniques qui se décorrèlent du simple choix de la ressource la plus proche. C'est probablement cette diversité

d'impacts qui crée des biais et des aléas dans les résultats des corrélations sol-technique observés dans nos croisements de données (Chapitre 3B). Ces biais et aléas sont conséquents, et forcent à réaliser des traitements statistiques sur de grandes quantités de données pour observer les traces du déterminisme environnemental.

En contexte industrialisé, le déterminisme environnemental des techniques de construction est d'autant plus faible que les systèmes de production sont mondialisés, déracinés des conditions environnementales locales (Chapitre 5, 3.3). Le matériau le plus financièrement économique n'a plus rien a voir avec celui qui nécessite le moins de transformation. Mais les artisan.es qui recourent au matériau terre crue forcent le déterminisme par leur convictions éthiques et politiques. Par un effort d'enquête permanent sur les impacts des choix techniques, et par le recours à des chaînes de production simples et locales, iels cherchent à éviter les écueils environnementaux et sociaux des procédés industriels.

Lors de la sélection des techniques de construction en terre crue, les artisan.es mobilisent des « essais de terrain », aussi appelés « essais sensibles » sur des échantillons de la terre à disposition et se projettent dans les procédés de construction en terre crue envisageables pour choisir les plus adéquats (Chapitre 5, 2). L'approche sensible permet d'intégrer l'ensemble de leurs considérations éthiques au choix technique, qui devient plus holistique qu'une optimisation de l'effort de travail sur chantier.

4 Questionner l'approche académique des procédés techniques

L'échec de l'approche prédictive académique questionne. Elle montre l'incapacité d'une grande partie du champ académique (génie civil notamment) à se saisir des enjeux gouvernant le choix des techniques de construction en terre crue, *in situ* sur les chantiers artisanaux, d'un point de vue éthique, mais également d'un point de vue technique. L'analyse des précédentes études croisant des données géographiques et patrimoniales pour tenter de démontrer l'existence de déterminismes environnementaux sur les choix techniques (Chapitre 3A, 2), montre que l'entrain autour du renouveau de la terre crue pousse a tirer des conclusions parfois trop rapides pour des résultats exploratoires. C'est également le cas pour les recommandations de choix techniques selon la composition des terres, souvent trop radicales relativement à la qualité des résultats produits. Nous pouvons considérer que ces constats révèlent les position *situées* de certain.es chercheur.euses du champ de la terre crue (Avant-Propos, 3) (Pelé-Peltier 2023).

La focalisation sur les *propriétés d'usage** des matériaux est systématique, alors que les résultats de nos analyses, convergeant avec les suggestions des artisan.es contemporaines, montrent que les choix techniques relatifs aux propriétés des terres relèvent essentiellement d'enjeux d'aisance de mise en œuvre. La réduction des choix techniques à des déterminismes environnementaux est parfois rencontrée, alors qu'il est probable que les facteurs « sociaux » soient au moins aussi importants. La recherche permanente de modélisations mécanistes est un réflexe qui conduit à des impasses : modéliser implique de simplifier, simplifier efface la diversité et le particulier. Or, le renouveau de la terre crue s'inscrit dans une quête d'enracinement local, de valorisation de la diversité des mondes vivants.

Dans ce contexte, pour nos calculs numériques, nous avons cherché à nous prémunir des biais présents dans la littérature consultée et dans la philosophie de notre discipline 1) par la recherche de la compréhension des éco-socio-systèmes caractérisant les contextes constructifs étudiés en mobilisant d'autres disciplines académiques et 2) par un travail permanent de recherche de biais dans

nos méthodes de croisement de données. En revanche, il est probable que nos propres perspectives concernant la recherche et la construction en terre crue (voir Avant-propos) colore nos analyses philosophiques et politiques dans certaines discussions (p. ex. Contexte, conclusions du Chapitre 4, Chapitre 5). Il y a un double enjeu dans les savoirs situés : il faut investiguer l'influence des situations sur nos résultats ou ceux des autres pour 1) en réduire l'influence ou 2) en informer les lecteur.ices.

Nous avons soulevé quelques perspectives pour la recherche relative à la construction en terre crue. Les pratiques actuelles d'analyse de la terre et des procédés sont à questionner. Notamment, l'influence de l'homogénéité du matériau sur les procédés semble un angle mort de la compréhension de la physique des mélanges de terre crue. Plus généralement, une prise de recul sur les cycles de vie des matériaux terre crue est nécessaire, pour intégrer les enjeux holistiques des choix techniques : *a minima* sortir de l'optimisation de la mécanique finale et intégrer l'efficacité pratique, l'ergonomie, de la transformation de la matière.

D'un côté, la proposition d'abaques et de guides techniques simples ne permettent pas d'appréhender la diversité des mises en œuvre et des contextes constructifs. L'échec sociétal du développement industriel appelle à se méfier des approches universalisante des techniques, incapable de préserver la diversité du vivant (diversité « naturelle » comme « culturelle »). De l'autre, la modélisation mécaniste holistique semble être une impasse du fait de la complexité des modèles qu'il serait nécessaire de proposer. A l'image des Analyses de Cycle de Vie, ils seraient anti-démocratiques car leur compréhension et leur gestion serait réservée aux expert.es scientifiques.

Alors, peut-être s'agit-il de ne pas chercher le contrôle des choix techniques, leur planification par rationalisation* scientifique. Pour éviter une approche technocratique, adopter une démarche de confiance en les savoirs-faire vernaculaires semble la seule piste permettant de ne pas nuire à la diversité de ces techniques vivantes. Pour des choix techniques équilibrés, il s'agit finalement d'« accepter de déléguer la formulation et l'optimisation du matériau à l'artisan » (Goizauskas 2019:92). Face à la complexité des enjeux, difficilement rationalisable, c'est peut-être la spontanéité guidée par « l'épaisseur de l'expérience » (Goizauskas 2019) et l'ancrage local qui permet de faire les meilleurs choix de techniques de construction.

L'approche « caractérisation » nous a malgré tout permis de réaliser des estimations de disponibilité de la ressource en terre pour construire, et surtout de la représenter spatialement. La ressource en terre est abondante, d'autant plus en contexte d'« extractivisme* terrassier ». Par ailleurs, nos résultats montrent que la plupart des typologies de terres rencontrées dans les régions étudiées ont été employées pour au moins une technique-type* de construction en terre crue. Ces constats ouvrent suffisamment les possibles pour envisager de clôturer la question de la ressource, du moins pour le territoire hexagonal et dans le champ scientifique. L'approche caractérisation et les calculs de quantification qu'elle permet nous donne des arguments pour convaincre dans un dialogue technicien, chiffré, quantitatif. Nous avons désormais les éléments quantitatifs permettant d'affirmer que la disponibilité de la terre n'est pas limitante pour construire, et que la question de la ressource pour construire en terre est négligeable face aux désastres extractivistes du BTP conventionnel.

Dans le désastre social et environnemental du XXIe siècle, l'approche scientifique mérite d'être questionnée. Elle alimente depuis plusieurs siècles l'idéologie Progressiste à l'origine de l'industrialisation globale, du capitalisme et de ses nuisances (Berlan 2021). Pourtant, elle semble indispensable à la gestion des désastres industriels (p. ex. identification et dépollution des composés physiques et chimiques persistants). Mais dans le cadre de la subsistance de base (alimentation, logement, soin), il nous semble que le champ académique ne puisse rien apporter de plus que ce que produisent déjà les approches empiriques. Dans la production de ce travail de thèse, il est clair que l'essentiel de ce que nous avons écrit était déjà inscrit et transmis dans les savoirs empiriques des

artisan.es. Alors, il ne s'agit pas d'éliminer toute production scientifique académique, mais de questionner la domination du champ scientifique et particulièrement académique* sur les autres formes de savoirs.

5 Quels choix techniques pour une « filière terre » équilibrée ?

5.1 Techniques réparatrices ou greenwashing ?

L'analyse des choix techniques vernaculaires pré-industriels nécessite de connaître les contextes constructifs d'alors. L'enracinement local qu'ils représentent peut être une inspiration pour les choix contemporains à condition de bien comprendre les différences avec le contexte du XXIe siècle. L'état critique des écosystèmes et l'ensemble des nouveaux problèmes causés par le développement industriel global apporte de nouvelles questions. La question des performances thermiques est un exemple type : d'une propriété souhaitable mais non centrale, ou implicite, dans l'habiter vernaculaire pré-industriel, elle devient primordiale et explicite lorsque se côtoient des problèmes de surconsommation énergétique, de canicules urbaines qui s'empirent, d'une abondance de bâtiments « passoires thermiques » aux murs étroits composés de briques creuses ou de béton de ciment. D'un autre côté, l'abondance énergétique apparente amène des « opportunités » : abondance de terres d'excavation à réemployer, abondance de coproduits agricoles comme la paille de blé. La terre allégée s'ancre dans ce contexte : elle emploie des quantités de fibres peu envisageables avant l'industrialisation agricole; ses propriétés d'isolations et de flexibilité de forme en font une technique idéale pour la rénovation de l'existant ; elle « stocke du carbone » plus efficacement encore que le bois (Lecomte & Hellouin de Menibus 2020). Dans un tel contexte elle peut ainsi qualifiée de « technique régénérative* ».

Mais la complexité des systèmes industriels rend insaisissable l'ensemble des enjeux et laisse place à des phénomènes d'effet rebond*. Comment tirer profit des gaspillages tant qu'ils existent, sans participer à leur perpétuation en les légitimant ? Un questionnement indispensable dans le réemploi de terres excavées issues du BTP conventionnel pour éviter qu'il bénéficie d'un greenwashing* « terre crue », un « éco-brunissement* » (Contexte, 1.3 et Chapitre 4, 4.3.2).

5.2 Ancrage et adaptation locale

Puisque ce fut le cas jusqu'au 20ème siècle, nous ne voyons pas de raisons pour lesquelles il ne serait pas possible de construire le gros œuvre des murs d'un bâtiment avec un matériau ultra-local, sur le territoire hexagonal comme ailleurs. Ainsi, la question du choix des techniques de construction n'est alors pas vraiment une question de *pouvoir* construire sans matériaux industriels, mais une question de pertinence de choix relatifs entre les différents matériaux « paysans* » locaux.

Mais le contexte industriel déracine (Rosa 2012; Pruvost 2021b) et invisibilise les choix sociétalement* efficaces (Mengard 2014; Sabbah et al. 2024)(Chapitre 5, 3.3). La relocalisation des chaînes de production et la réduction de leur envergure répond à la fois au besoin de connaître ses impacts et à les réduire. Il s'agit d'adapter les techniques choisies aux matériaux locaux, ce qui implique souvent d'adapter l'architecture du bâtiment à leurs capacités.

On ne peut donc choisir une technique de construction en terre crue sur un projet comme on choisirait une formulation de béton sur catalogue, livré sur site. Une approche des chantiers terre où une technique est choisie sans considération pour le contexte social et environnemental du chantier peut difficilement déboucher sur des pratiques équilibrées. La « convenance des terres », c'est à dire le

choix d'une terre adéquate pour une technique prédéfinie, doit laisser la place à une approche type « convenance des techniques » où c'est la technique de construction qui s'adapte aux conditions spécifiques, dont la terre à disposition.

Plus généralement, une approche de « choix technique » équilibrée doit s'intégrer dans l'ensemble des phénomènes sociaux et environnementaux que les procédés engagés impliquent. Notamment, en l'absence de besoins de nouveaux logements (Contexte, 1.1), ne pas construire du neuf semble souvent être le meilleur choix technique.

Choisir des techniques sociétalement pertinentes nécessite de sortir d'une réflexion « tout-économie financière » et des schémas de décision des chantiers industriels. L'engouement pour les techniques paysannes* pourrait bouleverser ces modèles dimensionnés par et pour les matériaux industriels et leurs producteurs. Mais c'est un ensemble de paradigmes qu'il s'agit de déconstruire pour ré-enraciner les pratiques de construction et d'habitation. Par exemple, les procédés de construction en terre crue sont des activités saisonnières. Par ailleurs, puisqu'elles sont non délocalisables, certaines techniques-type comme la bauge nécessitent de l'espace sur les chantiers. Les procédés de construction en terre crue peuvent alors être considérés comme extensifs*, à la fois dans le temps et dans l'espace. Leur emploi engage à rejoindre un fonctionnement saisonnier et à s'éloigner des schémas d'optimisation du capital financier. Permettre aux procédés de terre crue de se déployer dans un cadre extensif, c'est s'assurer qu'ils puissent être réalisés dans des conditions optimales. C'est peut-être cette voie qui doit être recherchée s'il s'agit de rendre «économiquement compétitifs » les procédés artisanaux de construction en terre : laisser l'essentiel du travail se faire par la spontanéité de la saisonnalité. En tout cas, cette voie semble pouvoir favoriser une performance sociétale convenable, tandis que d'autres voies de déploiement de la terre crue (mécanisation, voir industrialisation), composant avec les cadences existantes de la construction conventionnelle, peuvent perdre en chemin tout ou partie de leur pertinence sociétale.

Par ailleurs, le retour à des activités saisonnières transforme en retour les personnes qui s'y confrontent. Le rythme saisonnier « facilite la déconstruction de certains imaginaires qui guident nos représentations* de l'individu moderne : la quête de croissance permanente comme expression d'une amélioration sociale voire spirituelle, et le sentiment de maîtrise du réel par l'action » (Girault 2020). La terre crue renverse aussi la perception du durable : d'un imaginaire de la longévité par la résistance mécanique, la durabilité devient une capacité à *choisir* la perpétuation avec une possibilité d'entretien facilitée et une réversibilité infinie du matériau. Un changement de regard sur le « fragile », qui déplace notre perception du monde (Aras-Gaudry et al. 2024). Le chantier terre, c'est « un outil qui permet de se poser des questions, tel que l'appropriation du cycle de vie, de l'économie du projet, de donner une ampleur beaucoup plus coopérative, beaucoup plus systémique » aux choix techniques ("Flécheux" 2020 dans (Dycha 2021)). Le matériau terre, pris dans une dynamique d'enquête holistique, « pousse à avoir une vision globale » que l'on ne retrouve pas « avec d'autres matériaux industriels ». Construire en terre crue permet de se *réapproprier* l'acte de bâtir, et plus généralement celui de *faire*. Car la construction en terre crue demande de s'impliquer, et c'est en faisant que l'on comprend ce que signifie le *faire faire* à d'autres (Berlan 2021). La construction en terre crue, prise dans un cadre encourageant la réflexion autour des enjeux des choix techniques, n'est alors plus seulement un procédé de production d'éléments d'ouvrages. C'est un « levier pour l'émergence d'une société conviviale » (Anfray 2023). Comme d'autres matériaux paysans, l'essentiel de ce la terre apporte à la société ne se situe pas au niveau de ses propriétés physiques d'usage mais dans le modèle sociétal qu'elle implique (La Facto 2023). Alors, peut-on vraiment risquer de perdre cet outil dans une accélération mégalomane, dans la « massification », l'« industrialisation », l'appropriation de la construction en terre crue par des multinationales à buts capitalistes ?

