

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, 2024. Français. ⟨NNT : 2023NANU4089⟩. ⟨tel-05039264v1⟩

HAL Id: tel-05039264

https://theses.hal.science/tel-05039264v1

Submitted on 18 Apr 2025 (v1), last revised 8 Apr 2026 (v3)

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 SCIENCES
DOCTORAL DE L'INGENIERIE
PAYS DE LA LOIRE 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

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 présentée et soutenue à Bouguenais, le 03/07/2024
Unité de recherche : Université Gustave Eiffel, laboratoire de matériaux et Structures (MAST), Granulats e 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 :
Attention, en cas d'absence d'un des membres du Jury le jour de la soutenance, la composition du jury doit être revue pour s'assurer qu'elle est conforme et devra être répercutée sur la couverture de thèse

Président :		
Examinateurs :	Myriam DUC	Université Gustave Eiffel - CFR / GERS
	Stéphanie BONNET	IUT de Saint-Nazaire - GeM UMR CNRS 6183
	RAZAKAMANANTSOA Andry	Université Gustave Eiffel - CFR / GERS
Dir. de thèse :	Erwan HAMARD	Université Gustave Eiffel – MAST / GPEM

Invité(s)
Samuel Dugelay artisan

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

Mots clés : Terre crue, sol, convenance, ressource, SIG, philosophie des techniques

Résumé : Le monopole des matériaux de construction industriels pose question quant à ses impacts négatifs sur les société des humain.es et sur l'environnement. En réponse, les techniques constructives vernaculaires employant des matériaux peu transformés comme la terre crue sont en plein redéploiement. Deux « freins » au déploiement équilibré de la filière terre crue sont examinés : la disponibilité des ressources locales et les potentiels techniques de chacune des techniques de construction relativement aux sols locaux.
La composition et les propriétés de la terres sont souvent employées pour évaluer leur adéquation à certains techniques de construction en terre crue. Pourtant, plusieurs études montrent l'inadéquation entre les standards existants et les terres employées dans la construction vernaculaire.
Nous chercherons à qualifier la diversité des propriétés intrinsèques de la « ressource terre ». L'impact de ces propriétés sur l'ouvrabilité de la terre dans les procédés de mise en œuvre sera étudié, ainsi que sur les propriétés d'usage des matériaux (mécanique, thermique, etc.). Nous chercherons ainsi à visibiliser les compromis auxquels doivent faire face les constructeur.ices dans leurs pratiques et ce qui guide leurs choix techniques sur les chantiers.
Les bâtiments vernaculaires construits en terre crue avant l'avènement des matériaux industriels garantissent un cadre de construction peu gourmand en ressources non renouvelables, employant des matériaux locaux et compatibles avec les cultures locales d'alors. Par la collecte et le croisement de données de localisation du patrimoine bâti en terre crue avec des données pédologiques, nous chercherons à évaluer l'impact des propriétés de la terre sur les choix techniques de l'époque. Diverses bases de données et méthodes de croisement seront testées afin d'améliorer et d'évaluer la méthode.

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

Keywords : earth building, soil, suitability, resource, GIS

Abstract : The monopoly of industrial building materials raises questions about their negative impact on human society and the environment. In response, vernacular building techniques using minimally processed materials such as raw earth are being redeployed. Two "barriers" on the balanced deployment of the raw earth sector are examined: the availability of local resources and the technical potential of each construction technique in relation to local soils.
Soil composition and properties are often used to assess their suitability for certain raw earth construction techniques. However, several studies show the mismatch between existing standards and the soils used in vernacular construction.
Our aim is to qualify the diversity of intrinsic properties of the "earth resource".
The impact of these properties on the workability of earth in construction processes will be studied, as well as on the materials' properties of use (mechanical, thermal, etc.).
In this way, we will seek to highlight the compromises faced by builders in their practices, and what guides their technical choices on building sites.
Vernacular buildings constructed in unbaked earth before the advent of industrial materials ensured a construction framework that consumed few non-renewable resources, employed local materials and was compatible with the local cultures of the time. By collecting and cross-referencing data on the location of mud-built heritage with pedological data, we aim to assess the impact of the earth's properties on the technical choices made at the time. Various databases and cross-referen[illegible]thods will be tested in order to improve method.

Résumé

Le monopole des matériaux de construction industriels pose question quant à ses impacts négatifs sur les société des humain.es et sur l'environnement. Les techniques constructives vernaculaires employant des matériaux peu transformés, par exemple du bois, de la terre ou des fibres végétales, émergent ou ré-émergent dans les pays industrialisés à mesure que la prise de conscience de ces externalités négatives gagne du terrain. Parmi ces techniques, celles employant la terre crue sont en plein redéploiement. Au premier quart du 21ème siècle, on peut dire qu'elles ont largement dépassé le stade d'« expérimentations » car elles montrent avec succès les bénéfices de leur emploi. Elles représentent ainsi des alternatives sérieuses aux techniques employant des matériaux industriels.
La voie de réduction de l'emploi des techniques industrielles conventionnelles passant par le déploiement des techniques vernaculaires de terre crue est encombrée de divers freins d'ordre technique, économiques et sociologiques (Pelé-Peltier et al. 2023). Dans ce travail de thèse, nous proposons d'analyser deux de ces freins : la disponibilité des ressources locales et la « compétitivité économique » des procédés.

Le redéploiement des techniques de terre crue à faible impact sur l'environnement et la société suppose l'emploi de terres extraites et transformées localement. Or, toutes les terres ne sont pas favorables à toutes les techniques de mise en œuvre de la terre crue. Ainsi, selon les ressources à disposition localement, certaines techniques pourraient être plus ou moins adaptées que d'autres voir impossibles à mettre en œuvre. Cette incertitude sur la *convenance* des terres locales peut être considérée comme un frein à la promotion des techniques de terre crue, s'ajoutant à une longue liste de présupposés freinant leur adoption ou ré-adoption. A l'inverse, une meilleure compréhension des liens entre propriétés des terres et potentiels techniques pourrait rassurer sur leurs potentiels de redéploiement locaux et globaux. Quels procédés sont adaptés aux terres disponibles sur le territoire de la France hexagonale ? Peut-on construire en terre crue dans les territoires où le patrimoine bâti vernaculaire n'emploie pas ce matériau ? L'impact des propriétés de la terre sur les choix techniques est il significatif face à celui du reste du contexte sociétal (social et environnemental) ?

1 – Introduction : impacts sociaux et environnementaux de la construction industrielle, besoins de logements, et potentiels de réponse des matériaux vernaculaires
Nous introduirons l'analyse par une synthèse des destructions environnementales et sociales engendrées dans les cycles de vie des matériaux industriels. Nous questionnerons également les besoins de logement réels en France hexagonale, afin de clarifier 1) les besoins de productivité qu'ils représentent dans les techniques de construction neuve ou de rénovation de l'existant, et 2) les potentiels de production que pourraient permettre des matériaux dits « naturels » dans ces contextes.

2- Propriétés des mélanges composés de terre crue : de la composition aux ouvrabilités
La composition et les propriétés de la terres sont souvent employées pour évaluer leur adéquation à certains techniques de construction en terre crue. Pourtant, plusieurs études montrent l'inadéquation entre les standards existants et les terres employées dans la construction vernaculaire. En effet, il semble que des seuils simples appliqués à des propriétés simples de la terre ne soient pas en mesure d'appréhender la variabilité des choix techniques.
Nous chercherons à qualifier la diversité des propriétés intrinsèques de la « ressource terre ». L'impact de ces propriétés sur l'ouvrabilité de la terre dans les procédés de mise en œuvre sera étudié, ainsi que sur les propriétés d'usage des matériaux (mécanique, thermique, etc.). Nous chercherons ainsi à visibiliser les compromis auxquels doivent faire face les constructeur.ices dans leurs pratiques et ce qui guide leurs choix techniques sur les chantiers.

3- Choix techniques vernaculaires pré-industriels : statistiques cartographiques

Les bâtiments vernaculaires construits en terre crue avant l’avènement des matériaux industriels garantissent un cadre de construction peu gourmand en ressources non renouvelables, employant des matériaux locaux et compatibles avec les cultures locales d’alors. Par la collecte et le croisement de données de localisation du patrimoine bâti en terre crue avec des données pédologiques, nous chercherons à évaluer l’impact des propriétés de la terre sur les choix techniques de l’époque. Diverses bases de données et méthodes de croisement sont testées afin d’améliorer et d’évaluer la méthode. Les résultats montrent une faible corrélation entre sols et choix techniques, ce qui peut indiquer la dominance du reste du contexte constructif sur les choix effectifs des populations pré-industrielles. Par ailleurs, les techniques-type de terre crue ne sont pas toute impactées de la même manière par les propriétés pédologiques.

Table des matières

Avant-propos..... .12
1.1 Situation particulière et objectifs de travail..... .12
1.1.1 Un récit autour de ce projet de thèse..... .12
1.1.2 Engagement de recherche, dépendance choisie à la société..... .13
1.1.3 Savoirs situés..... .17
1.1.3.1 Objectivité..... .17
1.1.3.2 Visibilisation..... .17
1.1.3.3 Impartialité..... .18
1.1.3.4 Génie civil ?..... .19
1.1.3.5 Positionnements..... .19
Introduction..... .20
1.2 Contexte global : climat et inégalités..... .20
1.2.1 Problématique environnementale..... .20
1.2.1.1 Un consensus sur l'urgence..... .20
1.2.1.2 Des procédés centraux : la dispersion des matières fossiles..... .23
1.2.1.3 L'énergie comme capacité de destruction..... .24
1.2.2 Inégalités..... .25
1.2.3 interaction inégalités destruction environnement..... .25
1.2.4 Origines globales de ces problématiques..... .26
1.2.4.1 Division mondiale du travail et marché économique..... .26
1.2.4.2 Travail invisible et dominations non-économiques..... .27
1.2.4.3 Induire la dépendance : la perte d'autonomie..... .28
1.2.4.4 Libération du travail et optimisme technologique : le Progrès..... .29
1.2.4.5 L'industrie sociétalement contre-productive..... .31
1.2.4.6 Planification écologique et retour d'un « socialisme d'état » ou décentralisation et réappropriation de la subsistance ?..... .31
1.3 Contexte du logement..... .33
1.3.1 « Environnement »..... .33
1.3.1.1.1 Energie grise, énergie en vie de service et émissions associées..... .33
1.3.1.1.2 Détail énergie vie de service..... .33
1.3.1.1.3 Détail énergie grise..... .34
1.3.1.1.3.1 béton : ciment, acier, granulats..... .34
1.3.1.1.3.2 Briques cuites et verre..... .36
1.3.1.1.3.3 Isolants thermiques et hydriques : Plastiques et laines minérales..... .36
1.3.1.1.4 Extractivisme..... .39
1.3.1.1.5 Déchets..... .41
1.3.1.1.5.1 Origine des déchets..... .41
1.3.1.1.5.2 quantité et types de déchets..... .41
1.3.1.1.5.3 le flux métabolique considérable..... .43
1.3.1.1.6 [a rédiger] Terres d'excavation..... .43
1.3.1.1.7 Artificialisation irréversible des écosystèmes..... .44
1.3.1.1.8 Le terrassement du vivant..... .46
1.3.2 « société »..... .47
1.3.2.1 Accès au logement..... .47
1.3.2.1.1 Besoins quantitatifs: personnes sans logements et mal logées..... .47
1.3.2.1.2 Qualité des logements : insalubrité, précarité énergétique, impacts sanitaires des matériaux..... .49
1.3.2.1.3 Matériaux toxiques dans les logements..... .50
1.3.2.1.4 Quelles priorités pour le mal logement ?..... .51

1.3.2.2 Fabrication des logements : inégalités et violences dans la construction conventionnelles en France..... .52
1.4 Conclusion constat.....53
Chapitre 1 : La « convenance des terres » dans la littérature académique..... .54
1. Un consensus sur l'inadaptation des références communément employées.....54
1. Comparaison des propriétés de matériaux vernaculaires aux recommandations.....54
2. Un début de consensus sur l'inadéquation des références courantes.....60
3. Une problématique qui dépasse le champ académique.....60
2. Voies de réponses existantes..... .62
1. Modifier les seuils.....63
2. Apporter de nouvelles variables compositionnelles.....65
3. Proposer des modèles complexes basées sur les propriétés compositionnelles.....66
3. Questionner les *propriétés cibles* et le *déterminisme environnemental*.....67
1. Redéfinir les *propriétés cibles* dans le lien terre-technique?..... .68
2. Questionner le déterminisme de la « convenance des terres » sur le choix technique.....70
4. Conclusions et hypothèses de travail..... .71
Chapitre 2 : Propriétés de la matière..... .74
2 Le sol, la terre..... .74
2.1 Variabilité spatiale et temporelle.....74
2.1.1 Le temps : la pédogenèse..... .75
2.1.2 L'espace : organisation multi-échelles..... .78
2.2 Le sol, un objet de recherche interdisciplinaire..... .80
2.3 Terminologie dans ce travail de thèse.....82
3 Propriétés compositionnelle: propriétés indépendantes du remaniement.....82
3.1 Fluides.....83
3.1.1 Air.....83
3.1.2 Eau..... .83
3.1.2.1 Tension superficielle et pression partielle..... .83
3.1.2.2 Réactivité : équilibre acido-basique..... .83
3.1.2.2.1 Mécanismes..... .83
3.1.2.2.2 Mesure et estimations..... .86
3.1.2.2.2.1 Mesure.....86
3.1.2.2.2.2 Estimations par fonctions de pédotransfert.....86
3.1.2.2.2.3 Bases de données pédologiques..... .86
3.1.2.3 Ions en solution et adsorbés.....86
3.1.2.3.1 Mécanismes..... .86
3.1.2.3.2 Propriétés gouvernantes.....87
3.1.2.3.3 Mesures et estimations.....87
3.1.2.3.3.1 Mesure.....87
3.1.2.3.3.2 Estimations.....87
3.1.2.3.3.3 Bases de données pédologiques..... .87
3.2 Solides.....87
3.2.1 Éléments solides non colloïdaux.....89
3.2.1.1 Granulométrie.....89
3.2.1.1.1 Minéraux argileux et fraction granulométrique « argiles »..... .91
3.2.1.1.2 Granulat ou agrégat ?.....91
3.2.1.1.3 Représentation..... .92
3.2.1.1.4 Mesure, estimations, représentations.....93
3.2.1.1.4.1 Mesure.....93
3.2.1.1.4.2 Estimations.....93
3.2.1.2 Elancement, rugosité..... .94
3.2.1.2.1 Description.....94