Le pire avenir envisageable pour la « filière terre crue » est probablement de devenir un nouveau produit au catalogue des matériaux industriel. Contre cette perspective, les approches artisanales engagées permettent non seulement d'envisager des procédés exemplaires en termes d'impacts sociétaux, mais également d'infuser les pratiques de subsistance au-delà du construire, voir au-delà de l'habiter. La réappropriation de l'acte de bâtir appelle celle d'autres besoins de subsistance comme le soin ou l'alimentation. Elle nous transforme, elle m'a transformé. Chercheur.euse l'hiver, constructeur.ice terre crue la saison venue. Pourquoi pas ?

> « Derrière la critique du travail, on confond souvent le salariat (le travail payé, discipliné, morcelé) et toute forme d'activité éprouvante liée à la subsistance quotidienne. Mais ce n'est pas tant l'effort en tant que tel, même quand il est intense, qui est pénible et assommant : c'est le fait qu'il soit imposé par autrui et que son caractère spécialisé fasse obstacle à l'expression de la diversité de nos facultés. Liberté donc, pour pasticher une célèbre formule du jeune Marx, de faire du potager le matin, de rénover un bâtiment l'après-midi et de philosopher le soir. » (Berlan 2021:12)

Lexique

Un astérisque est ajouté au mot chaque fois qu'il est rencontré pour la première fois dans un chapitre. Les termes et expressions dont la définition est originale pour ce manuscrit de thèse sont indiqués par le qualificatif [proposition], ce qui n'exclut pas qu'elles aient été précédemment employées en dehors de nos travaux bibliographiques.

Académique : qui relève de la recherche universitaire, du savoir produit par des professionnels de la production de connaissances. Les recommandations académiques sont celles qui sont disponibles sous forme écrite dans des publications dites « scientifiques » : revues à comités de lecture et ouvrages d'état de l'art.

Artisan.e [proposition]: travailleur.euse, souvent transformant directement la matière, disposant d'une certaine liberté dans son travail. Par exemple, l'artisan.e dispose généralement de ses moyens de production, souvent des outils simples, artisanaux, contrairement à l'ouvrièr.e prolétaire* qui travaille avec les outils de l'usine. L'artisan.e dont le métier n'est pas « simplement un moyen en vue d'une fin », est attaché à « l'excellence du travail en soi » (Sennett 2009:32). C'est la conjonction de l'ouvrier.e, qui travaille dans un but de production, d'échange ou de vente, et l'artiste, dans un but esthétique ou politique. Par conséquent, iel produit des objets alliant utilité, économie et créativité. Pour sa production, l'artisan.e peut prendre les commandes mais n'est pas commandé.e. La paysan.ne peut être considéré.e comme un.e « artisan.e agricole ».

Un procédé est artisanal lorsqu'il est réalisé par des artisan.es qui réalisent elleux-mêmes la majeure partie des techniques et gestes nécessaires pour arriver au produit fini. Il peut ainsi se définir en opposition à un procédé industriel par la non division du travail, notamment l'absence de séparation entre le travail manuel et intellectuel, l'application et la production de savoirs, l'artistique et l'utile (Sennett 2009:32).

Autonomie : capacité des individus et des groupes humains à définir et faire évoluer eux-mêmes les modes de production/consommation, d'organisation, de solidarité et de vivre ensemble qu'ils choisissent d'adopter (Ansart-Dourlen 2005).

Biosourcé/géosourcé : matériaux issus de matières respectivement vivantes/minérales. C'est un terme flou sensé identifier des matériaux à faible impact environnemental. Mais il ne porte pas en lui-même une limite d'intensité de transformation ou de qualité sociétale*, ce qui fait que des matières ultratransformées dans des usines délocalisées, parfois même nocives pour le vivant, peuvent être ainsi qualifiées. On préférera l'adjectif *paysan** pour les biosourcés/géosourcés d'échelle de production réduite ; et biosourcé *industriel** ou *biosourcé ultratransformé** pour les matériaux de production de masse, souvent à impacts sociétaux néfastes.

Biosourcé industriel, ou ultratransformé (matériau) [proposition]: matériaux dont la composition principale en masse est constituée de biomasse, mais dont les processus de transformation impliquent des chaînes de production industrielles. Par exemple : laines de bois-PET, poudres d'alginates, bois lamellé-collé, etc.

Capital : stock de ressources*. Ces ressources peuvent être des outils, des savoir-faire, des connaissances, de la monnaie. On tachera de préciser de quel capital il s'agit à l'usage du terme.

Chaîne de production/chaîne de valeur [proposition]: ensemble des procédés impliqués dans le cycle de vie d'un produit ou d'une technique en général.

Chaîne de valeur sociétale [proposition]: ensemble des liens d'interaction entres humain.es et avec l'environnement significativement impliqués par un choix technique*.

Conventionnel (matériau, procédé) : matériau issu de procédés, ou procédés de transformation industriels* et utilisés majoritairement dans le secteur de la construction des pays industrialisés (« BTP conventionnel »). Le terme conventionnel rend visible l'hégémonie des matériaux industriels*. Exemples : bétons de ciment (armés, parpaings), bitumes, briques cuites alvéolées, plastiques, laines minérales. Parfois, « traditionnel* » est employé pour désigner des techniques industrielles très répandues, car leur emploi s'ancre désormais dans des schémas culturels presque séculaires et pourrait être considéré comme une certaine « tradition ». Mais la tradition implique une « transmission de génération en génération, le plus souvent de manière orale » (Communauté Wikipédia 2024d), alors que les techniques industrielles sont transmises via des systèmes administrés de reproduction des compétences d'ingénierie. Nous préférons utiliser le terme conventionnel* pour ces matériaux afin de les différencier des techniques historiques pré-industrielles.

Cueillette (matériau de) : matériau prélevé sans travail de préparation préalable dans l'environnement alentour : par exemple, pierre « volante » ou « de champ », végétaux sauvages, terre crue, sables de ruisseau.

Économie [proposition]: production, sauvegarde et échange de biens de valeur. Nous l'utilisons la plupart du temps dans un sens d'économie de moyens et non de monnaie, dans le sens de l'*economa*, l'économie vernaculaire* (Anfray 2023).

Économique [proposition]: qui se rapporte à une logique de moindre effort individuel ou collectif. Il peut par exemple se rapporter à des temps ou pénibilités de travail, à la consommation de ressources* diverses. L'économie de travail peut impacter l'économie financière, mais n'est pas équivalente. Si ce « moindre effort » est exclusivement monétaire, on l'appellera financier*.

Éco-brunissement [proposition]: utilisation, par exemple par une entreprise, des procédés de construction en terre comme outil de communication pour dissimuler des impacts sociaux ou environnementaux d'autres activités (Terres Chercheuses 2024). Analogie avec l'éco-blanchiment, traduction francophone de l'expression anglophone *greenwashing**. Il peut être relativement explicite, en permettant de dissimuler l'emploi des matériaux conventionnels dans un bâtiment (enduits sur béton, terre adjuvantée au ciment, ou encore éléments en terre anecdotiques dans le bâti qui captent l'attention) ; ou plus implicite et difficile à évaluer, par exemple dans l'amélioration de l'image d'une entreprise qui l'utilise massivement dans ses communications malgré un emploi anecdotique de la terre. L'éco-brunissement peut mener à une forme d'effet rebond*.

Effet rebond : « Le paradoxe de Jevons, ou "effet rebond" est une observation de l'économiste éponyme, William Stanley Jevons. Dans son livre *Sur la question du charbon* de 1865, il expose l'idée que le développement de nouvelles technologies – dans le but de réduire la consommation de charbon – entraîne paradoxalement une augmentation de la consommation de cette ressource. Si l'on reprend l'exemple de la voiture : les moteurs plus économes en essence permettent un gain d'argent, ce qui permet à l'automobiliste de voyager plus loin ou plus fréquemment. Mais les effets peuvent être aussi indirects. Les économies réalisées peuvent servir au ménage à acheter des biens et des services polluants en supplément de leur mode de vie habituel. »

Empirique (savoirs) : aussi dits pragmatiques, savoirs développés à partir de l'observation, de l'expérience sensible directe, sans théorie explicite préalable. Les savoirs empiriques s'optimisent par « essai-erreur ». S'oppose à scientifique, approche rationalisée de la production de savoir.

Énergie externe : énergie non-métabolique. Ex : énergie thermique ou électrique, issue de la combustion de matières organiques (« biomasse », renouvelable* ou non), du rayonnement solaire, de la fission nucléaire…

Énergie métabolique : énergie dépensée par un métabolisme animal (dont humain.es) au cours d'un travail.

Ergonomique : outil ou technique adaptée aux utilisateur.ices. Dans sa définition classique, l'ergonomie semble se limiter à l'adéquation de la forme et de la dynamique des corps humains ou animaux aux outils et machines, ou aux gestes répétés. On peut questionner cette limite en envisageant une « ergonomie holistique », considérant l'adaptation des techniques à la société* dans son ensemble.

Extensif (technique) [proposition]: procédé qui nécessite de l'espace ou du temps, mais peu de travail*. S'oppose à intensif*. Note : *extensif* désigne également une contrainte sur un matériau, opposée à *compressif* (Chapitre 2, 5.1.2).

Extractivisme : c'est « l'extraction, directement dans le milieu naturel et sans retour vers lui, de ressources* naturelles qui ne se renouvellent pas ou peu, lentement, difficilement ou coûteusement » (Communauté Wikipédia 2022). On appelle filières extractivistes les filières liées à l'extraction massive de ressources non renouvelables* (sable, métaux, etc.). On peut également l'étendre à l'extraction généralisée de la valeur des écosystèmes : extractivisme forestier ; voire à l'exploitation du travail humain.

Financier : qui se rapporte à la monnaie. Précise le terme économique* qui peut se rapporter à l'économie de n'importe quelle ressource : l'économie financière est la recherche du gain ou de la moindre perte de monnaie. Pour ce travail, nous gardons à l'esprit que le coût financier d'un matériau/objet/service n'est pas intrinsèque à celui-ci. Un coût, c'est toujours la rémunération de *quelqu'un* : participant ou non à l'effort de production, et pouvant être rémunéré insuffisamment, à une valeur juste ou en excès. C'est en cela que le coût financier d'un objet diverge du coût de travail réel, et c'est pourquoi la finance nous intéresse peu dans l'étude des procédés techniques.

Fraction fine : ensemble des éléments solides d'une terre inférieurs à 2mm (=P2000µm). Aussi appelée *texture* en sciences pédologiques. Souvent divisée en 3 fractions (F2µm, F50µm, F2000µm) et représentée sur un diagramme ternaire des textures, ou « triangle des textures ». S'oppose à la fraction grossière*.

Fraction grossière : ensemble des éléments solides d'une terre supérieurs à 2mm (=F2000µm_D). Aussi appelée « éléments grossiers » (EG). S'oppose à la fraction fine*.

Frais (mélange, matériau) : état hydrique d'un matériau avant l'étape de séchage ; dont la teneur en eau est celle du façonnage.

France hexagonale : territoire français sur le continent Européen. Ce terme est amené à remplacer progressivement les termes « métropole » et « France métropolitaine » jugés coloniaux pour les territoires hors du continent sous contrôle français (Communauté Wikipédia 2024b). Les analyses bibliographiques et les croisements de données réalisés dans le cadre de cette thèse se limitent au territoire hexagonal. Des travaux sont en cours au sein du Projet National Terre Crue pour exploiter les méthodes développées pour l'analyse des potentiels de (re)déploiement de la terre crue dans les territoires ultra-marins.

Greenwashing : en français éco-blanchiment, le greenwashing est la dissimulation volontaire d'impacts environnementaux en réalisant des actions d'impact relativement dérisoire. Par extension

s'étend aux impacts sociaux (social-washing). Le greenwashing « s'apparente à une guerre menée contre les peuples et leur capacité à se saisir des enjeux et à décider des façons d'y répondre » (Berlan et al. 2023:33). Il « canalise la critique dans des impasses et fait obstacles aux transformations sociales, économiques, culturelles et politiques qu'il faudrait (ou aurait fallu) engager » pour transformer le système social (Berlan et al. 2023:31).

Historique : Concerne les bâtiments construits approximativement avant 1950. Le bâti historique inclut le patrimoine vernaculaire* et non vernaculaire (par exemple institutionnel).

Industriel (technique, matériau): qui se rapporte à un procédé technique issu de la rationalisation* technoscientifique sur les coûts financiers ou sur d'autres variables objectif définies par des experts. Également appelé *conventionnel** lorsqu'il s'agit de techniques aujourd'hui massivement utilisées.

Le procédé industriel a une complexité et échelle difficilement gérable par un nombre restreint d'individus autonomes* (capitaux économiques, matériels et culturels nécessaires). Une technique industrielle peut aussi bien être un procédé matériel (ex : la production de ciment ou de verre centralisée) que culturel (ex2: le système d'éducation). Les techniques industrielles supposent une centralisation des sous-procédés techniques (ex : des étapes de la chaîne de production* dans une usine, ex2 :des étapes de décision dans des instances centralisées).

Les impacts sociétaux d'une technique industrielle ne se limitent jamais aux variables objectif, même lorsque celles-ci sont définies sur des objectifs d'améliorations sociétales*. *In fine*, ces impacts non considérés dans les objectifs peuvent se reporter de manière négative sur d'autres variables sociétales. Puisque ces procédés sont complexes et de grande échelle, ces impacts indirects sont plus ou moins aisément visibles selon leur distance dans la chaîne de valeur sociétale* impliquée, et globalement les procédés industriels invisibilisent leurs impacts dans une « amnésie technique » (Crawford 2022, dans Sabbah et al. 2024). Les enjeux des techniques industrielles sont « supraliminaires » (Anders 1977, dans Mengard 2014).

Nous utilisons ici le terme industriel comme l'échelle à partir de laquelle une technique devient sociétalement* « contre-productive », notamment parce que trop complexe (Illich 1973).

Dans le sens d'Illich, le terme industriel s'oppose à vernaculaire*.

Contexte industriel : contexte socio-technique dominé par l'emploi de techniques industrielles. Le contexte industriel influence les choix techniques*, même pour les chantiers cherchant à sortir des logiques industrielles. En effet, il incite par exemple aux logiques de « réemploi » : emploi de déchets industriels pour la fabrication d'outils, l'emploi de terres d'excavation en interceptant les flux existants, etc.

Intensif (technique) [proposition] : procédé pouvant se déployer dans un court laps de temps et éventuellement dans un espace restreint, mais nécessitant une puissance de travail* conséquente. S'oppose à extensif*.

Low-tech : techniques « accessibles, utiles et durables » (définition proposée par le Low Tech Lab https://lowtechlab.org/fr). La low-tech est avant tout un prisme d'analyse de la pertinence sociétale* des techniques (Tanguy et al. 2023). S'oppose au « high-tech », non dans un dualisme mais dans une continuité : une low-tech l'est par rapport à un autre choix technique* plus high-tech.

Nord Global / Sud Global : dualisme représentant l'ensemble des populations globalement dominantes /dominées à l'échelle mondiale, dans une approche intersectionnelle des dominations : patriarcat, colonialisme, néo-colonialisme, etc. Son emploi est préférable au dualisme « Occidental /oriental », « développée/en développement » ou « riche/pauvre » d'après (Pruvost

2021b). On emploiera également le terme industrialisé/non industrialisé lorsqu'il s'agit d'impact des systèmes techniques sur les sociétés.

Patrimoine, matrimoine : ensemble des techniques, objets et usages historiques reconnus comme importants à « échanger, valoriser ou maintenir pour les générations futures » (Communauté Wikipédia 2024c). Le patrimoine bâti est l'ensemble des constructions dont l'entretien et la valorisation est reconnue par la société. En cela, nommer le bâti vernaculaire* traditionnel* « patrimoine bâti », est une manière de le valoriser au même titre que les constructions « remarquables », souvent à l'image des classes dominantes et bien plus entretenu et valorisé que le vernaculaire**.**

Ouvrabilité : voir Chapitre 2, 6

Paysan.ne (technique, construction, matériau) [proposition] : qui relève d'une production de subsistance – en l'occurrence d'habitat –, de petite échelle, visant la durabilité et la résilience. La construction paysanne est un terme inspiré de l'agriculture paysanne, « une idée de l'agriculture qui s'inscrit dans les critères de durabilité, de respect de l'environnement et de conservation du tissu social »(Communauté Wikipédia 2024a). Si l'agriculture paysanne « n'a pas qu'un rôle de production de denrées alimentaires, mais a aussi un rôle social, environnemental et de maintien de la qualité des produits agricoles » (Communauté Wikipédia 2024a), alors la construction paysanne n'a pas qu'un rôle de production de bâtiments, mais également un rôle sociétal*, de maintien de la qualité du bâti. La construction paysanne répond à des besoins de subsistance et soigne la société des vivants. La construction paysanne est « low-tech »*, mais le terme paysan insiste sur la notion de déconnexion maximale du système industriel, de proximité à la terre, là où le cadre low-tech peut impliquer des chaînes de productions industrielles, volontairement ou indirectement (petits composants électroniques ou plastiques, récupération de déchets industriels, etc.).

La construction en terre crue peut se faire via des techniques paysannes. Du fait de leur définition par la déconnexion au système industriel, il s'agit la plupart de techniques dites « traditionnelles* », dans le sens du « précédent historique » plutôt que du « précédent local ». Par exemple, construire en adobes en Bretagne, si la terre s'y prête, peut être réalisé dans des procédés paysans, alors que la technique n'existe pas traditionnellement sur ce territoire. Ce qu'on appelle « matériau paysan », c'est ce qu'Anfray (2023) appelle « agro-matériau » par parallèle avec l'agro-écologie.

Le qualificatif « paysan » est une appréciation globale du choix technique*, qui ne peut être réduite aux impacts environnementaux du matériau par unité de masse, mais doit intégrer l'ensemble du procédé dans lequel il est impliqué. Par exemple, la chaux peut être considérée comme un matériau paysan lorsqu'elle est utilisée avec parcimonie et en dernier recours : dans un mortier chaux-sable en l'absence de sol argileux à disposition ; en badigeon pour éclaircir la couleur d'un mur ; en enduit de protection pour une mur particulièrement exposé.

Voir aussi *rationalité paysanne**.

Porteur, autoporteur, non porteur (élément de paroi): Les limites entre porteur, autoporteur et non porteur sont floues (Contexte, 2.3.4).

- porteur : mur dont la résistance mécanique permet de supporter des contraintes supérieures à ses contraintes propres, *a minima* celles de la toiture de l'édifice.

- autoporteur : mur dont la résistance mécanique est suffisante pour permettre de supporter ses contraintes propres (notamment sa propre masse, en compression). Un élément de paroi autoporteuse doit donc supporter une élévation d'au moins l'ordre de grandeur de la hauteur d'un étage de bâtiment (env. 2,50m).

- mur dont l'essentiel de la résistance mécanique est assurée par l'existence d'une structure porteuse composée d'éléments d'autres matériaux (bois, pierre…). L'élément non porteur est disposé en remplissage de cette structure.

Pré-industriel / industrialisé : « il n'y a pas vraiment de société « industrialisée » et « préindustrielle » : que ce soit dans le temps sur le continent européen ou dans l'espace dans le monde contemporain, la « transition » industrielle ne s'est jamais faite selon un seul et même type de modalités » (Thompson 2019:62). L'état « industrialisé » d'un espace-temps est considéré ici non seulement comme un système technique mais comme un type d'organisation sociale et politique, que l'on pourrait plus justement nommer de système capitaliste industriel. C'est dans le déploiement d'un tel système social que les impacts de l'industrialisation se manifestent sur les rythmes de subsistance : rationalisation*, exploitation et homogénéisation des modes de vie (Illich 1973).

Prolétaire : individu ne possédant pas de moyens de production (par exemple, des outils de travail) et dépendant de ce fait d'une structure d'emploi (salarié ou non) pour assurer sa subsistance.

Propriétés [propositions] :

Propriété compositionnelle : propriété descriptive physique ou chimique d'un mélange de terre crue. Par exemple : distribution granulométrique, forme des éléments, minéralogie. Aussi appelée « intrinsèque », ou « de composition ».

Propriété organisationnelle : propriété décrivant l'organisation des composants d'un mélange de terre entre eux à un instant donné. Par exemple : compacité, homogénéité(s), porosité.

Propriété comportementale : propriété décrivant la réaction d'un mélange de terre à une contrainte. Par exemple : résistance en cisaillement, vitesse d'absorption de l'eau. Il peut s'agir d'une propriété d'ouvrabilité au cours de la mise en œuvre pour une étape précise : aisance de tamisage, d'homogénéisation, de compaction. On peut chercher à décomposer ces étapes en propriétés comportementales plus « fondamentales ». On peut également envisager que l'ouvrabilité d'une terre sur un procédé complet est une propriété comportementale complexe, qui peut être décomposée en étapes/gestes, puis en propriétés « fondamentales ».

Propriétés de prédiction/propriété cible: La propriété de prédiction est une *propriété compositionnelle** d'un mélange de terre dont la connaissance permet d'estimer une propriété cible du mélange, souvent une *propriété comportementale*,* après sa transformation dans un procédé de mise en œuvre. Par exemple, la teneur en minéraux argileux d'une terre pour estimer la cohésion d'un matériau après un procédé de façonnage d'adobes connu.

Propriété de mise en œuvre : propriété qui importe au cours de la mise en œuvre du matériau, ou plus largement de l'ensemble de sa fabrication avant la vie de service.

Propriété d'usage /propriété finale : propriété qui importe au cours de la vie de service d'un élément. Des propriétés d'usage souvent considérées sont sa solidité, sa durabilité, des questions de confort, ou encore des considérations esthétiques.

Proxy : en sciences naturelles*, propriété permettant l'approximation d'une autre propriété (2.1.2).

Rationalisation : Dans ce travail de thèse, nous considérons la rationalisation de la production dans le secteur du bâtiment en France hexagonale au XIXe siècle et début du XXe siècle comme le phénomène d'optimisation de certains facteurs de production, principalement la productivité par unité de travail humain, dans un contexte de quantification comptable et scientifique des chaînes de production. Le Taylorisme et le Fordisme sont des courants représentatifs de ce phénomène, qui transforme le rapport au travail en divisant et spécialisant les tâches à l'extrême et en multipliant les niveaux

hiérarchiques. La rationalisation entraîne l'agrandissement des échelles de production, la centralisation. Elle entraîne donc progressivement l'industrialisation*, que nous définissons comme le dépassement d'une échelle au-delà de laquelle la technique n'est plus au service des humain.es et du vivant.

Rationalité paysanne [proposition]: rationalité économique* de subsistance, basée sur une logique du moindre effort collectif de petite échelle et sur le long terme. Aussi appelé « économie maximum » par (Marfaing et al. 2000).

Régénérative (matériau, technique) : technique ayant un impact sociétal* positif dans leur emploi, c'est à dire qu'elles compensent au moins les impacts négatifs qu'elles entraînent et procurent en plus de l'amortissement d'autres techniques ayant eu des impacts négatifs. On peut le voir comme l'opposé de l'extractivisme*, qui prend plus de valeur que les éco-socio-systèmes ne sont capable de produire, ce qui mène à leur effondrement ; la régénération produit plus de valeur qu'elle n'en exporte ce qui mène à leur renforcement.

Renouvelable/non renouvelable (ressource): le stock d'une *ressource naturelle** terrestre se renouvelle à partir de l'énergie issue de du soleil ou de la chaleur du manteau terrestre. Ces énergies sont souvent employées après transformation, dans des phénomènes atmosphériques, des processus géologiques ou biologiques. C'est la rapidité du renouvellement du stock d'une ressource naturelle relativement à sa consommation qui donne son caractère renouvelable ou non. La vitesse de renouvellement d'une ressource est un critère continu, et elle dépend souvent du renouvellement d'autres ressources. On ne peut donc classer avec certitude la qualité renouvelable/non renouvelable. Cependant, on compare généralement l'échelle d'une génération humaine (100 ans) comme intervalle de temps d'observation du renouvellement du stock, afin de trancher sur ce caractère. On confond souvent une ressource et son exploitation. Une ressource peut être potentiellement renouvelable (ex : le bois) mais son exploitation peut ne pas l'être (utilisation d'énergies fossiles pour l'extraction, destruction trop rapide du stock). La complexité des interactions entre les procédés de production spontanés ou anthropiques des ressources naturelles ajoute une autre couche de complexité à la qualification renouvelable/non renouvelable.

Représentation : image que des personnes se font d'une entité, ici un matériau de construction. La représentation est nourrie de l'imaginaire, les usages culturels, les souvenirs. Note : *représentation* est également employée pour les schémas et figures.

Ressources : élément permettant la réponse à un besoin. Une ressource ne l'est jamais en elle-même, elle le devient dans la projection de son usage potentiel (Berque 2021). Les ressources dites « naturelles » sont des élément de l'écosystème non humain dont la transformation dans des procédés techniques permet de répondre à un besoin.

Sciences naturelles/sciences humaines et sociales : l'expression « sciences naturelles » désigne les disciplines scientifiques traitant d'objets assimilés extérieurs à l'influence « culturelle » humaine, à l'inverse des sciences dites « humaines et sociales » (SHS). On préférera l'expression sciences naturelles à « sciences dures » ou « sciences exactes » qui supposent implicitement que les SHS sont molles/inexactes.

Squelette granulaire : fraction granulométrique >0.002µm : « limons », « sables », « graviers ».

Société, société des vivants [proposition]: ensemble des êtres vivants sociaux d'un groupe en interaction et de leurs pratiques culturelles. Cette définition inclut les êtres vivants autres qu'humains dans la société.

Sociétal [proposition]: environnemental + social. Impacts sociétaux : ensemble des impacts (positifs ou négatifs) qu'une action provoque sur la société des vivants*. On regroupe volontairement sous ce terme les impacts dits « environnementaux » et « sociaux » et leurs interactions afin de dépasser le dualisme nature/culture. On aurait également pu parler d'impacts « écosystémiques » en incluant la société humaine dans son écosystème, mais ce terme risquerait de maintenir le manque de visibilité de la composante sociale, « culturelle », souvent oubliée des études d'impacts des choix techniques* type Analyse de Cycle de Vie.

Pertinence sociétale [proposition]: dans un choix technique, impact relatif d'un choix par rapport aux autres sur la société des vivants*.

Technique : Méthode, ou ensemble de méthodes, permettant d'atteindre un objectif. Peut indiquer un procédé, une étape de ce procédé ou un geste (Sennett 2009). Les philosophes des techniques considèrent même l'échelle des institutions et filières comme des *techniques* (Illich 1973) en tant que méthodes d'interaction des humain.es entre elles et avec le monde.

Choix technique [proposition]: emploi préféré d'une technique plutôt que d'autres, pour atteindre un objectif. Le choix d'une technique est réalisé en pratique selon une diversité de facteurs. Un choix technique peut impacter le système sociétal*, directement ou indirectement et également de manière multifactorielle. Comme les techniques, les choix techniques s'appliquent au choix de gestes, de procédés, voir de formes d'institutions. Par exemple, un choix technique peut s'effectuer entre deux outils de travail de la terre (pour la façonner), entre deux techniques-types (pour façonner des murs), entre le choix de construire, de rénover ou de mieux répartir l'existant (pour répondre à un besoin de logement).

Technique-type, procédé-type [proposition]: ensemble de procédés de construction en terre crue qui partagent des étapes semblables. Permet de souligner qu'il n'y a pas « une » technique de bauge, de pisé, d'adobes ou de torchis, mais une infinité de variation dans chacun de ces procédés-type.

Tenacité : voir Chapitre 2, 5.1.3 .

Texture : voir fraction fine*.

Traditionnel (technique) : Qui est fondé sur un usage de temps long. On constate qu'il y a plusieurs notions dans l'usage du mot « traditionnel » qui ne sont pas utilisées de manière homogène. Traditionnel peut se référer au caractère :

- spatial, synonyme d'autochtone : il peut s'agir d'une technique historiquement utilisée sur un territoire particulier, traditionnel relève alors de l'existent d'un « précédent local » ;

- temporel, synonyme d'historique ou pré-industriel, opposé à moderne: on relate l'invention ou l'usage de la technique avant le XXe siècle et le déploiement des techniques industrielles. Ainsi, une technique traditionnelle « historique » n'est pas forcément traditionnelle « locale ».

- d'échelle de procédé, synonyme de paysan, s'oppose à industriel : on préférera alors l'expression technique paysanne*

On désignera comme « traditionnelles » les techniques traditionnelles « historiques ». S'il s'agit d'une technique à la fois historique et paysanne, on la nommera vernaculaire*. Traditionnel désigne parfois les techniques industrielles les plus répandues, que nous avons appelées conventionnelles*.

Unité fonctionnelle : unité de valeur objectif d'un procédé, servant de base à la comparaison de son efficacité. Notion empruntée aux études d'Analyse de Cycle de Vie, elle vise à comparer des produits différents sur une base commune. Par exemple, la comparaison des matériaux de maçonnerie à

objectifs structurels peut se faire à résistance mécanique équivalente : on regarde, pour une résistance mécanique atteinte, les impacts de l'ensemble du cycle de vie des matériaux nécessaires. Si cette notion facilite la comparaison, elle simplifie inévitablement la diversité des usages d'un produit. Par exemple, un mur n'a pas qu'une vocation structurelle, mais également hygrothermique, esthétique, ergonomique dans l'usage comme dans la mise en œuvre. On précisera donc chaque fois à quelle variable se réfère l'unité fonctionnelle.