3.2.1.2.2 Mesure et estimations..... .95
3.2.2 Solides colloïdaux et chargés électroniquement..... .95
3.2.2.1 Minéraux argileux..... .96
3.2.2.1.1 Composition minéralogique..... .96
3.2.2.1.1.1 Formation.....96
3.2.2.1.1.2 Description.....97
3.2.2.1.1.3 Mesures et estimations.....100
3.2.2.1.2 Propriétés des minéraux argileux.....101
3.2.2.1.2.1 Charges électroniques accessibles..... .101
3.2.2.1.2.2 Retrait-gonflement élémentaire..... .102
3.2.2.1.2.3 Mesure et estimation.....103
3.2.2.2 Matières Organiques.....104
3.2.2.2.1 Formation.....104
3.2.2.2.2 Propriétés.....105
3.2.2.2.3 Mesure et estimations..... .106
4 Propriétés statiques : composition et organisation d'un mélange composé de terre crue.....107
4.1 Quantités relatives des phases du sol.....107
4.1.1 Volumes relatifs des fluides et des solides : proposition d'un diagramme ternaire volumique des phases.....107
4.2 Teneur en solides : compacité.....109
4.2.1 Compacité, porosité totale et densité..... .109
4.2.2 Empilement granulaire et compacité théorique maximale.....109
4.2.3 Mesures et estimations..... .110
4.2.3.1 Mesures.....110
4.2.3.2 Estimations..... .110
4.2.3.2.1 Densité et densité sèche.....110
4.2.3.2.2 A partir de la granulométrie : Coefficients d'uniformité, de courbure et distributions de Fuller..... .111
4.2.3.2.3 A partir de la granulométrie et la compacité propre des classes granulométrique.....112
4.3 Organisation des solides : homogénéité.....112
4.3.1 Une question d'échelle.....113
4.3.2 Homogénéité de répartition : Agrégation et porosité..... .113
4.3.2.1 Description..... .113
4.3.2.2 Impact de la teneur en eau.....115
4.3.3 Hétérogénéité orientée: isotropie..... .116
4.4 Teneur en eau de la porosité : fraction saturée.....116
4.4.1.1 Mesure..... .118
4.5 Organisation des fluides.....119
5 Propriétés dynamiques : composition des forces au sein des mélanges de terre crue.....119
5.1 Friction.....119
5.1.1 Taille, forme et arrangement des éléments solides.....119
5.1.2 Eau..... .120
5.1.3 Angle.....120
5.1.4 Impacts sur les propriétés mécaniques.....121
5.2 Tension superficielle, capillarité et succion.....121
5.2.1 Mécanismes.....121
5.2.1.1 La tension superficielle..... .121
5.2.1.2 Capillarité et succion.....122
5.2.1.3 Cohésion capillaire des solides.....123
5.2.1.4 influence de la teneur en eau.....125
5.2.1.5 Influence de la compacité.....125

5.2.1.6 Influence de la granulométrie....126
5.2.1.7 Influence de l'organisation des solides: homogénéité....128
5.2.1.8 Cohésion capillaire dynamique ?....128
5.2.1.9 Mesures et estimations....128
5.2.1.9.1 Surface spécifique....128
5.2.1.10 Minéralogie des argiles....128
5.2.1.11 Propriétés impactées....129
5.3 Cohésion électrostatique....129
5.3.1 Mécanismes....129
5.3.2 Influence des paramètres du mélange....130
5.3.2.1 Saturation....130
5.3.2.2 Colloïdes et organisation de la matrice....130
5.3.2.3 pH....131
5.3.3 Mesure et estimation....131
5.3.3.1 Mesure....131
5.3.3.2 Estimations....132
5.4 Cimentation....132
5.4.1 Mécanismes....132
5.4.2 Influence des conditions physico-chimiques....134
5.4.3 Influence de la composition des solides....134
5.4.4 Impact sur les autres propriétés....136
5.4.5 Mesure....137
5.4.5.1 Estimations....138
5.5 Cohésion apparente....138
5.5.1 influence de la saturation en eau : teneur et variation....138
5.5.2 composition des solides....139
5.5.3 Influence du remaniement, de l'homogénéité et de la compacité....140
6 Propriétés dynamiques : réponse aux contraintes....141
6.1 Résistances mécaniques....141
6.1.1 Contraintes et réponses-types....141
6.1.1.1 Réponses types : élastique, ductile, cassant....141
6.1.1.2 Plans de rupture, dimensions des éléments et confinement....142
6.1.1.3 Forme de la contrainte : direction....143
6.1.1.4 Forme de la contrainte : pression et énergie....145
6.1.1.5 Résistances....146
6.1.2 Résistance en cisaillement....148
6.1.2.1 Direction de contrainte : friction et cohésion....148
6.1.2.2 L'impact de la teneur en eau à l'état insaturé et fonction de la saturation de la porosité....149
6.1.2.3 L'impact de la teneur en eau à l'état saturé est fonction de la compacité....150
6.1.2.4 La transition saturé-insaturé....152
6.1.2.5 Compacité....152
6.1.2.6 Homogénéité/agrégation....153
6.1.2.7 Limite saturation/désaturation et limite de comportement ductile/cassant....154
6.1.2.8 Composition....157
6.1.2.8.1 Teneur en éléments fins et cohésifs : minéraux argileux....158
6.1.2.8.2 Taille et forme des granulats....160
6.1.2.8.3 Cimentation....161
6.1.2.9 Importance dans les procédés de terre crue....162
6.1.2.10 Résistance en cisaillement : conclusions....162
6.1.3 Fermeté....165
6.1.3.1 Etat saturé....165

6.1.3.2 Etat insaturé.....167
6.1.3.3 Composition.....169
6.1.3.4 La fermeté dans les procédés de terre crue.....170
6.1.3.5 Mesure de la fermeté.....170
6.1.4 Résistances mécaniques : conclusions.....171
6.2 Variations-type des propriétés selon les contraintes mécaniques et de séchage: volumes, compositions, homogénéité.....172
6.2.1 Ressuyage et séchage, avec et sans retrait.....172
6.2.1.1 Généralités sur le séchage d'éléments composés de terre crue.....172
6.2.1.1.1 Mécanismes.....172
6.2.1.1.2 Composition.....173
6.2.1.1.3 Impact sur les propriétés terre crue.....173
6.2.1.2 Retrait-gonflement.....173
6.2.1.2.1 Du retrait élémentaire au retrait matriciel et macroscopique.....173
6.2.1.2.2 Liberté du retrait dans les trois dimensions, taille et forme des éléments.....174
6.2.1.2.3 Teneur en eau.....175
6.2.1.2.4 Composition.....175
6.2.1.2.5 Impact sur les propriétés terre crue.....178
6.2.1.2.6 Mesure.....182
6.2.2 Compaction.....182
6.2.2.1 Compaction, consolidation : description et définitions.....182
6.2.2.2 Compaction statique, compaction dynamique.....183
6.2.2.3 Impact de la teneur en eau : optimums de compaction.....184
6.2.2.4 Compacité maximale, compactabilité.....187
6.2.2.5 Compromis compaction mécanique – compaction par retrait au séchage.....187
6.2.2.6 Compromis compacité/succion de l'élément frais.....191
6.2.2.7 Compaction spontanée : tassement.....192
6.2.2.8 Impact de la composition sur la compaction et la compactabilité.....192
6.2.2.8.1 Granulométrie et empilement granulaire.....192
6.2.2.8.2 Matières organiques.....195
6.2.2.8.3 Rugosité.....195
6.2.2.8.4 Compactabilité : perméabilité et consolidation.....196
6.2.2.9 Conclusion compaction.....196
6.2.3 Déformation et homogénéisation/ségrégation.....197
6.2.3.1 Mécanismes.....197
6.2.3.2 Déformation spontanée : affaissement.....197
6.2.3.3 Impact des déformations sur l'homogénéité.....198
6.2.3.4 Homogénéisation dans les procédés de terre crue.....199
6.2.3.5 Ségrégation spontanée par gravité : la sédimentation.....200
6.2.3.5.1 Ségrégation.....201
6.2.4 Variations spontanées et zones d'instabilité.....201
7 Ouvrabilité : les propriétés des mélanges au cœur des choix techniques.....204
7.1 Ouvrabilité, ouvrabilités.....204
7.2 Les ouvrabilités, optimums multivariés.....206
7.3 L'ouvrabilité à chaque étape, conjuguée dans les procédés.....207
7.4 Pertinence sociétale des choix techniques : vers une ouvrabilité holistique ?.....208
7.5 Modéliser les ouvrabilités.....209
8 Conclusions.....210
8.1 Relier les propriétés des matériaux à leur composition.....210
8.2 Une conception continue et interdisciplinaire des comportements des mélanges de terre…213
8.3 Une conception volumique des interactions de phases.....213
8.4 De la modélisation à la complexification.....214

8.5 Vers une conception holistique de l’étude des choix techniques..... .214
Partie 2 : Evaluation des relations entre terre et choix techniques à partir du patrimoine bâti en terre et de bases de données pédologiques.....216
9 Méthode et Données..... .216
9.1 Étudier le patrimoine vernaculaire.....216
9.2 Historique académique de la méthode..... .218
9.2.1 Royaume-Uni : Ford et al. (1999, 2002, 2005)..... .218
9.2.2 Péninsule Ibérique : Mileto, Hueto-Escobar et al. (2019, 2022).....221
9.2.3 France : Hamard et al. (2017, 2018)..... .228
9.2.4 Conclusion..... .232
9.3 Théorie : choix technique et propriétés pédologiques en période pré-industrielle.....232
9.3.1 Objectifs..... .233
9.3.2 Aléas, biais et propriétés du contexte constructif.....234
9.3.3 L’installation préférentielle..... .235
9.3.3.1 Description..... .235
9.3.3.2 Biais et aléas dans la relation sol-technique..... .236
9.3.3.3 Variables permettant la réduction des aléas et biais..... .236
9.3.4 L’écosystème matériel : impact du climat, de la géographie, des ressources en terre, pierre, bois, fibres, eau, et systèmes techniques pour le chantier.....237
9.3.4.1 Géographie et climat..... .238
9.3.4.1.1 aléas et biais.....238
9.3.4.2 Terre.....239
9.3.4.2.1 Biais et aléa.....239
9.3.4.3 Bois.....240
9.3.4.3.1 aléas et biais.....240
9.3.4.4 Fibres..... .241
9.3.4.5 Eau.....242
9.3.4.6 Pierre..... .242
9.3.4.6.1 Aléas et biais.....243
9.3.4.7 Ressources énergétiques et systèmes de transports.....244
9.3.4.7.1 Impact sur les techniques de pierre, terre cuite, chaux, ciment..... .244
9.3.4.7.2 Relations avec la terre : distance de transport..... .245
9.3.4.7.3 Relations avec la terre : matériaux secondaires.....246
9.3.4.7.4 Biais et aléas..... .247
9.3.4.8 Conclusion matériaux et matériels..... .248
9.3.5 Cultures constructives..... .248
9.3.5.1 Diffusion.....249
9.3.5.1.1 Aléas et biais.....250
9.3.5.2 Coutumes et rythmes saisonniers de subsistance..... .250
9.3.5.2.1 Aléa biais..... .251
9.3.5.3 Performances techniques d’usage..... .251
9.3.5.3.1 Contraintes mécaniques.....251
9.3.5.3.2 Contraintes de modularité.....252
9.3.5.4 Performances techniques de mise en œuvre.....252
9.3.5.4.1 Intensité de travail..... .252
9.3.5.4.2 Intensité de l’espace-temps disponible : contraintes d’organisation du chantier ..... .253
9.3.5.4.3 Le coût : une question de position sociale.....254
9.3.5.5 Désirabilité, incitation symbolique.....255
9.3.5.5.1 Aléa et biais..... .257
9.3.5.6 Incitations légales et administratives.....257
9.3.5.6.1 Aléas et biais.....258

9.3.5.7 Conclusion : cultures constructives.....259
9.3.5.7.1 Interactions entre techniques de construction.....260
9.3.6 Conclusion 261
9.3.6.1 L'influence du sol au sein d'un contexte socio-écosystémique complexe.....261
9.3.6.2 Quelles données pour évaluer le contexte environnemental ?.....262
9.3.6.3 Un déterminisme environnemental ?.....264
9.4 Données pédologiques.....265
9.4.1 Données pédologiques ou données géologiques ?.....266
9.4.2 Description des données pédologiques.....267
9.4.2.1 DoneSol3 – vecteur d'UCS et raster d'UCS.....267
9.4.2.2 GlobalSoilMaps.....271
9.4.2.3 SoilGrids.....272
9.4.2.4 Conclusion : sources de données pédologiques.....272
9.4.3 [A REVOIR] Préparation des données pédologiques.....273
9.4.3.1 DoneSol3.....273
9.4.3.1.1 Accès et préparation de la base de données harmonisée nationalement.....273
9.4.3.1.2 raster-UTS.....273
9.4.3.1.3 vecteur-UCS.....273
9.4.3.1.4 Vecteur-UTS.....274
9.4.3.1.5 ----------.....274
9.4.3.1.6 Agrégation pour l'extraction raster-UTS.....277
9.4.3.1.7 Création d variable orgc_calc.....279
9.4.3.1.7.1 Mélange d'horizons, épaisseur continue d'horizon convenable.....279
9.4.3.1.8 Agrégation pour l'extraction vecteur-UCS.....280
9.4.3.2 SoilGrids.....281
9.4.3.3 GlobalSoilMaps.....281
9.4.4 [AR] Régions pédogénétiques.....282
9.4.4.1 Bretagne.....282
9.4.4.2 champagne.....283
9.4.4.3 Occitanie.....283
9.4.4.4 Limagne.....283
9.5 Données patrimoniales géolocalisées.....283
9.5.1 Terre : liste des sources.....285
9.5.2 Tri et formatage des données terre au format de la base de données : type de sources et transformation associée.....287
9.5.3 Détail de la transformation des données terre et densité, par source.....289
9.5.3.1 Transects de collecte de données : bâtiments en terre crue.....289
9.5.3.1.1 Outils numériques et données collectées.....289
9.5.3.1.2 Choix du transect.....291
9.5.3.1.3 Limites de la méthode.....292
9.5.3.2 Service du patrimoine de Bretagne : bâtiments « vernaculaires » et bâtiments « terre ».....294
9.5.3.2.1 Tri des données « vernaculaires ».....294
9.5.3.2.2 Tri des données « terre ».....294
9.5.3.2.2.1 Vérification systématique d'un échantillon.....294
9.5.3.2.3 Création et amélioration de l'algorithme de tri.....297
9.5.3.2.4 Fusion avec données vérifiées.....300
9.5.3.3 Fusion des données et suppression des doublons.....300
9.5.3.4 Données de densité : sources et transformations.....302
9.5.3.4.1 Toutes sources de densité : délimitation de la zone d'étude, distance de connaissance D.....302
9.5.3.4.2 Données OpenStreetMap (OSM).....302

9.5.3.4.3 OpenStreetMap : analyse de visibilité.....303
9.5.3.4.3.1 méthode.....304
9.5.3.4.3.2 Analyse de sensibilité.....305
9.5.3.4.4 Bâtiments aléatoires.....306
9.5.4 BDD-terre-crue : une base de données destinée à la localisation du patrimoine bâti en terre crue.....306
9.6 Croisement des données.....307
9.6.1 Extraction des valeurs des BDD pédologiques.....307
Chapitre 4 : résultats du croisement de données patrimoniales et pédologiques.....309
10 Quelle profondeur d'extraction ? Sol sous-jacent aux points-bâtiments.....309
10.1 Méthode.....309
10.2 Résultats.....309
10.3 Discussion.....313
10.4 Optimisation de la profondeur d'extraction.....314
11 Relations entre sol et densité bâtie en bauge : données vernaculaires en Bretagne.....316
11.1 Densité bâtie relative en bauge selon les propriétés pédologiques.....316
11.1.1 Méthode et mise en forme des résultats.....316
11.1.2 Propriétés pédologiques et densité relative.....318
11.1.3 Résultats par source de données de densité : vernaculaire, OSM, Aléatoire.....325
11.1.3.1 Discussion.....326
11.1.3.1.1 Qualité des données pédologiques.....326
11.1.3.1.2 Choix technique.....327
11.1.3.1.3 Installation préférentielle.....328
11.1.4 Optimisation des paramètres de modélisation.....329
11.1.4.1 BDD pédo.....329
11.1.4.2 Distance de connaissance.....331
11.1.4.3 Conclusion optimisation.....334
12 Relation entre sol et densité bâtie pour la bauge, le pisé et les adobes : transects dans quatre régions.....334
12.1 Données de densité OSM : optimisation de la méthode d'analyse de visibilité.....335
12.1.1 Paramètres de l'analyse de visibilité et variables de réussite de l'optimisation.....335
12.1.2 Temps de calcul.....337
12.1.3 Distance maximale.....337
12.1.4 Résolution.....339
12.1.5 Hauteur des bâtiments.....339
12.1.6 Résultats finaux.....340
12.2 Propriétés pédologiques et densités relatives.....341
12.2.1 Densité relative par technique-type et par région.....341
12.2.1.1 Bauge : Ouest.....342
12.2.1.2 Bauge : Occitanie.....345
12.2.1.3 Bauge : Champagne-Ardennes.....346
12.2.1.4 Bauge : limagne.....347
12.2.1.5 Pisé : Limagne.....348
12.2.1.6 Pisé : occitanie.....350
12.2.1.7 Adobe: Occitanie.....352
12.2.1.8 Adobes : Champagne-Ardennes.....354
12.2.1.9 Adobes : Limagne.....357
12.2.1.10 Discussion.....359
12.2.1.10.1 Bauge.....359
12.2.1.10.2 Pisé.....359
12.2.1.10.3 Adobes.....360
12.2.1.10.4 Remarques générales.....360

Conclusion.....361

Avant-propos

1.1 Situation particulière et objectifs de travail

1.1.1 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 chez Vinci Construction sur le thème de la végétalisation des bâtiments, l'éveil fut sonné par les mots « effondrement », « écosystèmes », « climat », portés 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 commençait alors à regretter), j'eu 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 Equatorien en proie au *méga-extractivisme* minier en participant à un programme de surveillance de la qualité de l'eau encadré par William Sacher[2]. Pendant ce temps, 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*. Je m'engageai alors dans un master spécialisée en pédologie (sciences du sol) et rencontrai 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 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

1 https://david.mercereau.info/paillourte/
2 voir notamment (Sacher 2018)
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

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 ?

Ces questionnements m'ont amené sur les chemins philosophiques et politiques de la valeur[4], notamment sa définition, son évaluation, et la place d'un chercheur académique dans l'emploi de cette notion. On trouve en effet dans la littérature académique et non académique traitant de la construction en terre crue des questionnements récurrents sur la valeur, 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 potentiels de valeur des techniques de terre crue, 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 le travail d'édification.

Cette thèse n'apportera donc pas de « critères de convenance pour le réemploi des terres de déblai dans la construction en terre crue » sous une forme quantifiée et universelle, comme on pourrait s'y attendre dans un travail de génie civil. Tout au plus, quelques cartes seront produites et représenteront un essai de quantification, que je publierai ici avec beaucoup de précautions car comme chacun sait, une carte est toujours employée en dehors de son contexte de validité (voir XXX). Au contraire, j'espère que ce travail apportera plus de questionnements que de réponses : il pourrait permettre d'ouvrir le sujet du choix d'une technique de construction à bien d'autres critères s'ajoutant aux propriétés de la terre à disposition, et s'y articulant, et ainsi questionner ce qui oriente nos choix techniques collectifs et individuels.

1.1.2 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. Les questionnement sur la valeur et l'éthique du travail de recherche sont venus en parallèle de leur développement dans le cadre de la construction en terre crue.

En effet, avoir du temps pour produire de la connaissance, par exemple en étant rémunéré pour cela – en d'autre termes, être déchargé de tout ou partie de ses propres tâches de

4 Le terme valeur est employé ici comme la perception des pratiques et des choix. Cette perception peut être individuelle ou collective, et elle guide le jugement et l'action. Elle relève « de la morale ou de l'éthique, de la politique, de la spiritualité ou encore de l'esthétique » (Communauté Wikipédia 2023b).

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[5]. 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 compréhension des enjeux. Bâtir l'été, écrire l'hiver : comme pour l'artisanat, 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 s. d.:17).

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 transcendantal, mais des savoirs pertinents permettant aux sociétés de vivre ces changements le plus sereinement possible. Sciences Citoyennes a notamment développé le concept de Conventions Citoyennes[6]. 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 d'accompagnement de chercheur.euses spécialisées sur les sujets concernés. Un exemple célèbre est celui de la Convention Citoyenne pour le Climat[7] (CCC). Cette expérience politique a montré, d'une part, la capacité de citoyens initialement peu « sachants » sur des sujets politiques à s'en emparer et décider collectivement de solutions radicales 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[8].

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 » (Horizon TERRE, 2021, p. 6).

5 Voir l'appel de Reprises de Savoirs à l'adresse https://www.reprisesdesavoirs.org/lappel/ ou en Annexe 1
6 https://sciencescitoyennes.org/conventions-citoyennes/
7 https://www.conventioncitoyennepourleclimat.fr/
8 https://reporterre.net/Convention-pour-le-climat-seules-10-des-propositions-ont-ete-reprises-par-le-gouvernement

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. A la lecture de ce document au cours de mon travail de thèse, j'ai pu m'assurer de l'intégration des problématiques de mes recherches dans les cadres prioritaires proposés par l'association. Une telle vérification aurait pu avoir lieu en amont du projet de thèse, et pourrait être intégrée dans les éléments de sélection des sujets soutenus par les organisations publiques. Dans certains cas comme le mien, la définition du projet reste flexible et il n'est jamais trop tard pour intégrer des considérations éthiques et politiques dans les travaux ou réorienter certains objectifs.

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. J'ai volontairement laissé et mis en évidence en italique un paragraphe de contextualisation dans le « bloc 8 », car je pense qu'il montrera aux initiés du secteur de la terre crue la capacité de ces groupes de travaux à synthétiser les enjeux autour des savoirs vernaculaires*.

> « 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
>
> - 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 ? » (Horizon TERRE 2021)

On voit clairement dans ces propositions de recherche que les matériaux naturels, dont la terre crue, occupent une place centrale dans les questionnements. 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 (sujet central de la thèse, discuté surtout au chapitre final XXX)

- la diversification des critères de performance des matériaux (chapitre XXX situation/compter)

- l'exploration des potentiels des techniques « low-tech », au moins aussi importante que celles de techniques « industrielles » (le chapitre XXX convenance littérature fait le point sur les techniques les plus étudiées, en réponse la suite de la thèse se concentrera sur les techniques vernaculaires historiques et contemporaines)

- l'évaluation des besoins a venir (chapitre situation XXX position dans les scénarios giec/ademe)

- Des considérations économiques, en terme de rendements de production pour faire face aux besoins à venir (rendements en temps de travail evalués au chapitre XXX)

1.1.3 Savoirs situés

1.1.3.1 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 ne l'est « 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.

1.1.3.2 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)

1.1.3.3 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. » (“Neutralité scientifique (A) - L'encylopédie philosophique.pdf”, p. 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. (NagyHesse-Biber, 2012).

1.1.3.4 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), et notamment en Génie Civil (Pelé-Peltier 2023).

1.1.3.5 Positionnements

Dans ce travail, on cherchera notamment à apporter de la diversité en visibilisant certains positionnements apparaissant minoritaires dans la recherche académique (voir XXX chapitre 2).

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 domaines, notamment lorsqu'elles sont partagées par la majorité des personnes de ce domaine.

C'est pourquoi dans l'exploration de divers champs disciplinaires, nous nous sommes permis de questionner certaines orientations. Quelques exemples illustrant cette prise de recul : nous soulignerons le questionnement posé par la complexification des méthodes d'aide à la décision telles que l'Analyse de Cycle de Vie quant à la possibilité de son usage dans un cadre démocratique grâce au champ de la philosophie des techniques (chap 1 situation – techniques convenables) ; nous questionnons l'omniprésence des performances finales (mécaniques notamment) dans l'évaluation des techniques de construction en terre dans le champ académique (chap 2 XXX).

Enfin, 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 par de la littérature scientifique interdisciplinaire (Chapitre 0 : situation) XXX. La première partie de ce travail visera à documenter la provenance de notre positionnement philosophique, par une analyse bibliographique nous permettant de 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 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.

Introduction

1.2 Contexte global : climat et inégalités

1.2.1 Problématique environnementale

1.2.1.1 Un consensus sur l'urgence

La destruction et la pollution des écosystèmes par la société humaine industrielle est une problématique d'ampleur planétaire.

L'alerte est donnée depuis plusieurs décennies par la communauté scientifique. Le rapport Meadows en 1972 (Meadows et al. 1972) synthétisait par la modélisation l'impossibilité de prolonger les dynamiques de croissance des consommations de ressources naturelles des sociétés humaines dans le système clos que forme la planète terre. La création du GIEC (Groupement International des Experts sur le Climat, IPCC en anglais) en 1988 et la production de rapports de l'état des connaissances sur l'avancée du réchauffement climatique ont rapidement poussé au consensus scientifique sur la réalité du phénomène et l'urgence à agir.

En effet, la perturbation anthropique des écosystèmes est croissante et les travaux scientifiques cherchant à catégoriser ces perturbations et situer l'état du système terre dans ces catégories sont alarmants. Une manière de visualiser l'intensité de la perturbation en cours est de séparer les procédés naturels en grandes catégories pour analyser leurs états respectifs. On peut alors identifier 6 procédés naturels fondamentaux d'ores et déjà à saturation de leur capacité de régulation (Wang-Erlandsson et al., 2022):

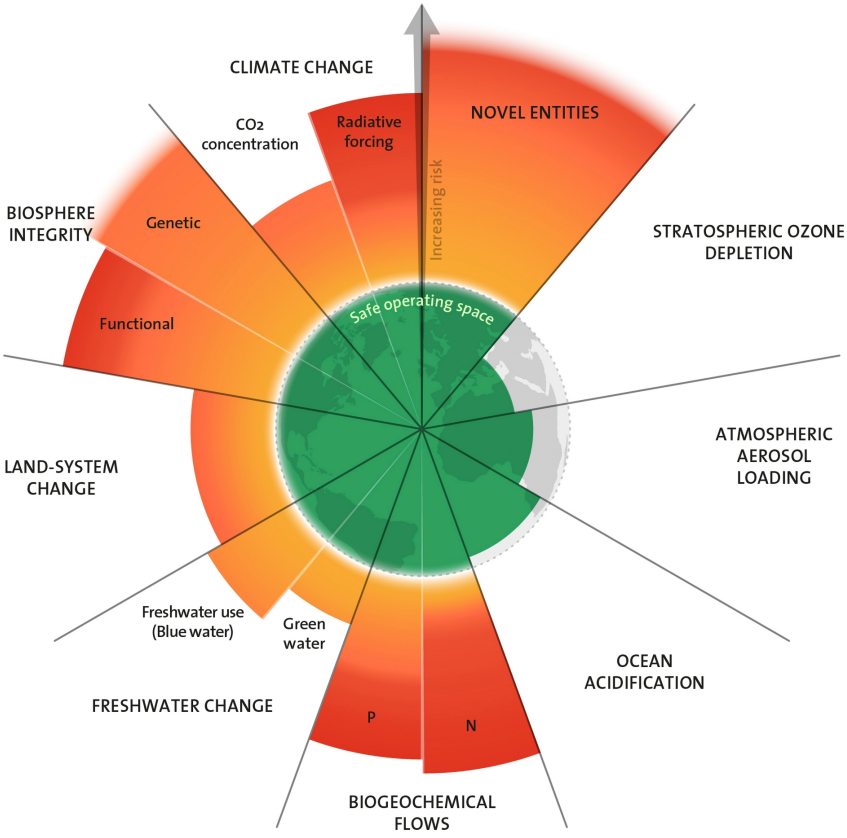


Figure 1

- **la régulation climatique** :

Le GIEC produit périodiquement des rapports de l'état d'avancée des connaissances sur la question du réchauffement climatique, sous forme de scénarios de choix politiques et leurs impacts à diverses échéances. Dans le scénario « tendanciel » (RCP 8.5), aussi appelé « business-as-usual », l'humanité prolonge la tendance actuelle à l'accroissement des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) globale. A ce rythme, la température moyenne à la surface de la terre augmenterait de 5,4 °C en 2100, ce qui se traduit par + 3,2 °C en France métropolitaine (Intergovernmental Panel On Climate Change 2023).