Technosphère : ensemble des éléments dont les propriétés et l'occurrence est gouvernée par l'action anthropique : outils, matières, paysages, organisations sociales.

Travail : notion aux usages multiples, le travail peut avoir une définition :

- physique : l'énergie appliquée à un système, conjonction de l'intensité de la contrainte appliquée et de sa durée ;

- économique* : le travail est le labeur humain réalisé dans une activité. On peut le voir comme la conjonction de l'intensité de la tâche avec sa durée, mais la notion d'intensité est vaste et dépend du contexte de réalisation de la tâche (notions de contrainte, de désirabilité, etc.) ;

- comptable, financier : le temps de travail, ou la rémunération du travail d'une activité.

Nous utilisons le terme travail dans une combinaison du travail physique et économique : nous cherchons à considérer le travail de l'énergie externe autant que le travail de l'énergie métabolique. En partant du principe que toute énergie externe (souvent non renouvelable*) non employée pourrait l'être à un autre escient, il est au moins aussi important de l'économiser que le travail métabolique humain. Ainsi, le terme *travail* est une projection holistique de ce que serait le travail humain et non humain (p. ex. effort des animaux domestiques, énergie tirée du bois) mais aussi des écosystèmes (p. ex. coût écosystémique de régulation des pollutions liées aux productions énergétiques).

Vernaculaire (bâtiments, techniques): objets ou plus généralement techniques* de subsistance, qui n'ont pas été développées ou promues par une classe d'experts (Illich 1973):

> « Est vernaculaire tout ce qui n'était pas destiné au marché dans la domus romaine, mais réservé à l'autoconsommation domestique. Il en découle l'idée que, dans le monde global du XXIe siècle, sont vernaculaires toutes les démarches qui tendent à agencer de manière optimale les ressources et les matériaux disponibles en abondance, gratuitement ou à très bas prix, y compris la plus importante d'entre elles : la force de travail. Est vernaculaire, en somme, tout ce qui demeure périphérique ou extérieurs aux flux mondiaux du capital et tout ce qui, de gré ou de force, se dérobe à son contrôle » (Frey, dans (La Facto 2023:59)).

C'est le « savoir du peuple » que l'on peut opposer au savoir « savant » (Rollot 2024). Dans l'architecture, c'est « l'architecture sans architectes » (Rollot 2024). Dans cette définition qui sera la nôtre dans ce travail de thèse, on peut également l'opposer à l' « industriel » (Illich 1973). On peut également définir le vernaculaire par l'approche économique : il s'agit de l'ensemble des activités humaines de subsistance réalisées au sein d'un « foyer » ou d'une communauté autonome, qui sont réalisées en dehors du cadre de l'échange réciproque et immédiat, par exemple en dehors de la vente monétarisée (Perriot 2020, dans Anfray 2023). Caimi (2014) propose une définition approfondie de l'architecture vernaculaire : elle est populaire, fonctionnelle, contextuelle, traditionnelle* et dynamique. En cela, il s'agit d'une « low-tech* » avec une dimension traditionnelle*. A notre avis, la définition de *technique vernaculaire* se rapproche de celle de *technique paysanne*. La différence se tient peut-être dans l'emploi des deux termes, *paysan* étant utilisé comme revendication par une partie des

travailleur.euses agricoles eux-mêmes, tandis que *vernaculaire* semble plus employé par le champ académique pour décrire des pratiques de subsistances observées depuis l'extérieur.

Le vernaculaire perd son essence lorsqu'il est capté par une classe d'expert.es, chercheur.euses, architectes ou ingénieur.es. Dans l'emploi de ce terme, certain.es auteur.ices appellent à se méfier des catégorisations « taxidermisantes » ou « lyophilisantes » du vernaculaire par exemple lorsque les emprunts « se cantonnent aux champs esthétiques et symboliques » (Didelon 2011, dans (La Facto 2023)).

La plupart du bâti historique rural peut être considéré comme *vernaculaire*. *Contexte vernaculaire* : contexte socio-technique dominé par l'emploi de techniques vernaculaires.

On utilisera le terme Vernaculaire, avec une majuscule, pour désigner la base de données de bâti issue du Service du Patrimoine de Bretagne sensée représenter le bâti vernaculaire pré-industriel en Bretagne (Chapitre 3A, 5.3.2).

Liste des abréviations

D : « distance de connaissance ». Variable du modèle de préparation des données de bâti pour le croisement avec les données pédologiques. Elle représente la distance au dernier bâtiment en terre, à partir de laquelle on considère que la culture constructive n'est pas « connue ».

Vernaculaire : avec une majuscule, désigne le jeu de données représentant la localisation de bâtiments considérés vernaculaires extrait de la base de données du Service du Patrimoine de Bretagne.

OSM : OpenStreetMap. Données représentant le bâti contemporain extraites des bases de données en libre accès OpenStreetMap, utilisées comme données « de densité » dans les calculs de densité relative bâtie en terre.

OSM-visible : Données OpenStreetMap filtrées par une analyse de visibilité depuis les transects réalisés.

Aléatoire : points aléatoires sur la zone d'étude, au niveau desquels sont extraites les propriétés pédologiques suivant la même méthode que pour les bâtiments. Sert de référence pour décrire la répartition des propriétés des sols sur la zone.

STU : (anglais) Soil Type Unit, unité typologique de sol. L'abréviation anglaise est utilisée pour la cohérence avec la sémantique employée dans les algorithmes.

SMU : (anglais) Soil Map Unit, unité cartographique de sol. L'abréviation anglaise est utilisée pour la cohérence avec la sémantique employée dans les algorithmes.

GSM : GlobalSoilMaps

SG : SoilGrids

CO : Carbone Organique

MO : Matières Organiques

CEC : Capacité d'Échange Cationique

VBS : Valeur au Bleu du Sol. Mesure de CEC réalisée via la molécule bleu de méthylène.

E : épaisseur du profil de sol

EG : éléments grossiers (généralement F2000µm_D)

Classes granulométriques (voir Annexe I, 2.2.3.1) :

F2µm : fraction granulométrique 0 à 2µm ; « fraction argileuse ».

F50µm : fraction granulométrique 2 à 50µm ; « fraction limoneuse ».

F2000µm : fraction granulométrique 50 à 2000µm ; « fraction sableuse ».

F2000µm _D: fraction granulométrique supérieure à 2000µm (=2mm), D pour « jusqu'au plus gros diamètre »; « éléments grossiers » ou « fraction graveleuse ».

PXµm : passant granulométrique total à Xµm, c'est à dire la fraction 0 à Xµm.

PSC : Pourcentage de Sols Convenables

RDR : Ratio de Disponibilité des Ressources, calculé à l'échelle des communes.

Bibliographie

[NC] : Texte original non consulté

Accetta André, 2003. Étude d'adobes issus de sites archéologiques au regard des critères contemporains de convenance des terres. in *Échanges transdisciplinaires sur les constructions en terre crue. Terre modelée, coupé ou coffrée. Matériaux et modes de mise en oeuvre*. Montpellier.

ADEME, 2019. Prospectives 2035 et 2050 de consommation de matériaux pour la construction neuve et la rénovation énergétique BBC. https://www.ademe.fr/prospectives-2035-2050-consommation-materiaux-construction-neuverenovation- energetique-bbc.

ADEME, 2021. TRANSITION(S) 2050 : 4 scénarios pour atteindre la neutralité carbone - Scénario 1 : génération frugale.

ADEME, 2023. Déchets chiffres-clés.

Álvarez Mora Alfonso, 2013. Le concept de patrimoine bâti, alibi des modèles urbains soumis à la rente foncière en Europe. *Espaces et sociétés* 152-153(1-2):19-33. https://doi.org/10.3917/esp.152.0019.

Anders Günther, 1977. Et si je suis désespéré que voulez-vous que j'y fasse ? Allia.

Andrade F. A., Al-Qureshi H. A., et Hotza D., 2011. Measuring the plasticity of clays: A review. *Applied Clay Science* 51(1):1-7. https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.10.028.

Anfray Thomas, 2023. Pour une approche agroécologique de l'habiter. Recherche de leviers d'action avec des pratiques minoritaires et avec le matériau terre. INSPÉ - Université de Strasbourg.

Ansaa-Asare Julia, Hamard Erwan, Razakamanantsoa Andry, Duc Myriam, Cazacliu Bogdan, et Verron Loris, 2023. Parametric Study on the Implementation Process Effect on Microstructure of Earth Construction. *NanoWorld Journal* 9:S224-31. https://doi.org/10.17756/nwj.2023-s2-039.

Ansart-Dourlen Michèle, 2005. CASTORIADIS. Autonomie et hétéronomie individuelles et collectives. Les fonctions de la vie imaginaire. *Cahiers de Psychologie Politique* 7(7). https://doi.org/10.34745/numerev_421.

Antoine P., 2002. Les lœss en France et dans le nord-ouest européen. *Revue Française de Géotechnique* (99):3-21. https://doi.org/10.1051/geotech/2002099003.

Aras-gaudry Adrien, 2025. Le patrimoine de terre crue en Champagne comme source d'inspiration pour la transition écologique : architectures vernaculaires et valorisation des matériaux locaux. Thèse en préparation, Reims. https://theses.fr/s298088.

Aras-Gaudry Adrien, Fronteau Gilles, et Hamard Erwan, 2023. Rediscovering raw earth heritage of Champagne area (France): Cartography and typology of a specific adobe vernacular architecture. *Materials Today: Proceedings*. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.310.

Aras-Gaudry Adrien, Roux Dominique, Maire Véronique, et Fronteau Gilles, 2024. Revaloriser la terre crue en Champagne-Ardenne: Une expérimentation croisée formation-recherche Comment la terre fait réseau en liant les acteurs et actrices d'un territoire. P. 227-42 in *Regards interdisciplinaires sur l'étude et l'enseignement de la transition écologique*, édité par F.-D. Vivien, F. Thuriot, F. Bost, A. Laquerriere-Lacroix, et P. Salembier. Editions des archives contemporaines. https://doi.org/10.17184/eac.8900.

ARPE Normandie, 2019. Fiche matériau paille. *Guide des éco-matériaux 2019*. https://arpenormandie.org/les-fiches-des-eco-materiaux-normands/.

Arrigoni Alessandro, Beckett Christopher T. S., Ciancio Daniela, Pelosato Renato, Dotelli Giovanni, et Grillet Anne-Cécile, 2018. Rammed Earth Incorporating Recycled Concrete Aggregate: A Sustainable, Resistant and Breathable Construction Solution. *Resources, Conservation and Recycling* 137:11-20. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.05.025.

Arrouays Dominique, Grundy Michael G., Hartemink Alfred E., Hempel Jonathan W., Heuvelink Gerard B.M., Hong S. Young, Lagacherie Philippe, Lelyk Glenn, McBratney Alexander B., McKenzie Neil J., Mendonca-Santos Maria d.L., Minasny Budiman, Montanarella Luca, Odeh Inakwu O.A., Sanchez Pedro A., Thompson James A., et Zhang Gan-Lin, 2014. GlobalSoilMap. P. 93-134 in *Advances in Agronomy*. Vol. 125. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800137-0.00003-0.

Asdrubali Francesco, D'Alessandro Francesco, et Schiavoni Samuele, 2015. A Review of Unconventional Sustainable Building Insulation Materials. *Sustainable Materials and Technologies* 4:1-17. https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002.

Association Française pour l'Étude des Sols, 2008. Référentiel pédologique. Quae.

Association Française pour l'Étude des Sols, 2014. Sols et Définitions. https://www.afes.fr/sols-et-definitions/.

Aubert Jean-Emmanuel, Marcom Alain, Oliva Priscia, et Segui Pauline, 2015. Chequered earth construction in south-western France. *Journal of Cultural Heritage* 16(3):293-98. https://doi.org/10.1016/j.culher.2014.07.002.

Augiseau Vincent, et Kim Eunhye, 2021. Spatial Characterization of Construction Material Stocks: The Case of the Paris Region. *Resources, Conservation and Recycling* 170:105512. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105512.

Autard Jean, 2022. La nature, concept opératoire des luttes écologistes. *Filosofi(e)Semiotiche* 9(1): (10 p.). https://hal.science/hal-03806330.

Baize Denis, 2016. Du taux de carbone à celui de matières organiques dans les sols — Les Mots de l'agronomie. *Les mots de l'agronomie*.

https://lorexplor.istex.fr/mots-agronomie.fr/index.php/Du_taux_de_carbone_%C3%A0_celui_de_mati%C3%A8res_organiques_dans_les_sols.

Baize Denis, 2024. Granulométrie et diagrammes de texture. *Les Mots de l'agronomie*. https://mots-agronomie.inra.fr/index.php/Granulom%C3%A9trie_et_diagrammes_de_texture.

Bardel Philippe, et Maillard Jean-Luc, 2009. Architecture de terre en Ille-et-Vilaine. Éditions Apogée. http://www.editions-apogee.com/architecture-de-terre-en-ille-et-vilaine.html.

Barnes G. E., 2013a. An Apparatus for the Determination of the Workability and Plastic Limit of Clays. *Applied Clay Science* 80-81:281-90. https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.04.014.

Barnes G. E., 2013b. The plastic limit and workability of soils. https://www.semanticscholar.org/paper/The-plastic-limit-and-workability-of-soils-Barnes/b29527027ba3055f2f34dba0e930b28b7a6ab41c.

Bayat Hossein, Rastgo Mostafa, Mansouri Zadeh Moharram, et Vereecken Harry, 2015. Particle Size Distribution Models, Their Characteristics and Fitting Capability. *Journal of Hydrology* 529:872-89. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.067.

Bérard Quentin, 2021. Chapitre IV: Vers une philosophie de la nature ? P. 193-211 in *Éléments d'écologie politique - Pour une refondation*. https://collectiflieuxcommuns.fr/?1103-Ecologie-politique-Vers-une-philosophie-de-la-nature.

Berlan Aurélien, 2021. Terre et Liberté. La quête d'autonomie contre le fantasme de la délivrance. La Lenteur.

Berlan Aurélien, Carbou Guillaume, et Teulières Laure, 2023. Greenwashing: manuel pour dépolluer le débat public. Paris: Éditions du Seuil.

Berque Augustin, 2021. Οἶκος, terre et ¥€$: le site architectural comme ressource. *Les Cahiers de la recherche architecturale urbaine et paysagère* (11):399.

Bolleni Saicharan, 2019. Understanding the Role of Yield Stress in the Quality of Light Earth Samples. *Master 2 report*. French Institute of Science and Technology for Transport, Development and Networks (IFSTTAR).

«Bosi» Grégory, 2022. Entretien : choisir une technique de construction en terre crue. Entretien téléphonique retranscrit, accessible sur demande.

Brady Nyle C., et Weil Ray R., 1984. The Nature and Properties of Soils. 9th ed. New York, London: Macmillan.

Braudel Fernand, 1993. Civilisation matérielle, économie et capitalisme, XVe-XVIIIe siècle. 1 - Les Structures du quotidien. Le Livre de Poche éditions. Paris: Le Livre de Poche.