Cette augmentation des température moyennes est problématique en soi car elle déplace brusquement les zones climatiques « vers le Nord », alors que les écosystèmes ne peuvent se déplacer aussi rapidement. Ils deviennent alors inadaptés à leur nouvel environnement. Les humain.es font partie de ces écosystèmes et subissent les mêmes perturbations : leurs habitats, organisations de production alimentaire, doivent s'adapter rapidement aux conditions changeantes.

Le dérèglement climatique se traduit également en une augmentation significative du nombre et de l'intensité des épisodes climatiques extrêmes (canicules, méga-feux, catastrophes naturelles), (cf. fig XXX) accélérant l'effondrement des écosystèmes locaux et rendant d'autant plus difficile l'adaptation des populations vivantes, dont les humain.es.

Ainsi, la seule composante « climat » de la problématique environnementale a déjà, et aura de toute évidence des conséquences dramatiques dans les décennies à venir.

Celles-ci seraient d'autant plus désastreuses si aucune évolution des modes de vie n'était considérée.

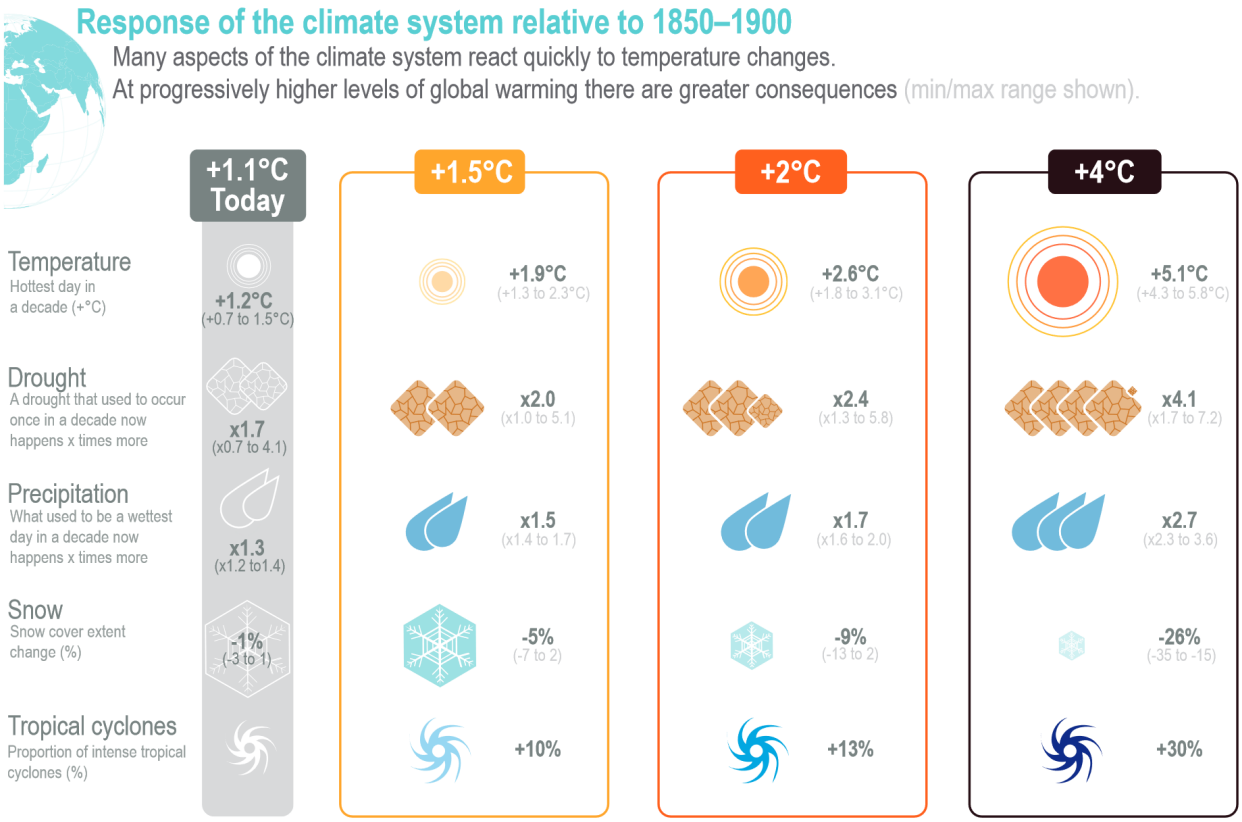


Figure 2 : Impacts du réchauffement climatique sur les phénomènes météorologiques extrêmes : pics de température, sécheresses, précipitations extrêmes, couverture neigeuse, cyclones tropicaux (Intergovernmental Panel On Climate Change, 2023, p. 89)

- **la disponibilité d'eau douce** : [exemple? XXX]

- **les flux biogéochimiques** : il s'agit des cycles des éléments minéraux et organiques dans la biosphère (l'ensemble des êtres vivants), en interaction avec la géosphère (atmosphère, hydrosphère, lithosphère). L'humanité comme toute espèce vivante interagit et s'insère dans ces flux depuis toujours, en prélevant ce qui l'intéresse et rejetant ce qui ne l'intéresse plus. Un système équilibré « digère » les prélèvements et rejets, mais le déséquilibre atteint dans le premier quart du XXIe siècle naît par l'ampleur et la diversité des flux mobilisés, qui rendent les écosystèmes incapables de réguler les prélèvements ou les rejets. Par exemple, l'extraction massive de certains composés de la lithosphère (ex : énergies fossiles carbonées, nutriments phosphorés) ou de l'atmosphère (ex : synthèse des fertilisants azotés depuis l'azote atmosphérique) s'accumulent dans les écosystèmes (respectivement GES dans l'atmosphère, eutrophisation azotée et phosphorée des sols et écosystèmes aquatiques).

- les **nouveaux composés** : la chimie industrielle produit chaque année une grande diversité de molécules dont les effets sur les écosystèmes sont avérés néfastes, souvent après plusieurs dizaines d'années de dispersion dans les écosystèmes, à l'image des

pesticides de synthèse ou des microplastiques. Ces composés sont problématiques par leur non-intégration dans les systèmes biogéochimiques et donc par leur accumulation ; par leur toxicité pour les écosystèmes (qui est parfois leur objectif initial) ; par l'imprévisibilité de leurs effets surtout lorsqu'ils entrent en interaction entre eux (« effet cocktail » (Kortenkamp et al. 2009).

- **les changements d'occupation des sols** : déforestation, artificialisation, etc ;

- **l'intégrité de la biosphère** : diversité et intensité du vivant.

A noter que certaines limites n'ont probablement pas encore été identifiées (Wang-Erlandsson et al., 2022). En effet, la croissance industrielle produit toujours de nouvelles interactions avec les écosystèmes, tandis que l'intensification de certaines relations de l'humanité avec son environnement – alors qu'elles étaient stables pendant des siècles – passent désormais des seuils de déséquilibre inquiétants.

Ainsi, la problématique n'est pas seulement climatique : elle est systémique, et tous les éléments du système doivent être considérés pour comprendre les enjeux et surtout pour envisager des réponses globales et non seulement sectorielles. Par exemple, les solutions intégrant la production de biomasse pour la production de carburants sont souvent critiquées pour le report qu'elles engagent sur les changements d'occupation des sols par intensification de nouvelles zones agricoles dédiées (a ce sujet, voir (Terre de Liens 2022))

1.2.1.2 Des procédés centraux : la dispersion des matières fossiles

La consommation d'énergies fossiles est au cœur de la problématique. La combustion de ces énergies génère des déchets. 86 % du flux anthropogénique (généré par l'humanité) de GES vers l'atmosphère est généré par la combustion d'énergies fossiles (Intergovernmental Panel On Climate Change 2023:80).

Les déchets radioactifs issus de la production d'énergie nucléaire continuent à s'accumuler, sans solutions viables de traitement et engendrant beaucoup d'incertitudes sur leur gestion à long terme, alors que certains d'entre eux resteront radioactifs pour encore 100 000 ans.

Également, de plus en plus nombreuses ressources mobilisées dans la technosphère* sont également à considérer comme fossiles car en quantité restreinte relativement à leur vitesse de consommation. C'est le cas des divers minerais tels que les métaux, terres rares ou encore les granulats employées dans la construction. Notons que leurs conditions d'extraction sont peu vertueuses relativement aux contraintes environnementales évoquées précédemment (production de déchets toxiques, destruction d'écosystèmes) ainsi qu'aux considérations sociales que l'on évoquera plus loin. Ici encore, considérer ces limites est indispensable pour ne pas entraîner un report des problématiques climatiques sur d'autres catégories d'impacts. Le report de consommation d'énergies fossiles vers des énergies dites « renouvelables » reporte les impacts dans d'autres composantes du système, potentiellement moindres, mais non négligeables.

1.2.1.3 L’énergie comme capacité de destruction

L’énergie, c’est une capacité à transformer et modeler son environnement. Un individu humain adulte moyen consomme approximativement 8 MégaJoules par jour via son alimentation - soit 3 GigaJoules (GJ) par an - avec son propre corps, dont il peut mobiliser une certaine fraction pour transformer son environnement. Par exemple, en mobilisant ses jambes, il pourrait réaliser jusqu’à l’équivalent de 2 MégaJoules de travail mécanique en une journée (soit 0.7 GJ/an), le reste étant dissipé sous forme de chaleur. Le rendement énergétique (énergie employée par unité d’objectif réalisé) du travail métabolique humain est très variable en fonction des tâches réalisées.

La consommation moyenne d’énergie extra-corporelle (fossiles ou non), aussi appelée « empreinte énergétique » d’un français moyen est de 85 GJ/an (ADEME s. d.).

Cette énergie non métabolique est convertie en actions, non pas par le corps, mais à travers une diversité d’objets techniques de la technosphère. Comme pour le corps humain, les rendements énergétiques des machines sont variables selon les tâches. En prenant un rendement-machine sans pertes, chaque Français posséderait alors l’équivalent de 121 fois sa capacité d’action en mobilisant l’énergie extra-corporelle. C’est à dire qu’au terme de sa vie, mettons 70 ans de consommation de produits et services, iel aura pu *faire faire* l’équivalent de 8470 années de travail de transformation du monde en mobilisant l’énergie extra-corporelle qui lui est allouée.

Il est intéressant de considérer l’abondance (croissante) d’énergie mobilisée comme une capacité d’action sans précédent dans l’histoire de l’humanité, car celle-ci est utilisée en grande partie dans des travaux de transformation des écosystèmes et de la géosphère pour les mettre à contribution de ses désirs: terrassements, excavations, urbanisation, monocultures agricoles et sylvicoles, façonnage de nouveaux composés, nouveaux rouages de la technosphère, sont autant d’artificialisations intensives ou extensives des milieux vivants. Auparavant limitées dans le temps et dans l’espace, ces transformations sont permises par l’acquisition d’une puissance extra-corporelle considérable via la technosphère.

La consommation d’énergies fossiles a des impacts significatifs sur les écosystèmes et notamment le climat. Dans la mesure du possible, il convient de laisser ces ressources dans le sol pour ne pas les libérer dans l’atmosphère et la biosphère. Cependant, on peut également considérer que toute matière fossile consommée aujourd’hui ne sera pas disponible pour les générations futures. Choisir d’utiliser maintenant, ou de garder en stock, doit donc être un choix débattu collectivement pour l’avenir de l’humanité. Notamment, il s’agira de considérer que les complications environnementales à venir pourraient nécessiter des ressources pour des usages bien plus vitaux que ceux pour lesquels elles sont employées aujourd’hui.

Enfin, l’importance de réduire les émissions de GES ne doit pas masquer la diversité des procédés destructeurs du vivant, dont certaines composantes sont au moins aussi inquiétantes que le réchauffement climatique. Pourtant, le débat public et les préoccupations académiques sont largement centrées sur les émissions de GES et omettent très souvent le reste des considérations environnementales (et sociales, par ailleurs), ce qui risque d’entraîner des effets rebonds. Le philosophe astrophysicien

Aurélien Barreau considère que cette préoccupation monoidéique résulte du refuge dans un solutionnisme technologique face aux problématiques environnementales :

> "Le CO2 est un gaz à effet de serre, qui est évidemment lié au réchauffement climatique, mais **c'est une erreur drastique que de croire que le réchauffement climatique est notre plus gros problème**. En réalité, dans la sixième extinction massive, au sein de laquelle nous nous trouvons, le climat jusqu'à maintenant n'a joué aucun rôle.
>
> **Ce sont l'ensemble des piliers qui définissent l'habitabilité de cette planète qui sont en train de céder** et la raison pour laquelle on se focalise sur le climat, c'est exclusivement parce que c'est le plus simple de nos problèmes, c'est le seul qui peut encore laisser perdurer l'impression totalement délirante que nous sommes face à un problème technique ayant une solution technique**"**. (France Inter s. d.)

A ce titre, se concentrer sur la seule variable de la réduction du CO2 équivaudrait à un nouveau « PIB » comme guide pour l'action : un indicateur hors sol, négligeant la complexité du monde et la capacité des écosystèmes à tenir face aux objectifs de (dé)croissance en négligeant les autres « limites matérielles » terrestres (Azam 2023).

1.2.2 Inégalités

Si les préoccupations « environnementales » semblent de plus en plus considérées par le milieu de la recherche en sciences naturelles*, il n'y a que rarement de considérations pour des problématiques « sociales ». Ce constat était déjà soulevé en 1982 par Murray Bookchin, penseur et théoricien du mouvement de l'écologie sociale :

> « Je souligne l'adjectif social en matière écologique pour introduire un autre concept clef : aucun des principaux problèmes écologiques auxquels nous nous affrontons aujourd'hui ne pourra être résolu sans un changement social profond. Les implications de cette idée n'ont pas encore été assimilées entièrement par le mouvement écologique. » (Bookchin, 1982, p. 4)

Force est de constater que de nombreu.ses acteur.ices de la recherche, académiques ou non académiques, déclarant leur intérêt pour l'écologie, oublient encore d'intégrer les implications d'ordre sociales dans leurs travaux. Nous reviendrons sur cette question dans la partie 1 (matière/convenance académique/ XXX).

Pourtant, les inégalités économiques, vectrices d'inégalités sociales, ont rarement été aussi intenses et leur croissance n'a pas l'air d'infléchir en ce début de XXIe siècle (Piketty 2013; Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc) 2023).

1.2.3 interaction inégalités destruction environnement

S'y ajoutent désormais les conséquences croissantes des perturbations environnementales sur les populations humaines : les pénuries d'eau et les catastrophes ajoutent des réfugiés dits « climatiques » (Bellizzi et al., 2023) aux réfugiés de guerre et de diverses autres violences inégalités sociales.