Brevik Eric C., Pereg Lily, Pereira Paulo, Steffan Joshua J., Burgess Lynn C., et Gedeon Csongor I., 2019. Shelter, Clothing, and Fuel: Often Overlooked Links between Soils, Ecosystem Services, and Human Health. *Science of The Total Environment* 651:134-42. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.158.

BRGM, 2024. Valorisation des terres excavées issues de sites et sols potentiellement pollués | BRGM. https://www.brgm.fr/fr/solutions/valorisation-terres-excavees-issues-sites-sols-potentiellement-pollues.

Brihiez Joseph, 2021. Une forêt pour charpente : enquête avec le bois vert pour explorer les liens entre des charpentiers et des forêts. 131. https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03644123.

Brouard Yoann, 2018. Caractérisation et optimisation d'un composite biosourcé pour l'habitat. Thèse de doctorat, Université de Tours. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01835828.

Bruno Agostino Walter, Gallipoli Domenico, Perlot Céline, et Mendes J., 2016. Effect of very high compaction pressures on the physical and mechanical properties of earthen materials. *E3S Web of Conferences* 9:14004. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160914004.

Bui Quoc-Bao, 2008. Stabilité des structures en pisé : durabilité, caractéristiques mécaniques. Thèse de doctorat, Lyon, INSA. http://www.theses.fr/2008ISAL0093.

Bui Quoc-Bao, Morel Jean-Claude, Hans Stéphane, et Meunier Nicolas, 2009. Compression Behaviour of Non-Industrial Materials in Civil Engineering by Three Scale Experiments: The Case of Rammed Earth. *Materials and Structures* 42(8):1101-16. https://doi.org/10.1617/s11527-008-9446-y.

Cagin Louis, et Nicolas Laetitia, 2022. Construire en pierre sèche. Librairie Eyrolles. https://www.eyrolles.com/BTP/Livre/construire-en-pierre-seche-9782416003615/.

Cagnon H., Aubert J. E., Coutand M., et Magniont C., 2014. Hygrothermal Properties of Earth Bricks. *Energy and Buildings* 80:208-17. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.024.

Caimi Annalisa, 2014. Cultures constructives vernaculaires et résilience : entre savoir, pratique et technique : appréhender le vernaculaire en tant que génie du lieu et génie parasinistre. Thèse de doctorat, Université de Grenoble. https://theses.fr/2014GRENH011.

Cammas Cécilia, 2018. Micromorphology of Earth Building Materials: Toward the Reconstruction of Former Technological Processes (Protohistoric and Historic Periods). *Quaternary International* 483:160-79. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.01.031.

Cannat Maude, 2022. En terre de Limagne - Inventaire d'une architecture en terre crue. *Rapport de PFE*. Bouguenais: Université Gustave Eiffel.

Carazas Aedo Wilfredo, 2021. Test Carazas - manual pedagógico - Ensayos de correlación de las tres fases de la materia tierra. Hyper Article en Ligne - Sciences de l'Homme et de la Société. https://hal.science/hal-04600237v1/file/manuel_test_carazas_2020_EN.PDF.

Carnino Guillaume, Hilaire-Pérez Liliane, et Kobiljski Aleksandra, éd., 2016. Histoire des techniques: mondes, sociétés, cultures XVIe-XVIIIe siècle. 1re édition. Paris: PUF.

Cazi Emeline, 2024. Plus de 9 millions de mètres carrés d'immobilier de bureau sont vides en France. décembre 10. https://www.lemonde.fr/economie/article/2024/12/10/immobilier-de-bureau-plus-de-9-millions-de-metres-carres-sont-vides-en-france_6439762_3234.html.

CCTC, 2018. Les guides de bonnes pratiques. Confédération de la Construction en Terre Crue. https://www.asterre.org/les-guides-de-bonne-pratique/.

CCTC, 2023. Terre de Métiers - « Diagnostic de l'offre de formation au regard des compétences requises pour le développement des métiers de la construction en terre crue » - SYNTHÈSE. Confédération de la Construction en Terre Crue.

CCTC, 2024. Vocabulaire de la Confédération de la construction en terre crue. *Document de travail, publication courant 2025*. Confédération de la construction en terre crue.

CGDD, 2014. Le parc des logements en France métropolitaine en 2012. Commissariat général au développement durable.

CGDD, 2015. Nature et richesse des nations. *La Revue du CGDD*. https://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/docs/Temis/0083/Temis-0083488/22322.pdf#page=35.

Champiré Florian, Fabbri Antonin, Morel Jean-Claude, Wong Henry, et McGregor Fionn, 2016. Impact of relative humidity on mechanical behavior of compacted earth for building constructions. *Construction and Building Materials* 110. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.027.

Chazelles Claire-Anne de, et Klein Alain, 2003. Échanges transdisciplinaires sur les constructions en terre crue. 1. Terre modelée, découpée ou coffrée. Matériaux et modes de mise en œuvre. Editions de l'Espérou - Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Montpellier. https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00548079.

Ciancio Daniela, et Jaquin Paul, 2011. An Overview of Some Current Recommendations on the Suitability of Soils for Rammed Earth. P. 6 in *International Workshop on Rammed Earth Materials and Sustainable Structures & Hakka Tulou Forum 2011: Structures of Sustainability*. Xiamen University, China.

Ciancio Daniela, Jaquin Paul, et Walker Peter, 2013. Advances on the Assessment of Soil Suitability for Rammed Earth. *Construction and Building Materials* 42:40-47. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.049.

Cohen-Boulakia Sarah, Belhajjame Khalid, Collin Olivier, Chopard Jérôme, Froidevaux Christine, Gaignard Alban, Hinsen Konrad, Larmande Pierre, Bras Yvan Le, Lemoine Frédéric, Mareuil Fabien, Ménager Hervé, Pradal Christophe, et Blanchet Christophe, 2017. Scientific Workflows for Computational Reproducibility in the Life Sciences: Status, Challenges and Opportunities. *Future Generation Computer Systems* 75:284-98. https://doi.org/10.1016/j.future.2017.01.012.

Collectif des Terreux Armoricains, 2022a. Rapport de convenance des terres pour la construction - Commune de Mordelles.

Collectif des Terreux Armoricains, 2022b. Rapport de convenance des terres pour la construction - territoire Rennes - ZAC Maurepas-Gayeulles - Commune de Rennes.

Collectif des Terreux Armoricains, 2022c. Rapport de convenance des terres pour la construction - ZAC DE LA TOUCHE - Commune de Laillé.

Communauté Wikipédia, 2022. Extractivisme. *Wikipédia*. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Extractivisme&oldid=198386211.

Communauté Wikipédia, 2023. Physical Properties of Soil. *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Physical_properties_of_soil&oldid=1171916278#Density.

Communauté Wikipédia, 2024a. Agriculture paysanne. *Wikipédia*. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Agriculture_paysanne&oldid=215296681.

Communauté Wikipédia, 2024b. Hexagone (France). *Wikipédia*. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Hexagone_(France)&oldid=220585083.

Communauté Wikipédia, 2024c. Patrimoine. *Wikipédia*. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Patrimoine&oldid=220145758.

Communauté Wikipédia, 2024d. Tradition. *Wikipédia*. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Tradition&oldid=219642574.

«Cornu» Constance, et «Dugelay» Samuel, 2022. Discussion : choisir une technique de construction en terre crue. Réalisé par Loris Verron-Guillemot. Discussion informelle non retranscrite en intégralité.

Costi de Castrillo Maria, Philokyprou Maria, et Ioannou Ioannis, 2017. Comparison of adobes from pre-history to-date. *Journal of Archaeological Science: Reports* 12:437-48. https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.02.009.

Coventry Kathryn Anne, 2004. Specification Development for the Use of Devon Cob in Earthen Construction. PHD thesis, University of Plymouth. https://pearl.plymouth.ac.uk/handle/10026.1/1291.

Cuccurullo A., Gallipoli D., Bruno A. W., Augarde C., Hughes P., et La Borderie C., 2021. A Comparative Study of the Effects of Particle Grading and Compaction Effort on the Strength and Stiffness of Earth Building Materials at Different Humidity Levels. *Construction and Building Materials* 306:124770. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124770.

Curtin D., et Smillie G. W., 1976. Estimation of Components of Soil Cation Exchange Capacity from Measurements of Specific Surface and Organic Matter. *Soil Science Society of America Journal* 40(3):461-62. https://doi.org/10.2136/sssaj1976.03615995004000030041x.

Danso Humphrey, 2018. Suitability of Soil for Earth Construction as Building Material. 2:1-13. https://doi.org/10.31031/ACET.2018.02.000540.

Daoust Marc-Kevin, 2018. Neutralité scientifique. *L'encyclopédie philosophique*. https://encyclo-philo.fr/neutralite-scientifique-a.

David M, Costo M., de Blignières B., et Birot R., 2020. Maisons en pierre et en terre. *D'après http://www.tiez-breiz.bzh, 2020*. https://wiki.lemordelais.fr/index.php?title=Maisons_en_pierre_et_en_terre#Une_ferme_en_pis.C3.A9_de_Lyon.

Davis Angela Yvonne, et Peronny Nathalie, 2021. La prison est-elle obsolète ? Vauvert: Au diable Vauvert.

Delcroix G., 1972. Caractérisation des matériaux de construction en terre crue. 3. C.N.R.S. Centre de Recherches Archéologiques.

Delord Julien, et Devictor Vincent, 2023. Biodiversité : à qui profite le flou? in *Greenwashing: manuel pour dépolluer le débat public*, *Points*. Paris: Éditions du Seuil.

Denot Agathe, et Eisenlohr Laurent, 2021. Réemploi et valorisation des terres excavées, Lille. https://www.cerema.fr/system/files/documents/2021/11/ceremace_drim_ecm_terres-sim-lille-21_octobre_2021_vf.pdf.

Descola Philippe, 2015. Par-delà nature et culture. Gallimard. https://doi.org/10.3917/gall.desco.2015.01.

Dialmy A., Rguig M., et Meliani M., 2023. Optimization of the Granular Mixture of Natural Rammed Earth Using Compressible Packing Model. *Sustainability (Switzerland)* 15(3). https://doi.org/10.3390/su15032698.

Dipasquale Letizia, Correia Mariana, Mecca Saverio, Mileto Camilla, Morot-Sir Patrice, Vegas Fernando, Akermann Kristina, Andersson Jenny, Bavay Gérard, Bei Georgia, Benža Mojmír, Berescu Catalin, Bertašiu¯té Rasa, Blu¯ms Peteris, Braxén-Frommer Ann-Marie, Bronchart Sophie, Buch Pierre, Buzás Miklós, Castro Alexis, et Guérin René, 2011. TERRA EUROPAE Earthen Architecture in the European Union.

DREAL Bretagne, et Institut national de l'information géographique et forestière (IGN-F), 2020. Communes France Métropole. https://data.gouv.fr/en/datasets/communes-france-metropole/.

Driffort Duncan, 2021. L'extraction du sable au Maroc, de la ressource au produit. *Les Cahiers de la recherche architecturale urbaine et paysagère* (11):399. https://doi.org/10.4000/craup.6758.

«Dugelay» Samuel, 2022a. Entretien : choisir une technique de construction en terre crue - deuxième partie. Réalisé par Loris Verron-Guillemot. Entretien téléphonique retranscrit, accessible sur demande.

«Dugelay» Samuel, 2022b. Entretien : choisir une technique de construction en terre crue - première partie. Réalisé par Loris Verron-Guillemot. Entretien téléphonique retranscrit, accessible sur demande.

Dycha Claire, 2021. Construire en terre : une nécessité , un geste, une opportunité ? Une identité. *Mémoire de Diplôme de Spécialisation et d'Approfondissement*. École Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble.

Egli Markus, Dahms Dennis, et Norton Kevin, 2014. Soil Formation Rates on Silicate Parent Material in Alpine Environments: Different Approaches–Different Results? *Geoderma* 213:320-33. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.016.

Ekwue E. I., 1990. Organic-Matter Effects on Soil Strength Properties. *Soil and Tillage Research* 16(3):289-97. https://doi.org/10.1016/0167-1987(90)90102-J.

Ellul Jacques, 1988. Le bluff technologique. Hachette.

Fabbri Antonin, Morel Jean-Claude, Aubert Jean-Emmanuel, Bui Quoc-Bao, Gallipoli Domenico, et Reddy B.V. Venkatarama, 2022. Testing and Characterisation of Earth-Based Building Materials and Elements: State-of-the-Art Report of the RILEM TC 274-TCE. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-83297-1.

FAO, 2015. Status of the World's Soil Resources: Main Report. Rome, Italy: FAO. http://www.fao.org/documents/card/en/c/c6814873-efc3-41db-b7d3-2081a10ede50/.

Fernandez Mathieu, 2018. La strate du sol d'une mégapole : observations localisées sur l'Anthropocène. Les couches issues des périodes préindustrielle et industrielle à Paris. *Géocarrefour* (92/2). https://doi.org/10.4000/geocarrefour.12016.

Ferreira Carla S. S., Kalantari Zahra, Salvati Luca, Canfora Loredana, Zambon Ilaria, et Walsh Rory P. D., 2019. Chapter Six - Urban Areas. P. 207-49 in *Advances in Chemical Pollution, Environmental Management and Protection*. Vol. 4, *Soil Degradation, Restoration and Management in a Global Change Context*, édité par P. Pereira. Elsevier. https://doi.org/10.1016/bs.apmp.2019.07.004.

Flament Cédric, 2013. Valorisation des fines de lavage de granulats: application à la construction en terre crue. Thèse de doctorat, Université d'Artois. http://www.theses.fr/2013ARTO0202/document.

Fondation Abbé Pierre, 2022. L'état du mal-logement en France 2022. 27.

Ford Margaret, 2002. The Development of a Methodology for Creating an Earthen Building Inventory. PHD thesis, University of Plymouth. https://doi.org/10.24382/3624.

Ford Margaret, El Kadi Hisham, et Watson Linda, 1999. The Relevance of GIS in the Evaluation of Vernacular Architecture. *Journal of Architectural Conservation* 5(3):64-75. https://doi.org/10.1080/13556207.1999.10785252.

Ford Margaret, Griffiths Richard, et Watson Linda, 2005. The Sandford Inventory of Earth Buildings Constructed Using a GIS. *Building and Environment* 40(7):964-72. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.09.006.

Fressoz Jean-Baptiste, 2024. Sans transition: une nouvelle histoire de l'énergie. Paris XIXe: Éditions du Seuil.

Gasnier Hugo, 2019. Construire en terres d'excavation, un enjeu pour la ville durable. Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes (ComUE). https://www.theses.fr/2019GREAH001.

Géomaterio, 2022. Comprendre la terre crue : approche « matériau » ou « performancielle » ? - à portée de mains. https://blog.geomaterio.fr/materiaux/comprendre-la-terre-crue-approche-materiau-ou-systeme/, https://blog.geomaterio.fr/materiaux/comprendre-la-terre-crue-approche-materiau-ou-systeme/.