Le « Sud Global »* est la première victime des combinaisons de ces problématiques, alors que la plupart sont engendrées par les consommations et comportements politiques des individus et des dirigeants des nations du « Nord Global ». Ceci explique en partie l'inertie

comportementale des populations du Nord Global, qui sont déconnectées des conséquences de leurs choix individuels ou collectifs.

1.2.4 Origines globales de ces problématiques

1.2.4.1 Division mondiale du travail et marché économique

> « L'analyse de la globalisation me montrait que **toute notre prospérité supposait des formes d'exploitation occultées par la division mondiale du travail**. La réalité était crue : presque tous nos articles de consommation étaient produits par des gens réduits à un travail d'esclaves, et nous étions en train de dévaster le monde.». » Groupe Marcuse, 2010, dans Berlan 2021, p12

On a vu que la disponibilité énergétique a permis une capacité d'action sans précédent dans l'histoire de l'humanité. Mais conjointement, la division mondiale du travail a entraîné une forme de délégation généralisée du Nord global vers le Sud global.

En effet, nous ne manipulons pas nous-mêmes les corps et les outils qui façonnent les objets et les ressources que nous consommons au quotidien : nous « faisons faire ». Cette délégation a de toute évidence longtemps été permise par la violence physique directe, par exemple dans le cas des colonies et de l'esclavage. Mais à l'aube du XXIe siècle, elle est majoritairement permise par la contrainte économique sur un marché désormais mondialisé. Pourtant, la violence n'a pas disparu, elle a changé de main : d'une action violente directe provenant de l'acteur exigeant les services, celle-ci a été déléguée aux états, la police et la justice, qui maintiennent par violence et/ou la propagande (que l'on nommera également éducation ou publicité, selon les cas) le système économique permettant aux acteurs dominants, en théorie extérieurs à celui-ci, de « faire faire » le travail (Berlan 2021).

Quantifier précisément cette délégation du travail n'est pas chose aisée, mais on peut l'illustrer par des ordres de grandeur en projetant les coûts relatifs sur le marché d'une heure de travail selon le groupe social, notamment guidé par la localisation des individus et leur statut social. En 2023, selon l'INSEE les 10 % des salariés du privé les mieux rémunéré.es (neuvième décile) gagnent plus de 88€ nets par heure[9], tandis que le SMIC, fixé à 9,23€ nets, rémunérait 12 % des salarié.es français.es selon Eurostat (Anon s. d.). En 2023, le revenu minimum légal Bulgare est fixé à 4,72 BGN (Anon s. d.) (environ 2,41€) et rémunérait 14 % des salarié.es du pays en 2018 (Anon s. d.).

Tableau 1 : Valeur relative d'une heure de travail selon trois catégories de revenu horaire.

Catégorie	France, salaire au 9ème décile	France, salaire minimum (approx. 1er décile)	Bulgarie, salaire minimum (entre 1er et 2nd décile)
Revenu horaire (€)	88	9,23	2,41
Source	INSEE 2022	(Anon s. d.)	(Anon s. d.)
France, salaire au 9ème décile	1	9,53 (9h32)	36,5 (36h30)
France, salaire	0.10 (6 min)	1	3,95 (3h57)

9 N'hésitez pas à consulter l'outil dédié de l'observatoire des inégalités : https://www.inegalites.fr/Salaire-etes-vous-riche-ou-pauvre

minimum (approx. 1er décile)			
Bulgarie, salaire minimum (entre 1er et 2nd décile)	0,03 (1min et 38s)	0,25 (15min)	1

Si l'on compare ces rémunérations en terme de pouvoir d'« emploi » relatif, par son statut de haut salarié, en 1h de travail un cadre supérieur français peut *faire faire* presque 10h de travail à un salarié au salaire minimum français, et plus de 36h à un salarié au salaire minimum Bulgare, soit une semaine de travail !

Évidemment, le salaire n'est pas la seule source de rémunération (notamment pour les plus gros capitaux[10]), entre autres approximations. De meilleures représentations pourraient être envisagées via le « niveau de vie » par exemple (Anon s. d.). L'expérience proposée ici n'est qu'une représentation de la « valeur » du travail dans le système du salariat mais constitue une bonne base de réflexion.

Voici donc notre « pouvoir d'achat » : il s'agit d'un droit à faire faire le travail, sans avoir à soi-même asservir ce travail par la force : les systèmes étatiques se chargent de préserver cette possibilité d'asservissement par la dépendance au salariat et la protection de la propriété privée.

La capacité d'action des groupes sociaux dominants le système social global n'est donc pas qu'une question de consommation de ressources matérielles. Elle est permise par l'asservissement global du travail d'autres groupes sociaux, qui manipulent la matière et l'énergie à notre place. Ainsi, comme le relève le groupe Marcuse (2010, ref) :

> « **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, p12

1.2.4.2 Travail invisible et dominations non-économiques

Nous avons relevé l'exploitation des groupes sociaux économiques dominants sur les dominés via l'économie de marché, et avons souligné le vecteur significatif de surconsommation de ressources par le biais du travail d'autrui. Il est important de souligner qu'au-delà de la composante économique des dominations, le travail final nécessaire au « confort moderne » est également composé de toute la force de production permise par les dominations hors du marché : travail de subsistance « fantôme » (illich) des femmes, des enfants et des autres animaux. Les sociologues écoféministes comme Maria Mies ou Geneviève Pruvost considèrent que l' « économie » des économistes, constitué de capitaux et de travail, n'est que la partie émergée d'un iceberg, illustré par la Figure 3 :

10 Consultez également la répartition des capitaux via un outil dédié : https://www.inegalites.fr/Patrimoine-etes-vous-fortune

> « Cette partie visible est comptabilisée dans le PIB, les travailleurs sont protégés, couverts par le droit du travail et représentés par des syndicats. Il existe le plus souvent un contrat liant le capitaliste et le travailleur. Mais la plus grande partie de l'iceberg est immergée : invisible, elle est soustraite aux réglementations et aux protections sociales ; les travailleurs sont isolés et n'ont le plus souvent pas de contrat en bonne et due forme. En fait, la plupart de cette main-d'œuvre est considérée comme un « bien libre », comme la nature. Une grande partie de ce travail est illégal, comme l'activité des immigrés clandestins qui sont néanmoins indispensables, par exemple pour travailler à bas coût dans les exploitations agricoles. » (Mies 2005)

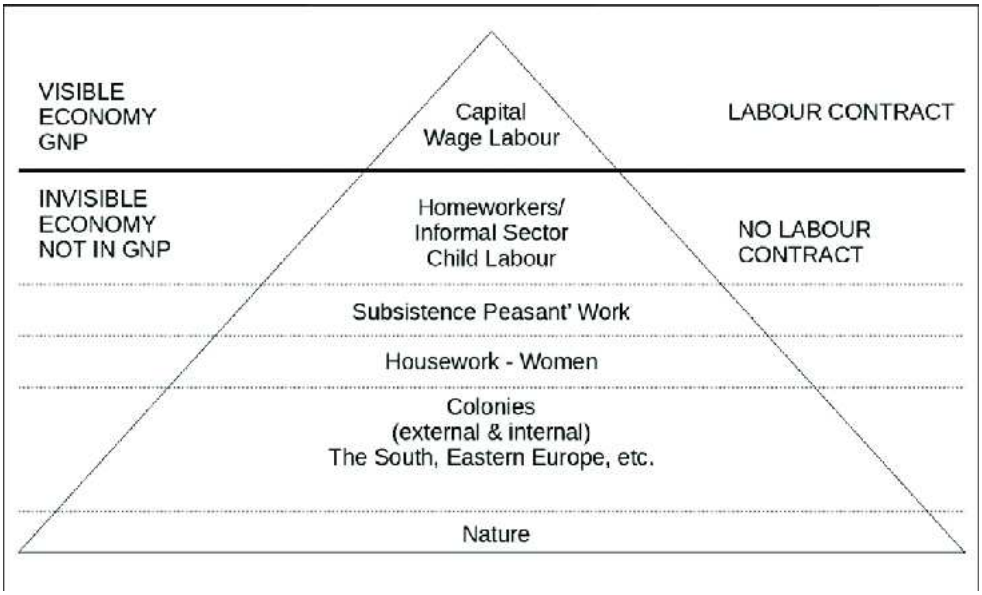


Figure 3: Par Maria Mies and Veronika Bennholdt (Mies & Bennholdt-Thomsen 1999) [CC BY 4.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=116956924]

Afin de ne pas perpétuer cette invisibilisation, il est indispensable de sortir de la scission entre le travail « rémunéré » et l'ensemble des autres « activités » des humain.es (Pruvost 2016).

1.2.4.3 Induire la dépendance : la perte d'autonomie

L'invisibilisation de la majeure partie du travail productif montre l'absurdité du système de valeur mondialisé basée sur le marché financier ainsi que l'intensité des rapports de domination non-économiques. Dans le marché du travail, les dominants économiques peuvent déléguer aux dominés les tâches qu'ils désirent et déploient ainsi leur capacité d'action. Mais comment maintenir la force de travail dans la dépendance au salariat ? C'est le récit de l'expansion du capitalisme industriel, qui s'ancre dans le phénomène des *enclosures* au Royaume-Uni au 16^{e} siècle et se propage depuis à l'ensemble du monde et de la diversité tâches de subsistance.

En effet, en pratique, le système de capitalisation des richesses basé sur un prélèvement de la valeur ajoutée de la production ne peut se perpétuer indéfiniment sans finir par prélever toute la valeur ajoutée et mener à la misère généralisée (entraînant révolution ou destruction de la productivité des travailleurs). Ainsi, pour une capitalisation continue, le

nombre d'échanges sur le marché doit être croissant (Piketty 2013): soit en augmentant la production des procédés existants, soit en intégrant de nouveaux procédés sur le marché (existants ou créés). Les indicateurs de croissance économique (Produit Intérieur Brut par exemple) sont des mesures de cette intensité d'échange. Tant qu'ils croissent, la possibilité de prélever toujours plus de valeur ajoutée sur le travail est assurée.

Cependant, pour augmenter cette intensité d'échanges il faut qu'une plus grande quantité de travail soit généré et/ou monétarisé. C'est ainsi que l'expansion du capitalisme est géographique, en intégrant de nouveaux territoires dans l'économie mondialisée (colonialisme), mais aussi sociale, dans le sens ou progressivement, les échanges marchands « sont devenus le mode normal de couverture des besoins, au détriment des pratiques ancestrales d'autosubsistance ». La marchandisation commence dans la force de travail avec le salariat et la production de moyens de production industriels, « avant de s'emparer des biens de consommation quotidienne des masses et de rogner ainsi sur l'autonomie matérielle des classes populaires ».

Les phénomènes d'*Uberisation* aujourd'hui à l'œuvre relèvent de la continuité de l'expansion du marché. Des services autrefois non monétarisés entrent sur le marché, à grand coups de propagandes consuméristes prônant l'amélioration du confort des usagers-employeurs. Ce furent d'abord les moyens de subsistance de base : production alimentaire, logement, santé ; aujourd'hui la monétarisation pénètre dans ce qui relève de la « sphère privée », c'est à dire ce qui reste de subsistance dans les maisonnées : garde des enfants et aides aux devoirs, plats préparés, courses préparées en *drive* puis livraisons à domicile, etc. En descendant la pyramide de la Figure 3, de nouveaux marchés sont *conquis*, permettant d'accroître la capacité de prélèvement de la valeur ajoutée.

Ces pratiques s'ancrent dans le quotidien puis, une fois adoptées par une fraction conséquente de la population se verrouillent et deviennent obligatoires, dans ce qu'Ivan Illich appelle un *monopole radical*. Disposer d'une terre pour cultiver ou construire est verrouillé par le marché et la loi, tandis que le soin ou l'instruction doit passer par le système de santé officiel ; les enseignes de proximité disparaissent et induisent un recours à la voiture, puis à la livraison, etc. La dépendance aux biens manufacturés induit un besoin de monnaie pour y accéder, donc au salariat. Toute conquête de nouveau marché « crée de l'emploi » pour la production au détriment de la subsistance locale, mais l'augmentation des besoins permet l'arrivée permanente de main d'oeuvre sur le marché du travail.

1.2.4.4 Libération du travail et optimisme technologique : le Progrès

La privation des moyens de subsistance par l'industrialisation de la production ne s'est pas faite que dans le sang. Une idéologie puissante a gouverné le développement industriel, tant dans les philosophies libérales que socialistes.

Selon les travaux de Maria Mies, repris plus récemment par Aurélien Berlan ou Geneviève Pruvost, la tradition philosophique socialiste prend ses racines dans « l'optimisme technologique de Marx, et en particulier d'Engels, qui considère la domination sur la

nature comme une condition préalable à la libération de l'humanité, à la transition du « règne de la nécessité » vers le début du « règne de la liberté ». » (Mies & Bennholdt-Thomsen 1999) .

On retrouve même cet optimisme technologique chez Murray Bookchin, développant pourtant une pensée plus libertaire que les socialistes de l'époque de Marx, qui considère les technologies « modernes » permettraient non seulement de « subvenir à nos besoins dans une société sans travail » mais également de définir des « modes de vie décentralisés et communautaires » (Bookchin 1965).

En effet, depuis l'émergence des pensées socialistes, la source de l'oppression est attribuée au capitalisme, réduit à la composante de propriété privée ; tandis que le développement industriel et le développement économique (de marché) associé en est théoriquement séparé et reste perçu comme « un facteur de libération, d'affranchissement à l'égard du « règne de la nécessité » ».

Selon Aurélien Berlan, l'idéologie de la libération est une tradition séculaire en occident, d'abord dans la religion chrétienne (libération dans l'au-delà) puis par son intégration dans la philosophie scientifique (libération dans l'avenir par le progrès technique). Cette idéologie de la libération, donnant un sens à l'histoire et un but transcendantal, est intégrée par toutes les philosophies contemporaines majoritaires, libérales comme socialistes.

Dès lors, pour « la gauche d'inspiration marxiste ou keynesienne, héritière d'une vision de l'histoire basée sur la foi dans le Progrès » (Berlan 2021:11), il ne s'agit plus de combattre la massification de la production mais de mieux en répartir les produits.