Gharpure Akshay, Heim James William, et Vander Wal Randy L., 2021. Characterization and Hazard Identification of Respirable Cement and Concrete Dust from Construction Activities. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18(19):10126. https://doi.org/10.3390/ijerph181910126.

Girard Michel-Claude, Schvartz Christian, et Jabiol Bernard, 2017. Étude des sols. https://www.dunod.com/sciences-techniques/etude-sols-description-cartographie-utilisation.

Girault Mathilde, 2020. Militance au potager. *Réseau des Territorialistes*. https://reseaudesterritorialistes.fr/2020/07/10/militance-au-potager/.

Gögelein Christoph, Brinkmann Martin, Schröter Matthias, et Herminghaus Stephan, 2010. Controlling the Formation of Capillary Bridges in Binary Liquid Mixtures. *Langmuir* 26(22):17184-89. https://doi.org/10.1021/la103062s.

Goizauskas Jean, 2019. Des règles de l'art en chantier. Enquête sur la (re)connaissance de techniques de maçonnerie à base de terre crue sur deux chantiers de construction neuve en France. *Rapport de Master 2*. Museum National d'Histoire Naturelle.

Goizauskas Jean, 2020. Rapport bibliographique « Représentations de la construction en terre crue d'hier à aujourd'hui, en France (et ailleurs) ». Projet National Terre Comité de montage pour l'étude de faisabilité.

Gomes Maria Idália, Gonçalves Teresa Diaz, et Faria Paulina, 2014. Unstabilized Rammed Earth: Characterization of Material Collected from Old Constructions in South Portugal and Comparison to Normative Requirements. *International Journal of Architectural Heritage* 8(2):185-212. https://doi.org/10.1080/15583058.2012.683133.

Gordon Uri, 2020. L'anarchisme et les politiques techniques. https://riotforliberty.medium.com/uri-gordon-lanarchisme-et-les-politiques-techniques-e64b93e499ab.

Grand Paris Aménagement, 2021. Émergence d'une filière terre crue en Île-de-France : Retour sur la visite de la fabrique Cycle Terre. *grandpariscirculaire.org*. https://www.grandpariscirculaire.org/articles/h/emergence-d-une-filiere-terre-crue-en-ile-de-france-retour-sur-la-visite-de-la-fabrique-cycle-terre.html.

Grolleau Emmanuel, Bargeot L., Chafchafi A., Hardy Renaud, Doux J., Beaudou A., Martret Hervé Le, Lacassin J. C., Fort J. L., Falipou Pierre, et Arrouays Dominique, 2004. Le système d'information national sur les sols: DONESOL et les outils associés. *Étude et Gestion des Sols* 11(3):255. https://hal.inrae.fr/hal-02681867.

Guillaud Hubert, Chazelles-Gazzal Claire-Anne de, et Klein Alain, éd., 2007. Les constructions en terre massive pisé et bauge: deuxièmes échanges transdisciplinaires sur les constructions en

terre crue : actes de la table-ronde de Villefontaine, Isère, 28-29 mai 2005. Montpellier: Éd. de l'Espérou.

Hall Matthew, et Djerbib Youcef, 2004. Rammed earth sample production: context, recommendations and consistency. *Construction and Building Materials* 18(4):281-86. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2003.11.001.

d'Halluin Aldric, 2021. Le renouveau de la terre crue dans l'architecture. Vers un épanouissement équilibré ? *Rapport de PFE*. École Nationale Supérieure d'Architecture de Bordeaux.

Hamard Erwan, 2017. Rediscovering of Vernacular Adaptative Construction Strategies for Sustainable Modern Building : Application to Cob and Rammed Earth. PHD thesis, Université de Lyon. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01715849.

Hamard Erwan, Cammas Cécilia, Fabbri Antonin, Razakamanantsoa Andry, Cazacliu Bogdan, et Morel Jean-Claude, 2016. Historical Rammed Earth Process Description Thanks to Micromorphological Analysis. *International Journal of Architectural Heritage* 1-10. https://doi.org/10.1080/15583058.2016.1222462.

Hamard Erwan, Cammas Cécilia, Lemercier Blandine, Cazacliu Bogdan, et Morel Jean-Claude, 2020. Micromorphological Description of Vernacular Cob Process and Comparison with Rammed Earth. *Frontiers of Architectural Research* 9(1):203-15. https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.06.007.

Hamard Erwan, Cazacliu Bogdan, Razakamanantsoa Andry, et Morel Jean-Claude, 2016. Cob, a Vernacular Earth Construction Process in the Context of Modern Sustainable Building. *Building and Environment* 106:103-19. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.009.

Hamard Erwan, Le Guen Lauredan, Hamon David, Dugelay Samuel, Bosi Grégory, Junalik Robert, et Cazacliu Bogdan, 2020. Étude de l'impact mécanique, environnemental et économique du mélange mécanisé de bauge. Bouguenais: Université Gustave Eiffel.

Hamard Erwan, Lemercier Blandine, Cazacliu Bogdan, Razakamanantsoa Andry, et Morel Jean-Claude, 2018. A New Methodology to Identify and Quantify Material Resource at a Large Scale for Earth Construction – Application to Cob in Brittany. *Construction and Building Materials* 170:485-97. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.097.

Hamard Erwan, Morel Jean-Claude, Salgado Fernanda, Marcom Alain, et Meunier Nicolas, 2013. A Procedure to Assess the Suitability of Plaster to Protect Vernacular Earthen Architecture. *Journal of Cultural Heritage* 14(2):109-15. https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.04.005.

Haraway Donna, 1988. Situated Knowledges: The Science Question in Feminism and the Privilege of Partial Perspective. *Feminist Studies* 14(3):575. https://doi.org/10.2307/3178066.

Harries R., Saxton B., et Coventry K., 1996. The Geological and Geotechnical Properties of Earth Material from Central Devon in Relation to Its Suitability for Building in 'Cob'. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 33(4):156. https://doi.org/10.1016/0148-9062(96)85017-0.

Hellouin de Menibus Arthur, 2020. Conférence terre allégée, juin, Mouais (44).

Higuera Romero Paula Andrea, 2023. Modèle paramétrique pour l'évaluation des impacts environnementaux de différentes techniques de construction en terre. Thèse de doctorat, Université Gustave Eiffel, Bouguenais.

Hilton Alison, 2016. La construction en terre crue en presqu'île guérandaise : histoires et perspectives. *Rapport de D.U.* IUT Rennes, Université de Rennes 1. https://alisonhiltonterre.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/09/mc3a9moireweb.pdf.

Horizon TERRE, 2021. Rapport Horizon TERRE - Tou.te.s Ensemble pour une Recherche Responsable et Engagée. https://horizon-terre.org/wp-content/uploads/2022/07/Rapport_HorizonTERRE.pdf.

Houben H., et Guillaud H., 1994. Earth building: a comprehensive guide. *CRA Terre-EAG, Greenbelt, Francia*.

Houben Hugo, et Guillaud Hubert, 2006. Traité de construction en terre. Editions Parenthèses. https://www.editionsparentheses.com/traite-de-construction-en-terre.

Huang Pan Ming, Li Yuncong, et Sumner Malcolm E., 2011. Handbook of Soil Sciences: Properties and Processes, Second Edition. CRC Press.

Hubert Guillaud, Camilla Mileto, et Mariana Correira, 2008. Terra Incógnita: Découvrir et Préserver l'Architecture de Terre En Europe. Culture Lab Editions. https://www.blaubookshop.com/en/product/terra-incognita-decouvrir-et-preserver-larchitecture-de-terre-en-europe/.

Hueto-Escobar Alicia, Mileto Camilla, Vegas López-Manzanares Fernando, et Macchioni Nicola, 2022. Traditional Constructive Techniques and Their Relation to Geographical Conditioning Factors. The Case of Half-Timbered Walls in Spain. *International Journal of Architectural Heritage* 0(0):1-23. https://doi.org/10.1080/15583058.2022.2155884.

Huitorel Gaël, 2018. Pratiques constructives en milieu rural au tournant du XIXe et du XXe siècle : expérimentations et diffusion. Le domaine agricole des frères Métayer dans le Pays de Rennes (1850-1915). Thèse de doctorat, Paris Est. https://www.theses.fr/2018PESC1032.

Husein Malkawi Abdallah I, Alawneh Ahmed S, et Abu-Safaqah Osama T, 1999. Effects of Organic Matter on the Physical and the Physicochemical Properties of an Illitic Soil. *Applied Clay Science* 14(5):257-78. https://doi.org/10.1016/S0169-1317(99)00003-4.

Hussain Mazhar, Zmamou Hafida, Provost Antony, Mahieu Angélique, Leblanc Nathalie, Levacher Daniel, Chenot Elise, et Kane Abdoulaye, 2023. Feasibility for the Recovery of Excavated Soils in Compressed Earth Blocks as a Sustainable Building Material. *Environments* 10(8):131. https://doi.org/10.3390/environments10080131.

IGCS, 2023. Référentiel Régional Pédologique et produits dérivés. *Portail de l'artificialisation*. https://artificialisation.developpement-durable.gouv.fr/bases-donnees/referentiel-regional-pedologique.

Illich Ivan, 1973. La Convivialité (Tools for conviviality). Seuil. https://www.seuil.com/ouvrage/la-convivialite-ivan-illich/9782757842119.

Illich Ivan, 1981. Le Travail Fantôme. Seuil. https://www.seuil.com/ouvrage/le-travail-fantome-ivan-illich/9782020058032.

InfoSol, 2021. DoneSol version 3.15. [Database]. https://dw3.gissol.fr/fichiers/dictionnaire_donesol_igcs_3-15_31-03-2021.pdf.

INSEE, 2017. 6.2 Surfaces, nombre de pièces, espaces attenants. https://www.insee.fr/fr/statistiques/fichier/2586024/LOGFRA17k2_F6.2.pdf.

INSEE, 2020. Dossier complet − Région de Bretagne (53) | Insee. https://www.insee.fr/fr/statistiques/2011101?geo=REG-53#chiffre-cle-3.

INSEE, 2021. 37,2 millions de logements en France au 1er janvier 2021. 254. INSEE. https://www.insee.fr/fr/statistiques/5761272#consulter.

Jamagne M., Eimberck Micheline, et Desbourdes Sacha, 2011. Grands paysages pédologiques de France. Versailles: Éditions Quae.

Jenny Hans, 1994. Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology. Unabridged, unaltered republ., new foreword. New York: Dover Publ.

Ji Yameng, Poullain Philippe, et Leklou Nordine, 2023. The selection and design of earthen materials for 3D printing. *Construction and Building Materials* 404:133114. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133114.

Jiang Bin, Lu Renzi, Jiang Maqi, Wang Liang, Chun Liang, et Wan Li, 2024. Experimental study on thermal and humidity properties of modified rammed earth buildings in winter. *Building and Environment* 258:111583. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111583.

Jiménez Delgado M. Carmen, et Guerrero Ignacio Cañas, 2007. The Selection of Soils for Unstabilised Earth Building: A Normative Review. *Construction and Building Materials* 21(2):237-51. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.006.

Jounin Nicolas, 2008. Chantier interdit au public: enquête parmi les travailleurs du bâtiment. Paris: Éd. la Découverte.

Jury William A., Gardner Wilford R., et Gardner Walter H., 1991. Soil Physics. 5ème éd. New York: John Wiley & sons.

Klein Alain, 2011. La construction en Adobes, en midi-Pyrennées (sud-ouest de la France). P. 501 in *Les cultures constructives de la brique crue*. Éditions Espérou, ENSAM. https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00736262.

Knadel Maria, Rossel Raphael A. Viscarra, Deng Fan, Thomsen Anton, et Greve Mogens Humlekrog, 2013. Visible–Near Infrared Spectra as a Proxy for Topsoil Texture and Glacial Boundaries. *Soil Science Society of America Journal* 77(2):568-79. https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0093.

Knoll Franziska, Pastor Quiles María, Chazelles Claire-Anne de, et Cooke Louise, 2019. On Cob Balls, Adobe, and Daubed Straw Plaits: A Glossary on Traditional Earth Building

Techniques for Walls in Four Languages. édité par H. Meller. Halle an der Saale: Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt.

Kouakou C.H., et Morel J.C., 2009. Strength and Elasto-Plastic Properties of Non-Industrial Building Materials Manufactured with Clay as a Natural Binder. *Applied Clay Science* 44(1-2):27-34. https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.12.019.

Koutous Ahmed, et Hilali El Mokhtar, 2019a. A Proposed Experimental Method for the Preparation of Rammed Earth Material. *International Journal of Engineering Research & Technology* 8(7). https://doi.org/10.17577/IJERTV8IS070140.

Koutous Ahmed, et Hilali El Mokhtar, 2019b. Grain shape effects on the mechanical behavior of compacted earth. *Case Studies in Construction Materials* 11:e00303. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00303.

La Facto, éd., 2023. Pour une architecture des communs: autoconstruction et espaces collectifs. La Facto. Paris: Eterotopia France.

Lagouin Méryl, Aubert Jean-Emmanuel, Laborel-Préneron Aurélie, et Magniont Camille, 2021. Influence of Chemical, Mineralogical and Geotechnical Characteristics of Soil on Earthen Plaster Properties. *Construction and Building Materials* 304:124339. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124339.

Lanoë Catherine, éd., 2016. Corps et techniques, techniques du corps. in *Histoire des techniques: mondes, sociétés, cultures XVIe-XVIIIe siècle*, *Nouvelle clio*. Paris: PUF.

Laurence Olivier, 2001. La Fissuration Due Au Retrait Restreint Dans Les Réparations Minces En Béton: Apports Combinés de l'expérimentation et de La Modélisation. Thèse de doctorat, Ecole des Ponts ParisTech. https://pastel.hal.science/pastel-00000639.

LCPC SETRA, 2000. Fascicule 1&2 du Guide des Terrassements Routiers. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements.

Le Bœuf François, 2006. Maison de terre et de roseau : regards sur la bourrine du marais de Monts. *In Situ. Revue des patrimoines* (7). https://doi.org/10.4000/insitu.2828.

Le Garrec Marie-José, Du Bouays Hubert, Taleb Kelifa, et Queneudec Michèle, 1978. Étude granulométrique des constructions rurales en terre du patrimoine d'Ille et Vilaine (Bretagne). Rennes: Université de Rennes 1.

Lecaille Mathieu, 2023. Massifier la construction en terre crue en Suisse. Au-delà de la variabilité des sols et des préjugés. *Rapport de Master 2*. ETH Zürich.

Lecompte Thibaut, 2020. Le chanvre dans les bâtiments de demain : atouts, freins et enjeux. *Annales de Bretagne et des Pays de l'Ouest. Anjou. Maine. Poitou-Charente. Touraine* (127):193-207. https://doi.org/10.4000/abpo.6361.