Le moyen est devenu la fin [Illich?]: l'industrie, outil constitué d'une accumulation de capitaux, de la spécialisation et de la division du travail, est vecteur d'abondance (du moins pour les classes dominantes) au début du développement industriel. Son développement est alors assimilé à l'abondance dans l'idéologie dominante et devient l'outil producteur de délivrance à développer par principe : le Progrès.

Pourtant, « depuis deux siècles et demi, l'expansion capitaliste s'identifie en pratique à l'industrialisation de la production. »(Berlan 2021:10)

Comment expliquer une foi dans un progrès technique industriel alors même qu'il apparaît structurellement destructeur pour la société dans son ensemble ?

Il est vrai que, face à l'intensité énergétique croissante mobilisée dans la technosphère à l'époque, il n'était pas forcément intuitif de projeter que ces consommations n'allaient pas permettre tôt ou tard de répondre aux besoins de base de l'ensemble de l'humanité. Comment imaginer que deux siècles plus tard, avec 57[11]« travailleurs énergétiques » par personne en moyenne dans le monde, subsistent famines, mal logement et autres conditions de vie de base non satisfaites, même au coeur des métropoles du Nord Global, où les travailleurs énergétiques se pressent, fourmillent dans les réseaux énergétiques urbains ? Comment est-ce possible d'y rencontrer encore des individus devant se

11 180 000 TWh en 2022, pour 8 milliards d'individus, soit 22,5 MWh/pers/an (81 GJ/pers/an), soit 57 ans de travail selon l'estimation proposé en 1.2.1.2 .

satisfaire pour dormir l'hiver, des quelques calories de l'évacuation finale de cette énergie sous forme de bouches d'aération de centre commerciaux ?

Face à l'échec du développement industriel pour l'émancipation, face aux dominations puissantes et visibles qu'entraîne le marché du travail et l'échec de la l'auto-régulation du marché économique, seule une idéologie robuste peut maintenir le cap : la foi en le Progrès a maintenu l'idée qu'un développement industriel serait bénéfique pour toutes et tous, permettant une *libération du travail de subsistance* et d'accéder au confort et aux loisirs (Berlan 2021).

Le progrès technique a certes permis l'amélioration du confort *moyen* de la population en termes de « capacité à satisfaire ses envies », tiré vers le haut par celui des plus riches. Mais la *médiane* peine à suivre cette croissance et pour une fraction considérable de la population, la capacité à satisfaire ses besoins de base n'est même plus satisfaite par dépendance au marché. Le Progressisme s'est traduit, via le développement industriel, par une perte de capacité d'autogestion qui a bénéficié aux classes dominantes en dépit des populations exploitées :

> « A défaut d'avoir apporté, enfin, la liberté à toutes et tous, la modernité occidentale a en fait diffusé une conception désastreuse de l'émancipation dans laquelle l'exonération des tâches liées à la subsistance, qui a toujours caractérisé les classes dominantes, a fini par éclipser l'objectif originel d'abolir les rapports de domination sociale. Et en soutenant, sur le plan de l'imaginaire, le développement industriel, cette conception est aussi l'un des vecteurs du désastre écologique en cours. Voilà pourquoi la « question naturelle » ne peut être séparée de la « question sociale » : fin du monde, fin du mois, même combat ! » » (Berlan 2021:21)

1.2.4.5 L'industrie sociétalement contre-productive

Pendant les deux derniers siècles d'industrialisation des productions, la philosophie socialiste et notamment Marxiste a espéré atteindre un seuil où la production serait suffisamment efficace pour qu'une révolution ouvrière permette la réappropriation des moyens de production, puis la répartition équitable de la production. En parallèle, la philosophie socialiste libertaire pointait déjà du doigt les dérives de l'industrialisation et son incompatibilité avec une gestion démocratique.

Pour Ivan Illich, l'impossibilité de répartir convenablement l'augmentation de la production permise par les technologies industrielles découle de l'impossibilité de gérer démocratiquement des techniques de trop grande échelle. Il n'hésite d'ailleurs pas à définir le terme « industriel » pour désigner l'excès de dimension des techniques.

1.2.4.6 Planification écologique et retour d'un « socialisme d'état » ou décentralisation et réappropriation de la subsistance ?

La focalisation sur le CO2 (voir XXX plus haut) offre une nouvelle variable objectif transcendante pour remplacer la croissance économique comme variable de justification du développement industriel. Elle donne un nouveau but ultime qui relance le dualisme « planification » contre « libre marché », central dans les oppositions des modèles communistes et libéraux de la fin du 20^{e} siècle (Azam 2023), aujourd'hui en essoufflement face au constat de l'impossibilité d'une croissance économique infinie dans un monde fini.

Mais la planification carbone ne s'écarte pas de l'idéologie Progressiste telle qu'elle est définie. D'une part, elle a pour objectif le maintien d'un « niveau de vie » maximal tout en réduisant les émissions de CO2, et ne questionne pas la dépendance de ce niveau de vie aux dominations relatives au travail ni le bien-fondé du consumérisme moderne. Les perspectives de centralisation ne questionnent pas l'échelle industrielle et sa contre-productivité sociétale puisqu'elles se focalisent sur la productivité économique. Au contraire, sont sans cesse vantés les « nombreux emplois dans l'industrie décarbonée » que la « transition écologique » permettrait de créer.

D'autre part, comme les paysans du 16e siècle, les individus sont considérés comme *incapables* de progresser dans le sens de l'objectif transcendant (la décarbonation), laissant le choix entre une gestion par la gestion centralisée par les états-nations et la libéralisation par l'économie carbone de marché.

Genevève Azam décrypte ainsi le langage élitiste du Shift Project[12]:

> « Un Plan porté par un groupe d'ingénieurs, qui saura naviguer, tenir la barre et « *embarquer tous les citoyens dans un imaginaire commun* », qui saura les accompagner, eux qui restent prisonniers d'un « *cerveau primitif* », animaux grégaires animés d'un désir de toujours plus : « *Nous sommes câblés pour en vouloir plus et pas moins (. . .). Il n'y a rien d'étonnant à cela : c'est juste le résultat de l'évolution* » » (Azam, 2023, p. 15)

Ce faisant, la *planification écologique* et autres *marchés carbone* perpétuent l'invisibilisation des voies démocratiques de subsistance collective en décrédibilisant la capacité d'autonomisation des individus et des groupe, charriant « les préjugés, les simplifications et idéologies nous ayant conduits au désastre écologique, à la dépolitisation de ses enjeux et à une expertocratie[13] dévorante » (Azam, 2023, p. 15).

De multiples expériences d'autonomisation et de gestion collective nous montrent pourtant la capacité des personnes à se saisir de leur propre subsistance dans des visions holistiques des enjeux sociétaux (xxx ccc). Ces expériences montrent d'autant plus la force de ces systèmes qu'ils doivent systématiquement faire face à des oppositions violentes (sur les personnes, matérielles ou symboliques) de la part des gestionnaires en place et réparer les ingérences passées tout en organisant leur subsistance de long terme. La possibilité de subsistance n'est possible que par autodétermination et est incompatible avec une gestion centralisée, encore moins guidée par une caste d'experts déconnectés des réalités des besoins.

12 Association présidée par Jean-Marc Jancovicci ayant pour objectif principal la proposition de scénarios planificateurs de voies de décarbonation de l'économie : « The Shift Project est un think tank qui oeuvre en faveur d'une économie libérée de la contrainte carbone. » https://theshiftproject.org/

13 Système politique, économique et social fondé sur la domination, totale ou partielle, d'une classe d'experts dans divers domaines (Communauté Wikipédia 2023a).

1.3 Contexte du logement

Le logement est une des composantes des besoins fondamentaux des êtres humains. Ainsi, les inégalités sociales se matérialisent en partie par l'inégal accès aux logements. D'autre part, à mesure que les économies s'industrialisent, les activités de construction, d'entretien, d'usage et de déconstruction des logements se basent sur des procédés gourmands en ressources peu renouvelables*, constituant une fraction considérable des consommations globales. Nous explicitons ici la traduction des problématiques sociétales évoquées précédemment dans les activités liées au logement. Dans le secteur économique des bâtiments et travaux publics (BTP), une distinction est souvent faite entre d'un côté le bâtiment, soit la construction et l'entretien d'édifices à visées d'habitation ou d'activité, et de l'autre les travaux publics, c'est à dire la construction et l'entretien des infrastructures de transport et des réseaux. Dans ce chapitre, nous considérerons l'impact du BTP en général sans différencier les secteurs, d'une part, parce que les données d'évaluation sont généralement regroupées ainsi sans donner le détail par sous-secteur ; d'autre part parce que ces deux secteurs sont intimement liés dans un modèle conventionnel d'habitation du territoire (voir XXX artificialisation du vivant).

1.3.1 « Environnement »

1.3.1.1.1 Energie grise, énergie en vie de service et émissions associées

La consommation énergétique liées au logement et les émissions de GES associées sont considérables : en France, 43% à 47 % de la consommation d'énergie finale* est attribuée au secteur du bâtiment, correspondant à 23 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) (ADEME 2018; Ministères Écologie Énergie Territoires 2022)

L'énergie grise compte pour 39 % dans le bilan énergétique mondial, pour 37 % des émissions de GES (UNEP 2022).

La différence entre la consommation énergétique et les émissions de GES dans le cas français s'explique par la prépondérance de l'énergie nucléaire dans le mix énergétique, n'émettant pas de carbone mais posant d'autres problématiques de gestion de déchets, risques et gouvernance.

Il est courant de séparer les dépenses énergétiques selon les phases du cycle de vie des bâtiments : *l'énergie grise* est l'énergie consommée au cours de la phase de construction et de déconstruction (production des matériaux, transport, mise en œuvre, fin de vie, etc), *l'énergie en vie de service* est l'énergie consommée à l'usage du bâtiment.

1.3.1.1.2 Détail énergie vie de service

A l'échelle mondiale, l'énergie en vie de service des bâtiments représente 30 % de l'énergie finale* tous secteurs confondus, soit 77 % de la part attribuée au secteur du bâtiment (UNEP 2022). Cette consommation à l'usage provient au trois quarts de l'énergie de chauffage, puis de la production d'eau chaude sanitaire, enfin à l'éclairage et l'électroménager (International Energy Agency (IEA) 2017)

Pour la France, nous n’avons pas trouvé de données précises pour estimer la fraction attribuée à l’énergie en vie de service des bâtiments. Cependant, il est régulièrement rappelé que dans les pays anciennement industrialisés, la proportion d’énergie grise des bâtiments neufs est désormais du même ordre de grandeur que l’énergie en vie de service (Blengini & Di Carlo 2010; Mandley et al. 2015; Passer et al. 2016). D’une part, l’efficacité énergétique en vie de service s’est améliorée par une meilleure isolation et des équipements plus économes en énergie. D’autre part, l’énergie grise liée à l’emploi de matériaux conventionnels a augmenté.

Ainsi, sur l’ensemble de la planète, l’énergie en vie de service augmente de 1 % par an, mais principalement dans les pays en cours d’industrialisation. Dans les pays anciennement industrialisés, elle n’augmente plus car les nouveaux bâtiments sont efficaces à l’usage, mais elle reste cependant considérable et un travail de rénovation de l’existant doit avoir lieu pour réduire son intensité (cf. XXX rénover).

1.3.1.1.3 Détail énergie grise

Dans le même temps, la consommation d’énergie grise continue de croître à l’échelle mondiale : +1% par an depuis 2010 et +2% de 2017 à 2018 (GABC 2019). Elle atteint 9 % en 2021 (UNEP 2022), et est responsable de 13 % des émissions de GES globales (IEA 2022).

Deux raisons principales à cette augmentation : la croissance du nombre de logements construits, et l’emploi croissant de matériaux conventionnels* énergivores (Giesekam et al. 2014).

Pour comprendre l’origine de l’énergie grise du secteur du logement, il est utile de comprendre la quantité et le type de matériaux principalement employés pour la construction conventionnelle : le béton de ciment, composé de ciment, de granulats et d’acier, les briques de terre cuite, le verre, les laines minérales et plastiques et les autres éléments plastiques ou composites.

[laines minérales?? XXX]

1.3.1.1.3.1 béton : ciment, acier, granulats

En 65 ans, l’industrie du béton a décuplé en production, celle de l’acier a triplé à l’échelle mondiale (UNEP 2022).

Le ciment représente à lui seul 2 % de l’énergie finale globale, soit 22 % de l’énergie grise des bâtiments (Taylor et al. 2006). Surtout, sa production génère 8 à 9 % des émissions de CO_2 mondiales (Monteiro et al. 2017)., c’est-à-dire 60-70 % des émissions de GES du secteur du bâtiment.

En effet, le procédé de production du ciment consomme de l’énergie : principalement sous la forme de pétrole pour la production de clinker à partir de la combustion du calcaire et de la craie, d’abord dans la combustion des matériaux bruts entre 850 et 1250°C puis celle du clinker à 1450°C (European Commission - JRC 2020); et généralement sous la forme d’électricité pour le broyage des matériaux bruts et du ciment produit. (Taylor et al. 2006)

Mais surtout, la réaction chimique de décarbonatation du calcaire au cours de sa cuisson émet du CO2, qui est responsable de 65 à 70 % des émissions de CO2 du procédé (Taylor et al. 2006; European Commission - JRC 2020), ce qui explique la différence entre la fraction d'énergie globale utilisée (2% de l'énergie globale) et l'intensité carbone du processus (8-9% des GES).

Notons également qu'en 2006 en Europe, parmi les sources d'énergie employées pour la cuisson du clinker et selon les pays, 35 à 70 % provenait de la combustion de déchets ménagers et industriels : pneus, bois traités, plastiques, produits chimiques, etc. (Taylor et al. 2006)(ces chiffres ayant probablement augmenté depuis). Pour traiter les polluants émis, ils sont filtrés et absorbés en partie par le clinker et les matériaux bruts (ex, le calcaire broyé) (Taylor et al. 2006). Une partie d'entre eux se retrouve donc dans le clinker et donc dans le ciment [validation Anne ? XXX], ce qui pose des problèmes de sécurité pour le stockage des déchets de démolition (voir XXX déchets). D'autre part, les fours de combustion de déchets des usines cimentières ne sont pas soumises aux mêmes régulations que les installations d'incinération de déchets, ce qui entraîne des controverses relativement aux émissions de polluants dans les fumées.

Les émissions liées à la production de ciment sont relativement stables (mais à des taux élevés) dans les pays dont le développement économique lié à l'industrialisation s'est stabilisé, mais augmentent rapidement dans les économies dites « émergentes » (figure XXX) (Chen et al. 2022). Le cas de la Chine est particulièrement préoccupant, par l'intensité de production actuelle mais surtout par sa croissance exponentielle (fig. XXX).