Lecomte Thibault, et Hellouin de Menibus Arthur, 2020. ACV et matériaux biosourcés : Comment évaluer l'impact des bâtiments sur le réchauffement climatique ? Présenté à Webinar GDR

MBS - session 1 - ACV des matériaux biosourcés, juin 16. https://www.youtube.com/watch?v=-MOOK76Btlk.

Lemercier Blandine, A.-L. Le Bris, L. Berthier, C. Walter, et M. Guernion, 2015. Sols de Bretagne. http://www.sols-de-bretagne.fr/.

Lemercier Blandine, Lagacherie Philippe, Amelin Julien, Sauter Joëlle, Pichelin Pascal, Richer-de-Forges Anne C., et Arrouays Dominique, 2022. Multiscale Evaluations of Global, National and Regional Digital Soil Mapping Products in France. *Geoderma* 425:116052. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116052.

Leussier Héloïse, 2022. Logements vacants : retaper du vieux plutôt que construire du neuf. *Reporterre, le quotidien de l'écologie*. https://reporterre.net/Logements-vacants-retaper-du-vieux-plutot-que-construire-du-neuf.

Leylavergne Elvire, 2018. La filière terre crue en France - enjeux, freins et perspectives. in *Terra Lyon 2016: Articles sélectionnés pour publication en ligne*. Villefontaine: CRAterre.

Lin Benedicta Yi Xin, Beckett Christopher, Romankiewicz Tanja, Snyder J. Riley, et Russell Ben, 2023. Unlocking the Water Retention Behaviour of Turf Construction Materials. *E3S Web of Conferences* 382:17008. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338217008.

Linemann Marie-Noëlle, 2011. Bilan et perspectives du Programme national de renouvellement urbain (action de l'ANRU) | Le Conseil économique social et environnemental. Conseil Economique Social et Environnemental - République Française. https://www.lecese.fr/travaux-publies/bilan-et-perspectives-du-programme-national-de-renouvellement-urbain-action-de-lanru.

Loiret Paul-Emmanuel, 2021. Penser & construire avec les déblais de terre, ressource principale de nos villes. Le cas de Cycle Terre, première fabrique européenne de matériaux issue du recyclage des terres du Grand Paris. *Les Cahiers de la recherche architecturale urbaine et paysagère* (11):399.

Louis-Michel Gohel, 1976. [NC] La construction en terre en haute Bretagne : histoire et techniques.

Luquain Amélie, 2021. La terre crue veut se libérer de l'analyse granulométrique. *Le Moniteur*, avril 22. https://www.lemoniteur.fr/article/caracteriser-la-terre-pour-la-construction-reste-complexe.2141454.

Mahaut Fabien, Mokéddem Samir, Chateau Xavier, Roussel Nicolas, et Ovarlez Guillaume, 2008. Effect of coarse particle volume fraction on the yield stress and thixotropy of cementitious materials. *Cement and Concrete Research* 38(11):1276-85. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.06.001.

Maniatidis V., et Walker P., 2003. A Review of Rammed Earth Construction. in *Developing Rammed Earth for UK Housing*. https://researchportal.bath.ac.uk/en/publications/a-review-of-rammed-earth-construction.

Marcom Alain, 2011. Construire en terre-paille. Mens: Terre vivante.

«Marcom» Alain, 2022. Rencontre et discussion avec Alain Marcom, maçon terre crue à la retraite, formateur et philosophe. Réalisé par Loris Verron-Guillemot. Discussion informelle non retranscrite en intégralité.

Marcom Alain, et Pruvost Geneviève, 2021. S'approprier la comptabilité du temps, de l'argent, des distances, des quantités : une expérience d'autogestion dans l'écoconstruction: *Monde commun* N° 6(1):140-55. https://doi.org/10.3917/moco.006.0140.

Marfaing Jean-Loup, Gardere Jean-Francois, Casel Thomas, et Colzani Joseph, 2000. Maisons d'argile en Midi-Pyrénées. https://www.les-caue-occitanie.fr/publication/maisons-dargile-en-midi-pyrenees.

Maria Mies, 2022. Maria Mies : Les femmes, la nature et la division internationale du travail. *Changement social*. http://changementsocial.net/maria-mies-les-femmes-la-nature-et-la-division-internationale-du-travail/.

Maris Virginie, 2014. Nature à Vendre : Les Limites Des Services Écosystémiques. Éditions Quae.

Mateu Marta, Fernández Hugo, Daneels Annick, Cabadas Héctor, et Piña Salvador, 2022. Earthen Architecture in the Mesoamerican Classic Period: A Micromorphological Approach to Its Manufacture Process. *Journal of Archaeological Science* 137:105525. https://doi.org/10.1016/j.jas.2021.105525.

McElroy Erin, 2019. Samuel Stein 2019: Capital City: Gentrification and the Real Estate State. London: Verso. *International Journal of Urban and Regional Research* 43(5):1001-3. https://doi.org/10.1111/1468-2427.12835.

Meimaroglou Nikiforos, et Mouzakis Charalampos, 2019. Cation Exchange Capacity (CEC), Texture, Consistency and Organic Matter in Soil Assessment for Earth Construction: The Case of Earth Mortars. *Construction and Building Materials* 221:27-39. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.036.

Meimaroglou Nikiforos, et Mouzakis Charalampos, 2024. The role of intrinsic soil properties in the compressive strength and volume change behavior of unstabilized earth mortars. *Materials and Structures* 57. https://doi.org/10.1617/s11527-024-02314-0.

Mengard Frédérique, 2014. La notion de « supraliminaire » chez Günther Anders : Comment penser le déclin et la renaissance de Prométhée à l'ère technologique ? P. 119-36 in *PostHumains : Frontières, évolutions, hybridités, Interférences*, édité par E. Després et H. Machinal. Rennes: Presses universitaires de Rennes. https://doi.org/10.4000/books.pur.52513.

Meulemans Germain, 2019. Fonder les villes : comment les terrassiers comprennent le sol. *Communications* 105(2):149-59. https://doi.org/10.3917/commu.105.0149.

Miccoli Lorenzo, Müller Urs, et Fontana Patrick, 2014. Mechanical Behaviour of Earthen Materials: A Comparison between Earth Block Masonry, Rammed Earth and Cob. *Construction and Building Materials* 61:327-39. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.009.

Mies Maria, 2005. Patriarchy and accumulation on a world scale – revisited, octobre 29, Green Economics Institute. http://changementsocial.net/patriarcat-et-exploitation-dans-leconomie-mondialisee-par-maria-mies/.

Mileto Camilla, Vegas López-Manzanares Fernando, Villacampa Crespo Laura, et García-Soriano Lidia, 2019. The Influence of Geographical Factors in Traditional Earthen Architecture: The Case of the Iberian Peninsula. *Sustainability* 11(8):2369. https://doi.org/10.3390/su11082369.

Mille Emmanuel, 2023. Construire la ville en terre : le pisé, matériau essentiel de l'extension urbaine de Lyon (XVe-XIXe siècles). Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes. https://theses.fr/2023GRALH009.

Miranda Santos Marta, Navarro Ezquerra Antonia, et Lescop Laurent, 2022. La terre crue à l'épreuve des ambiances sonores : un dialogue entre la mesure physique et les expériences sensibles. Thèse de doctorat, Universitat Politècnica de Catalunya. https://doi.org/10.5821/dissertation-2117-402145.

Mitchell James K, et Soga Kenichi, 2005. Fundamentals of Soil Behavior. 560.

Monsaingeon Baptiste, 2023. Economie circulaire : recycler la promesse d'infini ou prendre au sérieux les limites écologiques ? in *Greenwashing: manuel pour dépolluer le débat public*, *Points*. Paris: Éditions du Seuil.

Mootz Eric, 2023. Construction écoresponsable : le grand gâchis des normes environnementales ? in *Greenwashing: manuel pour dépolluer le débat public*, *Points*. Paris: Éditions du Seuil.

Morel J. C., et Charef R., 2019. What Are the Barriers Affecting the Use of Earth as a Modern Construction Material in the Context of Circular Economy? *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 225:012053. https://doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012053.

Morel J.C, Mesbah A, Oggero M, et Walker P, 2001. Building Houses with Local Materials: Means to Drastically Reduce the Environmental Impact of Construction. *Building and Environment* 36(10):1119-26. https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00054-8.

Moreno-Maroto José Manuel, et Alonso-Azcárate Jacinto, 2015. An accurate, quick and simple method to determine the plastic limit and consistency changes in all types of clay and soil: The thread bending test. *Applied Clay Science* 114:497-508. https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.06.037.

Mulder V. L., Lacoste M., Richer-de-Forges A. C., et Arrouays D., 2016. GlobalSoilMap France: High-resolution spatial modelling the soils of France up to two meter depth. *Science of The Total Environment* 573:1352-69. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.066.

Mustafa Y.M.H., Al-Amoudi O.S.B., Zami M.S., et Al-Osta M.A., 2023. Assessment of the Suitability of Earth as a Construction Material from Experimental and Numerical Perspectives: A Critical Review. *International Journal of Geomechanics* 23(8). https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002646.

Nègre Valérie, 2003. La « Théorie-pratique » du pisé. *Techniques & Culture. Revue semestrielle d'anthropologie des techniques* (41):47-63. https://doi.org/10.4000/tc.57.

Nguyen Vinh Ba Quang, Kang Hyo-Sub, et Kim Yun-Tae, 2018. Effect of Clay Fraction and Water Content on Rheological Properties of Sand–Clay Mixtures. *Environmental Earth Sciences* 77(16):576. https://doi.org/10.1007/s12665-018-7748-0.

Nimmo J. R., et Park Menlo, 2004. Porosity and Pore Size Distribution. *Encyclopedia of Soils in the Environment* 3. https://wwwrcamnl.wr.usgs.gov/uzf/abs_pubs/papers/nimmo.04.encyc.por.ese.pdf.

Nomadéis, 2012. Étude sur le secteur et les filières de production des matériaux et produits bio-sourcés utilisés dans la construction (à l'exception du bois) - Partie 2 : Analyse des dynamiques régionales de soutien au développement des filières. https://www.urbanisme-puca.gouv.fr/IMG/pdf/NOMADEIS_MEDDE_Rapport_phase_2f_REVU.pdf.

Norton John, 1986. Building with Earth: A Handbook. Rugby: Intermediate Technology Development Group.

O'Kelly Brendan C., Alonso-Azcárate Jacinto, et Moreno-Maroto José Manuel, 2023. A Comprehensive Review of Soil Remolding Toughness Determination and Its Use in the Classification of Fine-Grained Soils. *Applied Sciences* 13(9):5711. https://doi.org/10.3390/app13095711.

Oquendo-Patiño William Fernando, et Estrada Nicolas, 2022. Finding the grain size distribution that produces the densest arrangement in frictional sphere packings: Revisiting and rediscovering the century-old Fuller and Thompson distribution. *Physical Review E* 105(6):064901. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.105.064901.

Oualmakran M., Mercatoris B.C.N., et François B., 2016. Pore-Size Distribution of a Compacted Silty Soil after Compaction, Saturation, and Loading. *Canadian Geotechnical Journal* 53(12):1902-9. https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0184.

Pagliolico S.L., Ronchetti S., Turcato E.A., Bottino G., Gallo L.M., et DePaoli R., 2010. Physicochemical and Mineralogical Characterization of Earth for Building in North West Italy. *Applied Clay Science* 50(4):439-54. https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.08.027.

Paroles de Paysans, 2022. Tu nourriras le monde. Nathan Pirard, Floris Schruijer. https://parolesdepaysans.wixsite.com/parolesdepaysans/tu-nourriras-le-monde.

Peduzzi Pascal, 2014. Sand, Rarer than One Thinks. *Environmental Development* 11:208-18. https://doi.org/10.1016/j.envdev.2014.04.001.

Pelé-Peltier Antoine, 2023. Toward Situated Civil Engineering: The Case of Earth Construction. PHD thesis, ENTPE, Lyon.

Pereira Irène, 2021. « Maximiser l'objectivité et Minimiser La Neutralité » : Du Militantisme En Sciences Sociales. *The Conversation*, mars 2. http://theconversation.com/maximiser-lobjectivite-et-minimiser-la-neutralite-du-militantisme-en-sciences-sociales-156159.

Peteiro César, 2018. Alginate Production from Marine Macroalgae, with Emphasis on Kelp Farming. P. 27-66 in *Alginates and Their Biomedical Applications*. Vol. 11, *Springer Series in Biomaterials Science and Engineering*, édité par B. H. A. Rehm et M. F. Moradali. Singapore: Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6910-9_2.

Phung Tuan Anh, 2018. Formulation et caractérisation d'un composite terre-fibres végétales. Thèse de doctorat, Université de Caen Normandie.

Piketty Thomas, 2013. Le capital au XXIe siècle. Paris: Éditions du Seuil.

Pillon Thierry, 2012. Le corps à l'ouvrage. Paris: Stock.

Pinel A., Jorand Y., Olagnon C., Charlot A., et Fleury E., 2017. Towards Poured Earth Construction Mimicking Cement Solidification: Demonstration of Feasibility via a Biosourced Polymer. *Materials and Structures* 50(5):224. https://doi.org/10.1617/s11527-017-1092-9.

Poste Aldo, 2020. Le retour à la terre des bétonneurs. *Terrestres*. https://www.terrestres.org/2020/11/02/le-retour-a-la-terre-des-betonneurs/.

Poullain Philippe, Barnaure Mircea, et Bonnet Stephanie, 2023. Mechanical properties of cob-earth composites: Variability and focus on the different calculation methods of Young's modulus. *Journal of Building Engineering* 72:106622. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106622.

Price Simon J., Ford Jonathan R., Cooper Anthony H., et Neal Catherine, 2011. Humans as major geological and geomorphological agents in the Anthropocene: the significance of artificial ground in Great Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 369(1938):1056-84. https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0296.

Pruvost Geneviève, 2016. Participatory, Self-Managed, Collective Building Projects: When Every Act Is Politicised. *Sociologie Du Travail* 58:e41-63. https://doi.org/10.1016/j.soctra.2016.09.023.

Pruvost Geneviève, 2021a. Ceci n'est pas une vie-mode d'emploi: De l'ethnocomptabilité en monde néo-paysan. *Monde commun* N° 6(1):158-73. https://doi.org/10.3917/moco.006.0158.

Pruvost Geneviève, 2021b. Quotidien politique: féminisme, écologie et subsistance. Paris: La Découverte.

Pustoc'h François, 2020. La répartition géographique des constructions rurales en terre crue de la Bretagne administrative. *Tiez Breiz*.

QGIS Development Team, 2020. QGIS Geographic Information System. https://www.qgis.org/.

Raju Lepakshi, et Venkatarama Reddy B. V., 2018. Influence of Layer Thickness and Plasticizers on the Characteristics of Cement-Stabilized Rammed Earth. *Journal of Materials in Civil Engineering* 30(12):04018314. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002539.