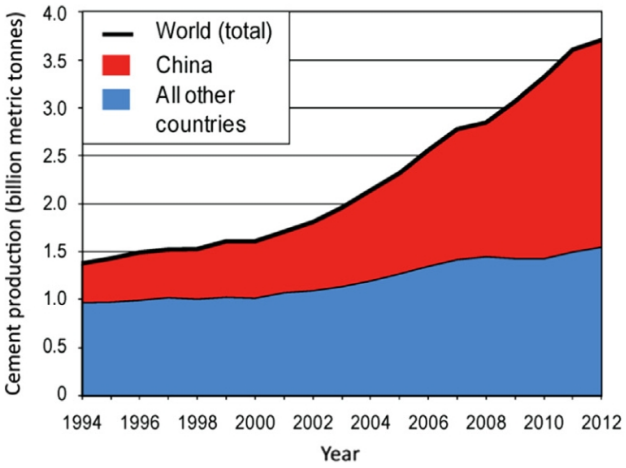


Figure 4 : Fig. 2. Left: Cement production from 1994 to 2012 in billion metric tonnes. Sources: Emissions of CO2 — from Cement Production (CDIAC) as in UNEP Environment Data Explorer (EDE, 2014). Right: Emissions of carbon dioxide from cement production in China. (Peduzzi, 2014, p. 212)

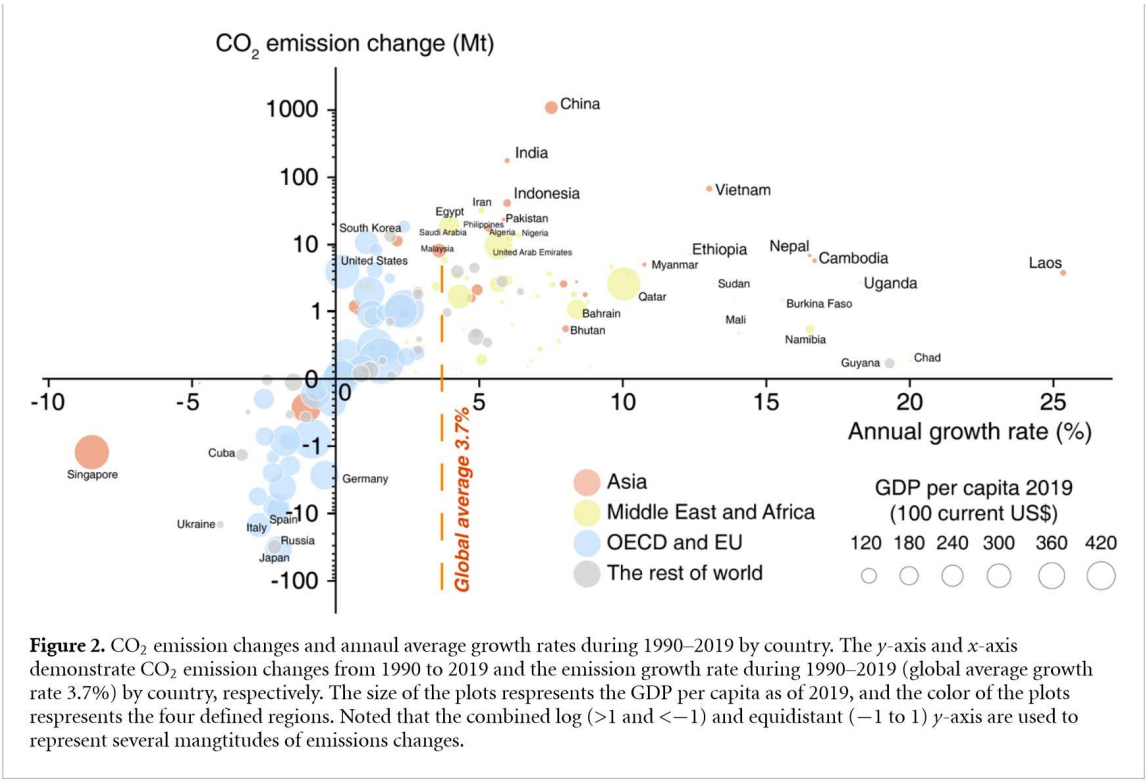


Figure 2. CO_2 emission changes and annaul average growth rates during 1990–2019 by country. The *y*-axis and *x*-axis demonstrate CO_2 emission changes from 1990 to 2019 and the emission growth rate during 1990–2019 (global average growth rate 3.7%) by country, respectively. The size of the plots respresents the GDP per capita as of 2019, and the color of the plots respresents the four defined regions. Noted that the combined log (>1 and <−1) and equidistant (−1 to 1) *y*-axis are used to represent several mangtitudes of emissions changes.

Figure 5 : évolution des émissions de CO2 par pays, selon le taux de croissance économique (Chen et al. 2022)

Les émissions de GES liées à l'industrie de l'acier et de l'aluminium représentent 7.2 % des émissions globales. 55 % de l'acier produit est employé dans le bâtiment et les infrastructures, représentant 4 % des émissions globales.

- Dans le secteur de la construction, c'est le béton armé qui consomme la majeure partie de la production de ces deux matériaux. S'y ajoute les granulats, dont la consommation d'énergie et les émissions associées sont principalement liées à leur extraction, transformation et transport. Pour le sable et les graviers, ces consommations ne sont pas considérable par tonne produite mais le sable étant la ressource la plus consommée dans le monde après l'eau (Peduzzi 2014), les impacts associés sont significatifs. Mais l'extraction deces granulats ont d'autres impacts plus conséquents sur la société et l'environnement (voir plus loin XXX).

1.3.1.1.3.2 Briques cuites et verre

Les procédés de production de briques cuites et de verre émettent environ 3 % des émissions globales de GES (UNEP 2022). Ici aussi, ce sont les étapes de cuisson qui sont les plus énergivores, suivi du transport.

1.3.1.1.3.3 Isolants thermiques et hydriques : Plastiques et laines minérales

En 2017, le marché des isolants était composé de 50% de laines minérales, 40% de mousses alvéolaires, et seulement 7% d'isolants considérés comme bio-sourcés (Batiactu 2018).

La laine de roche est composée de basaltes fondus à 1500°C mélangés à des liants artificiels. Ici encore, la consommation d'énergie est considérable. S'y ajoute la pollution atmosphérique associée.

La quantité de matières plastiques employés dans le bâtiment est croissante, comme pour les autres secteurs (fig. XXX).

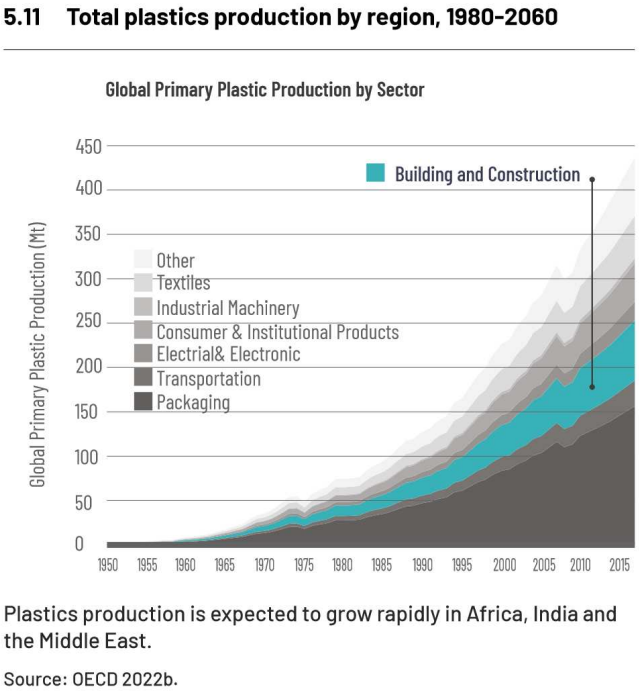


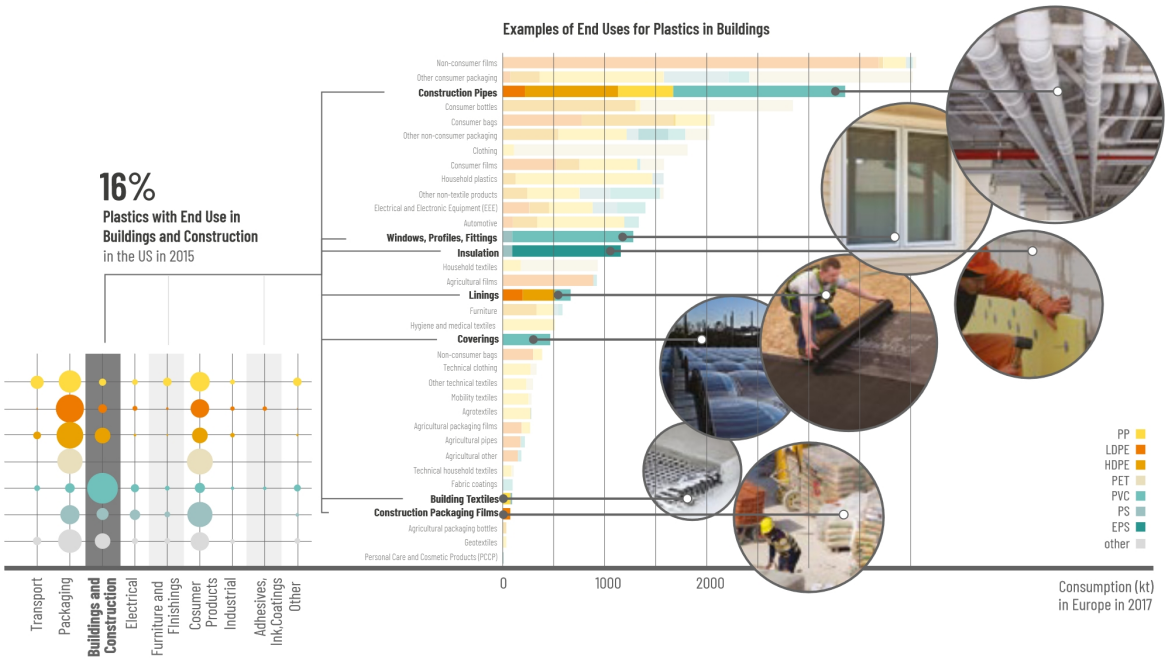
Figure 6 : (UNEP et YCEA, 2023, p. 54)

La fabrication des mousses alvéolaires pour l'isolation est à l'origine de l'émission de gaz fluorés et chlorés dont l'impact sur le réchauffement climatique est très important (Lecompte 2019)

La consommation énergétique liés à ces matériaux est principalement liée à la production des résines plastiques. A ce jour, seul 1 % des plastiques sont issus de biomasse, le reste est issu de la pétrochimie ; et seul 50 % de ces bioplastiques sont biodégradables (UNEP & YCEA 2023:56). Leur impact climatique est pour l'instant inférieure à celle des matériaux de structure, mais leur emploi est croissant pour l'isolation des bâtiments. Cependant, c'est surtout en fin de vie que les impacts environnementaux sont problématiques (voir déchets XXX).

5.12 End uses of polymers for the buildings and construction industry

Most plastics are used in the building sector for pipes, windows, insulation, lining and coverings.



Note: The figure shows the mostly widely used plastic polymers in the USA (left) and Europe (right). PP = polypropylene, LDPE = low-density polyethylene; HDPE = high-density polyethylene, PET = polyethylene terephthalate, PVC = polyvinyl chloride, PS = polystyrene, EPS = expanded polystyrene. Source: Di *et al.* 2021; Kawecki, Scheeder and Nowack 2018.

Figure 7 :
(UNEP et YCEA, 2023, p. 55)

En observant les procédés de fabrication des matériaux conventionnels, on constate que l'énergie grise et les émissions de GES du secteur du logement sont principalement attribuées aux procédés de cuisson des matériaux. S'ensuit le transport, qui devient prépondérant pour les matériaux non cuits tels que les granulats (Morel et al. 2001).

Les enjeux concernant l'énergie et les émissions de GES associées dans le secteur du logement ne sont pas les mêmes selon la situation économique (UNEP & YCEA 2023:18).

Dans le Sud Global, la croissance démographique et l'exode rural induisent une intensité de construction de bâtiments neufs considérable, et la consommation d'énergie liée à la climatisation est croissante. Ces logements étant construits de plus en plus avec des méthodes conventionnelles sans objectif de performance thermique, l'impact de l'énergie grise autant que l'impact de l'énergie en vie de service est en croissance rapide. L'abandon des méthodes de construction traditionnelles en matériaux locaux pour une construction conventionnelle béton/terre-cuite est problématique pour l'efficacité hygrothermique mais surtout pour l'énergie grise.

En revanche, dans le Nord Global (dont la France), la consommation d'énergie en vie de service est historiquement haute, et le nombre de logements construits annuellement est constant, malgré une très faible augmentation de la population. L'énergie en vie de service n'augmente plus du fait des amélioration des performances thermique des bâtiments neufs et du taux de rénovation thermique. En revanche, l'énergie grise des bâtiments

neufs continue d'augmenter, car les solutions conventionnelles utilisent les mêmes matériaux pour la structure (béton/terre cuite) tandis que des épaisseurs croissantes d'isolants conventionnels sont ajoutées à l'enveloppe (laines minérales, plastiques) (fig. XXX).

1.3.1.1.4 Extractivisme

Le plus gros flux matériel dans la société humaine après l'eau est constitué des matériaux de construction. Leur consommation mondiale a décuplé pendant la deuxième moitié du 20e siècle (Krausmann et al. 2009) et pourrait encore doubler en 2060 (OECD 2018) .

Les granulats minéraux, terme les sables et les graviers, représentent le volume de matériau les plus extraits dans le monde (68 à 85%), et leur intensité d'extraction est croissante. (Peduzzi 2014)



Illustration 1: Carrière de sable en Loire-Atlantique (44). © T.Mamberti - www.gsm-granulats.fr

Le suivi de leur extraction et utilisation est difficile, mais en estimant la consommation dans chacun de leurs usages principaux, on constate que les 50 milliards de tonnes d'agrégats consommés chaque année (UNEP 2019) sont principalement employés dans la construction, notamment dans l'industrie du béton : pour chaque tonne de ciment, un mélange de béton nécessite 6 à 7 tonnes de sable et graviers (Peduzzi, 2014, p. 208). Ils sont également consommés dans les enrobés routiers, les travaux d'expansion côtière (par exemple, à Singapour), et d'autres transformations industrielles (verre par exemple) (Peduzzi 2014). En France, le sable est également employé dans le maraîchage industriel,

pour alléger la structure ou remonter le pH des sols de culture (Chambre d'Agriculture de Bretagne 2011).