Rattier Raphaël, 2024. Concevoir en bauge aujourd'hui : Contribution au renouvellement de l'architecture contemporaine. Thèse de doctorat, ENSA Normandie. https://webtv.normandie-univ.fr/permalink/l1268ba09ee991e65wl7/.

Reddi L. N., Jain A. K., et Yun H. -B., 2012. 6 - Soil materials for earth construction: properties, classification and suitability testing. P. 155-71 in *Modern Earth Buildings*, *Woodhead Publishing Series in Energy*, édité par M. R. Hall, R. Lindsay, et M. Krayenhoff. Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1533/9780857096166.2.155.

Réseau écobâtir, 2019. Compte-rendu des Rencontres du Réseau Écobâtir 2019. Sainte-Croix (Drôme). http://site.reseau-ecobatir.org/comptes-rendus-rencontres/.

Richer-de-Forges Anne C., Arrouays Dominique, Chen Songchao, Román Dobarco Mercedes, Libohova Zamir, Roudier Pierre, Minasny Budiman, et Bourennane Hocine, 2022. Hand-Feel Soil Texture and Particle-Size Distribution in Central France. Relationships and Implications. *CATENA* 213:106155. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106155.

Rinino Léa, 2021a. Convenance des terres pour la construction en terre crue : vers une simplification des tests par le prisme de l'approche sensorielle des maçons terre. *Rapport de PFE*. Université Gustave Eiffel.

Rinino Léa, 2021b. Tests sensoriels pour la construction en terre crue : interview de 5 praticiens. *Annexes au rapport de PFE*. Université Gustave Eiffel.

Robinson D. A., Thomas A., Reinsch S., Lebron I., Feeney C. J., Maskell L. C., Wood C. M., Seaton F. M., Emmett B. A., et Cosby B. J., 2022. Analytical Modelling of Soil Porosity and Bulk Density across the Soil Organic Matter and Land-Use Continuum. *Scientific Reports* 12(1):7085. https://doi.org/10.1038/s41598-022-11099-7.

Rojat Fabrice, Hamard Erwan, Fabbri Antonin, Carnus Bernard, et McGregor Fionn, 2020. Towards an Easy Decision Tool to Assess Soil Suitability for Earth Building. *Construction and Building Materials* 257:119544. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119544.

Rollot Mathias, 2024. Décoloniser l'architecture. Paris: Passager clandestin.

Romankiewicz Tanja, Russell Ben, Bailey Geoff, Gardner Tom, Snyder James R., et Beckett Christopher T. S., 2022. 'Another Wall of Turf'. *Proceedings of the Society of Antiquaries of Scotland* 151:103-41. https://doi.org/10.9750/PSAS.151.1353.

Rosa Hartmut, 2012. Aliénation et accélération. Vers une théorie critique de la modernité tardive. La Découverte.

Russell B., Romankiewicz T., Gardner T., Birley A., Snyder J. R., et Beckett C. T. S., 2022. Building with turf at Roman Vindolanda: multi-scalar analysis of earthen materials, construction techniques, and landscape context. *Archaeological Journal* 179(1):169-210. https://doi.org/10.1080/00665983.2021.1949148.

Sabbà Maria Francesca, Tesoro Mariateresa, Falcicchio Cecilia, et Foti Dora, 2021. Rammed Earth with Straw Fibers and Earth Mortar: Mix Design and Mechanical Characteristics Determination. *Fibers* 9(5):30. https://doi.org/10.3390/fib9050030.

Sabbah Amel, Desquesnes Naiké, Brier Mathieu, et Brier Amel Sabbah · Naiké Desquesnes · Mathieu, 2024. Casser leurs machines, fabriquer les nôtres. *Terrestres*, septembre 5. https://www.terrestres.org/2024/09/05/casser-leurs-machines-fabriquer-les-notres/.

Salley Shawn W., Herrick Jeffrey E., Holmes Caitlin V., Karl Jason W., Levi Matthew R., McCord Sarah E., Waal Cornelis van der, et Zee Justin W. Van, 2018. A Comparison of Soil Texture-by-Feel Estimates: Implications for the Citizen Soil Scientist. *Soil Science Society of America Journal* 82(6):1526-37. https://doi.org/10.2136/sssaj2018.04.0137.

Sangma Sangketa, et Tripura Deb Dulal, 2020. Experimental Study on Shrinkage Behaviour of Earth Walling Materials with Fibers and Stabilizer for Cob Building. *Construction and Building Materials* 256:119449. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119449.

Scheel M., Seemann R., Brinkmann M., Michiel M. Di, Sheppard A., et Herminghaus S., 2008. Liquid Distribution and Cohesion in Wet Granular Assemblies beyond the Capillary Bridge Regime. *Journal of Physics: Condensed Matter* 20(49):494236. https://doi.org/10.1088/0953-8984/20/49/494236.

Schöpfel Joachim, 2015. Comprendre la littérature grise. *I2D - Information, données & documents* 52(1):30-32. https://doi.org/10.3917/i2d.151.0030.

Schroeder Horst, 2016. Sustainable Building with Earth. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19491-2.

Sébastien Léa, 2018. Les grands projets inutiles et imposés, nouveaux champs de l'action politique. mai 21. https://theconversation.com/les-grands-projets-inutiles-et-imposes-nouveaux-champs-de-laction-politique-96142.

Sennett Richard, 2009. Ce que sait la main: la culture de l'artisanat. Paris: A. Michel.

Serlet Murielle, Moevus, Mariette, Couvreur, Lucile, Cloquet, Basile, Fontaine, Laetitia, Anger, Romain, et Doat, Patrice, 2016. Béton d'Argile Environnemental : résultats d'un programme de recherche tourné vers l'application. https://craterre.hypotheses.org/1056.

Service de l'Inventaire du patrimoine culturel de Bretagne, 2023. L'inventaire du patrimoine culturel en Bretagne. https://patrimoine.region-bretagne.fr/.

Service du Patrimoine de Bretagne, 2004. Maison, Cainguen (Trévé) - Inventaire Général du Patrimoine Culturel. https://patrimoine.bzh/gertrude-diffusion/dossier/84fd46bd-7b2c-411c-a603-bcf8a1bee1be.

Sharma Binu, et Bora Padma, 2003. Plastic Limit, Liquid Limit and Undrained Shear Strength of Soil—Reappraisal. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering - J GEOTECH GEOENVIRON ENG* 129. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:8(774).

Silva Rui A., Oliveira Daniel V., Miranda Tiago, Cristelo Nuno, Escobar Maria C., et Soares Edgar, 2013. Rammed earth construction with granitic residual soils: The case study of northern Portugal. *Construction and Building Materials* 47:181-91. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.047.

Simon Jean-Paul, et Soulié Denis, 1991. L'architecture paysanne en Périgord et sa restauration. Périgueux: P. Fanlac.

Smith Edward W, et Austin George S, 1989. Adobe, Pressed-Earth, and Rammed Earth Industries in New Mexico. 127. Socorro: New Mexico Bureau of Mines & Mineral Resources. https://geoinfo.nmt.edu/publications/monographs/bulletins/downloads/127/Bulletin127.pdf.

Soudani Lucile, Fabbri Antonin, Morel Jean-Claude, Woloszyn Monika, Chabriac Pierre-Antoine, Wong Henry, et Grillet Anne-Cécile, 2016. Assessment of the Validity of Some Common Assumptions in Hygrothermal Modeling of Earth Based Materials. *Energy and Buildings* 116:498-511. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.01.025.

Sridharan A., Rao Sudhakar, et Murthy N. S., 1988. Liquid Limit of Kaolinitic Soils. *Géotechnique* (38):191-98. https://www.researchgate.net/publication/237901354_Liquid_limit_of_kaolinitic_soils.

Sun Xiaohao, Miao Linchang, Wang Hengxing, Chen Runfa, et Wu Linyu, 2022. Bio-Cementation for the Mitigation of Surface Erosion in Loess Slopes Based on Simulation Experiment. *Journal of Soils and Sediments* 22(6):1804-18. https://doi.org/10.1007/s11368-022-03190-3.

Tanguy Audrey, Carrière Lisa, et Laforest Valérie, 2023. Low-tech approaches for sustainability: key principles from the literature and practice. *Sustainability: Science, Practice and Policy* 19(1):2170143. https://doi.org/10.1080/15487733.2023.2170143.

Terres Chercheuses, 2024. Terre : certains l'aiment crue. *L'âge de faire*, novembre 21. https://lagedefaire-lejournal.fr/terre-crue/.

Thompson Edward Palmer, 2019. Temps, discipline du travail et capitalisme industriel. Paris: La Fabrique.

Tinsley J., et Pavía S., 2019. Thermal performance and fitness of glacial till for rammed earth construction. *Journal of Building Engineering* 24:100727. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.02.019.

Torrance J. Kenneth, et Pirnat Maria, 1984. Effect of pH on the Rheology of Marine Clay from the Site of the South Nation River, Canada, Landslide of 1971. *Clays and Clay Minerals* 32(5):384-90. https://doi.org/10.1346/CCMN.1984.0320506.

Turk Judith K., et Young Rebecca A., 2022. A novel approach for teaching soil texture estimation: Replacing standard protocols with directed self-calibration. *Journal of Geoscience Education* 70(1):40-55. https://doi.org/10.1080/10899995.2021.1891402.

UNEP et YCEA, 2023. Building Materials and the Climate: Constructing a New Future. United Nations Environment Programme. https://wedocs.unep.org/xmlui/handle/20.500.11822/43293.

Van Damme Henri, 2012. La terre, un béton d'argile. *Pour la Science* (N° 423). https://www.pourlascience.fr/sd/materiaux/la-terre-un-beton-dargile-7098.php.

Venkatarama Reddy B. V., et Prasanna Kumar P., 2010. Embodied energy in cement stabilised rammed earth walls. *Energy and Buildings* 42(3):380-85. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.10.005.

Ventura Anne, Ouellet-Plamondon Claudiane, Rock Martin, Hecht Torben, Roy Vincent, Higuera Paula, Lecompte Thibaut, Faria Paulina, Hamard Erwan, Morel Jean-Claude, et Habert Guillaume, 2022. Environmental Potential of Earth-Based Building Materials: Key Facts and Issues from a Life Cycle Assessment Perspective. P. 261-96 in *Testing and Characterisation of Earth-based Building Materials and Elements*, *RILEM State-of-the-Art Reports*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-83297-1_8.

Vérité Jacques, 1984. Le matériau terre : réalités et utopies. Thèse de doctorat, Université de Paris 8. https://hal.science/tel-01996245.

Verron-Guillemot Loris, 2021. Availability of earth for light earth building: modelling using spatialized pedological data in Brittany [dataset]. https://doi.org/10.25578/MIQNZ2.

Verron-Guillemot Loris, 2025. Algorithms for statistical analysis of raw earth built heritage : spatial cross-referencing of data describing buildings with pedological data [dataset]. https://doi.org/10.57745/G71RU6.

Verron-Guillemot Loris, Hamard Erwan, Cazacliu Bogdan, Razakamanantsoa Andry, Duc Myriam, Vinceslas Théo, Hellouin de Menibus Arthur, Lemercier Blandine, Ansaa-Asare Rhoda Julia, et Lecompte Thibaut, 2022. Estimating and Mapping the Availability of Earth Resource for Light Earth Building Using a Soil Geodatabase in Brittany (France). *Resources, Conservation and Recycling* 184:106409. https://hal.science/hal-03763396.

Villain Victor, 2020. Sociologie du champ de la construction en terre crue en France (1970-2020). Thèse de doctorat, Université de Lyon. https://hal.science/tel-03115679.

Vincent Sébastien, Lemercier Blandine, Berthier Lionel, et Walter Christian, 2018. Spatial Disaggregation of Complex Soil Map Units at the Regional Scale Based on Soil-Landscape Relationships. *Geoderma* 311:130-42. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.06.006.

Vinceslas Théo, 2019. Caractérisation d'éco-matériaux terre-chanvre en prenant en compte la variabilité des ressources disponibles localement. Thèse de doctorat, Université Gustave Eiffel. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02569445.

Vinceslas Théo, Lecompte Thibaut, Hamard Erwan, Hellouin de Ménibus A., Lenormand Hélène, et Colinart Thibaut, 2020. Methods to Evaluate Earth Slip Cohesion to Build with Light Earth. *Construction and Building Materials* 238:117665. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117665.

Volhard Franz, et Reisenberger Julian, 2016. Light earth building: a handbook for building with wood and earth. Birkhäuser. https://doi.org/10.1515/9783035606454.

Vos Cora, Don Axel, Prietz Roland, Heidkamp Arne, et Freibauer Annette, 2016. Field-Based Soil-Texture Estimates Could Replace Laboratory Analysis. *Geoderma* 267:215-19. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.12.022.

Walker Bruce, McGregor Christopher, et Stark Gregor, 2006. Scottish Turf Construction. Edinburgh: Historic Scotland.

Weil Ray R., et Brady Nyle C., 2016. The Nature and Properties of Soils, Global Edition. Pearson Education. https://www.dawsonera.com/abstract/9781292162249.

Wolfskill Lyle A., Dunlap Wayne A., et Gallaway Bob M., 1970. Handbook For Building Homes of Earth. Bullein No. 21. Texas Transportation Institute.

Xu Longfei, Wong Henry, Fabbri Antonin, Champiré Florian, et Branque Denis, 2021. A Unified Compaction Curve for Raw Earth Material Based on Both Static and Dynamic Compaction Tests. *Materials and Structures* 54(1):5. https://doi.org/10.1617/s11527-020-01595-5.

Zeng Ling-Ling, Hong Zhen-Shun, Wang Chao, et Yang Zhen-Zhen, 2016. Experimental Study on Physical Properties of Clays with Organic Matter Soluble and Insoluble in Water. *Applied Clay Science* 132-133:660-67. https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.08.018.

Zhemchuzhnikov Alexandr, Ghavami Khosrow, et Dal Toé Casagrande Michéle, 2015. Static Compaction of Soils with Varying Clay Content. *Key Engineering Materials* 668:238-46. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.668.238.

Liste des annexes

Les algorithmes produits pour les travaux statistiques et cartographiques sont disponibles en ligne :

- croisement spatial de données patrimoniales et pédologiques (chapitres 3A et 3B) : (Verron-Guillemot 2025) ;

- évaluations de la disponibilité de la ressource à partir de seuils sur les propriétés pédologiques (Chapitre 4) : (Verron-Guillemot 2021)

L'enregistrement vidéo de la soutenance de thèse est disponible en ligne à l'adresse suivante : https://clap.univ-eiffel.fr/

Annexe I (142p): Enquête bibliographique : propriétés « intrinsèques » des matrices de terre crue.

Annexe II (18p): BDD terre crue V0.2 : base de données dédiée au patrimoine bâti en terre crue

Annexe III (4p): Croisements de données patrimoine/sol : résultats pour la bauge, en Limagne et Champagne-Ardenne

Annexe IV (1p): test du gant

Annexe V (1p): Estimation de la masse de terre nécessaire à l'isolation en terre allégée de tous les logements du territoire breton