L'extraction du sable a des impacts environnementaux considérables dans les écosystèmes d'extraction, principalement les fonds marins et les lits de rivières (Peduzzi 2014)(voir figure xxx).

Par ailleurs, le sable marin est salé, ce qui pose des problèmes de qualité pour son emploi dans le béton : le sel empêche la prise et est source de corrosion pour les fers à béton (Peduzzi 2014). Il doit être lavé, ce qui consomme approximativement 2 tonnes d'eau douce et 1.8 MJ d'énergie par tonne de sable (Guo et al. 2020).

Malgré son abondance apparente, le sable du désert (dit « éolien ») ne peut pas être

Table 1
Summary of the main consequences of extraction of aggregates.

Biodiversity	Impacts on related ecosystems (for example fisheries)
Land losses	Both inland and coastal through erosion
Hydrological function	Change in water flows, flood regulation and marine currents
Water supply	Through lowering of the water table and pollution
Infrastructures	Damage to bridges, river embankments and coastal infrastructures
Climate	Directly through transport emissions, indirectly through cement production
Landscape	Coastal erosion, changes in deltaic structures, quarries, pollution of rivers
Extreme events	Decline of protection against extreme events (flood, drought, storm surge)

Figure 8 :
(Peduzzi, 2014, p. 209)

employé dans le béton ni l'expansion côtière, car l'érosion causée par le vent polit la surface des grains ce qui réduit leur cohésion (Peduzzi 2014).

Le sable issu de roches concassée pourrait être une alternative aux sables sédimentaires, mais d'une part le concassage nécessite de grandes quantités d'énergie, d'autre part les sables concassés sont - à l'inverse du sable éolien - trop anguleux, ce qui empêche une bonne compaction du béton.

Les impacts « environnementaux » ont également des répercussions sur les populations humaines alentours. L'érosion côtière liée au dragage des sédiments marins en est une (Driffort 2021), particulièrement parce qu'elle s'ajoute à la montée du niveau des océans causée par le changement climatique (Peduzzi 2014). On observe aussi des réductions de la qualité et de l'accès à l'eau liée à sa pollution par des sédiments et au drainage des nappes phréatiques (Peduzzi 2014).

Les systèmes de fluides (chauffage, climatisation, ventilation) et les systèmes électroniques, notamment avec l'arrivée de systèmes domotiques, consomment de plus en plus de « terres rares » et métaux. Des intérêts environnementaux ou économiques sont généralement présentés pour justifier leur emploi. Pourtant, ces ressources sont issues de systèmes d'extraction minière, qui induisent destruction de milieux naturels, production de quantités gigantesques de déchets hautement toxiques pour les milieux, dont les accidents de stockage arrivent régulièrement (Hudson-Edwards 2016).

De plus, nombre de ces éléments sont en voie d'épuisement, comme par exemple le cuivre (Gordon et al. 2006).

L'extractivisme 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). Au vu des matériaux extrait et de leur intensité d'extraction pour les activités de construction, ce secteur peut être considéré comme extractiviste. Les sociétés humaines doivent rapidement réduire les rythmes d'extraction existants tout en s'assurant qu'il n'y a pas de reports sur d'autres formes d'extractivisme (exemple de la robotisation).

1.3.1.1.5 Déchets

1.3.1.1.5.1 Origine des déchets

Avec seulement un demi siècle de recul, nous constatons aujourd'hui la rapide obsolescence des systèmes constructifs conventionnels diffusés dans le Nord Global à partir de la seconde guerre mondiale. L'image de ces matériaux est associée à la pérennité, à la solidité, au Progrès. Pourtant, leur durée de vie est limitée : partout au Nord Global, les structures en béton se dégradent et doivent être remplacées seulement quelques dizaines d'années après leur édification (UNEP & YCEA 2023). Ces matériaux ne sont pas démontables, ni réemployables.

1.3.1.1.5.2 quantité et types de déchets

La consommation massive de ressources non biodégradables couplée à l'obsolescence du parc ainsi bâti entraîne une production de déchets considérable : le secteur de la construction serait responsable de 33 à 50 % des déchets produits en Europe. En France, cette proportion est de 40 %, ce qui équivaut à 42 million de tonnes de déchets par an en France, soit plus de 600kg par français.e.

Les estimations fluctuent en fonction de ce qui est considéré comme un « déchet », un « co-produit » ou une « ressource ». En effet, les cycles de vie des produits du bâtiment ne sont jamais parfaitement circulaires ou linéaires. A chaque étape de transformation de la matière (réemploi, recyclage, valorisation), il y a une perte qui peut être par exemple :

- d'ordre qualitative : un matériau transformé sera moins performant pour le même usage,

- d'ordre quantitative : une partie du matériau est perdue au cours de la transformation, ou un autre matériau est consommé pour la transformation (ex : énergie)

On classe alors souvent les matériaux dans des catégories selon leur potentiel de réemploi (réemploi = terme général ? XXX) :

Réversible : le matériau est réemployable pour le même usage, sans perte de qualité, et à peu de frais de transformation. C'est le cas du matériau terre crue et de la pierre maçonnée à la terre, leur durcissement s'effectuant par évaporation de l'eau, l'immersion du matériau le rend mobilisable à nouveau. C'est aussi le cas d'éléments démontables comme les structures en bois.

recyclable

valorisable

(xxx en fait tout ça c’est un peu mélangé : dans valorisable il y a compostable, mais composter pour refaire de la biomasse c’est un peu recycler ? En tout cas c’est une meilleure valorisation que le remblai routier)

A chaque étape, même pour les matériaux réversibles, il y a de petites pertes : les éléments de bois démontés sont retaillés, se raccourcissent, et perdent en potentiel de réemploi. Le béton de ciment est un cas extrême, car seule une faible quantité peut réintégrer le cycle à chaque étape

Une fraction faible est revalorisée (utilisée, avec éventuellement une étape de transformation, pour un usage « inférieur » à l’usage initial), et une fraction très faible est recyclée (utilisée plus ou moins pour le même usage

A noter que les limites entre ces définitions sont floues : tous les déchets sont recyclables si l’on autorise l’emploi d’une quantité infinie d’énergie ; et aucun matériau n’est réversible si l’on ne fait rien pour le remettre en œuvre. C’est une question d’échelle : la terre est réversible car il « suffit » de la tremper dans l’eau sur site, tandis que le plastique est potentiellement recyclable, s’il est trié, transporté et refondu à haute température avant d’être réintégré au cycle de production. Il semble que la classification des matériaux dans ces catégories dépend de le rapport entre la fraction effectivement réemployée et celle mise en décharge, qui témoigne de la « facilité » (économique) du réemploi.

Les déchets de construction et de démolition issus du secteur du bâtiment constituent le plus gros flux de déchets (?) solides.

La Figure 0-3 présente les 5 principaux types de déchets produits par le secteur du bâtiment. On constate que les premières sources de déchets sont les terres. Ces déchets peuvent néanmoins avoir un impact négatif sur l’environnement [32–34] et il est de plus en plus difficile de trouver de l’espace pour les enfouir ou les réutiliser [34,35]. » (Vinceslas, 2019, p. 26)

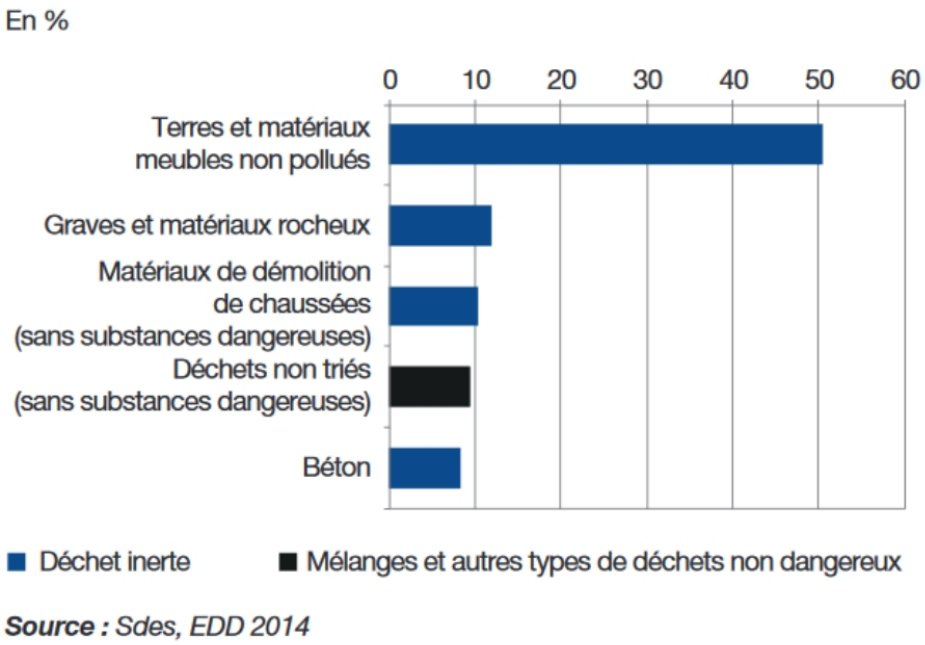


Figure 0-3: Principaux types de déchets du bâtiment [36]

36 dans (Vinceslas 2019)

1.3.1.1.5.3 le flux métabolique considérable

La production de déchets liée au logement est intimement liée à l'emploi de granulats naturels. D'un côté, les déchets sont majoritairement constitués de produits composés de ces granulats faiblement recyclables. De l'autre, leur extraction des écosystème facilite l'économie des déchets de construction en mettant à disposition des carrières à remblayer. Cela crée un flux aller-retour de matériaux considérable entre les espaces construits et les espaces d'extraction, par exemple en Île-de-France :

> "Une étude de métabolisme territorial concernant Paris et son premier territoire administratif englobant, l'Île-de-France, a pu montrer que les extractions franciliennes vis-à-vis du système naturel sont, pour ce qui concerne la matière solide, en majorité (72 %) constituées de minéraux visant à alimenter le secteur économique de la construction. De même, la plus grande partie (86 %) des rejets solides mis en décharge est constituée de matériaux issus des secteurs de la construction et de la déconstruction (Barles, 2007)" (Fernandez 2018)

1.3.1.1.6 [a rédiger] Terres d'excavation

- reprendre les chiffres dans le doc « grand paris »

Fédération Nationale des Travaux publics syndicat terrassiers – chiffres terrassement

160 Mt de terres excavées / an (Ademe 2012, 2017) (Florence)

(voir si ça se précise dans terrassement)

Terres d’excavation. Une ressource fossile directement gaspillée.

- l’altitude moyenne du departement de seine et marne = +1m en 1 siècle. Source ?

Vincent augiseau la dimension materielle de l’urbanisation flux et stocks de mat de constr en idf

> ref pas trouvée

Among these construction wastes, about 75% consist of soils and stones [5,6]. As already highlighted for cob in Brittany, the earth building sector has a strong reuse potential for earthwork wastes [7]. Planning authorities and earthwork contractors need a decision tool to be able to identify the potentially reusable material among their excavated soils.” (Rojat et al. 2020)

- questionnement terre crue comme « poubelle » des terrassiers, ici ou plus loin dans tech écologiques ?

1.3.1.1.7 Artificialisation irréversible des écosystèmes

En France, entre 1960 et 2010 les surfaces artificialisées ont doublé passant de 2,5 à 5 millions d’hectares (Agreste 2022). Les deux-tiers de l’artificialisation des terres se sont effectués aux dépens des terres agricoles, et un tiers aux dépens des espaces naturels et forestiers (Agreste 2022). Le rythme est rapide, même comparé aux autres pays d’Europe : pour 100 000 français.es, 47 km2 sont artificialisés chaque année, contre 26 en Italie, et 30 en Espagne (Frane Stratégie 2019). Précisons que deux-tiers des sols artificialisés sont imperméabilisés, principalement revêtus ou stabilisés, destinés aux routes, trottoirs, parkings, aéroports, installations portuaires, zones commerciales et entrepôts logistiques (Terre de Liens 2022).

Pourtant, les externalités négatives de l’artificialisation des sols sont considérables et connus de longue date :

> « Les sols scellés sont à la fois les plus pauvres en activité biologique et biodiversité, les plus susceptibles de provoquer le ruissellement des eaux pluviales, et à contribuer à la formation d’îlots de chaleur urbains » (Terre de Liens 2022)

- **rétention de l’eau** : un sol parfaitement fonctionnel peut stocker jusqu’à 3 750 tonnes d’eau par hectare. Imperméabiliser, c’est empêcher d’utiliser cette capacité de rétention d’eau des sols et de la végétation qui s’y développe (Directorate-General for Environment (European Commission) 2012), donc augmenter le risque de crue et d’inondation (ADEME 2018), les épisodes de sécheresse et le recours à l’irrigation, alors que les événements extrêmes se multiplient ((IPCC 2023), voir 1.2.1.1). C’est aussi empêcher l’infiltration vers les nappes souterraines, qui alimentent les villes en eau potable.

- **biodiversité** : l'artificialisation élimine directement la biodiversité du sol et indirectement la plupart des espèces locales qui en dépendent pour se reproduire, nidifier ou s'alimenter (Bechet et al. 2017). C'est également un morcellement des habitats des animaux qui doivent notamment traverser les routes pour accéder aux ressources dont ils ont besoin. (Bechet et al. 2017; ADEME 2018)

- **îlots de chaleur urbains** : les sols scellés contribuent à la formation d'îlots de chaleur urbains (Bechet et al. 2017)

Le secteur du BTP est bien évidemment ouvrier de cette artificialisation, dont une partie est commandée par d'autres secteurs. Plus d'un tiers des surfaces scellées sont dédiées à l'habitat, le reste étant partagé entre les infrastructures de transport et les locaux non habités (Figure 9). Mais l'impact au sol de la construction de bâtiments ne se limite pas à la surface dédiée à l'habitat, car c'est l'organisation urbanistique qui induit la division triangulaire des activités de la vie quotidienne : logement, travail, consommation. Ce modèle urbanistique augmente les distances et induit la construction massive d'infrastructures de transport, la spécialisation des locaux dont certains sont utilisés le jour, d'autres la nuit.

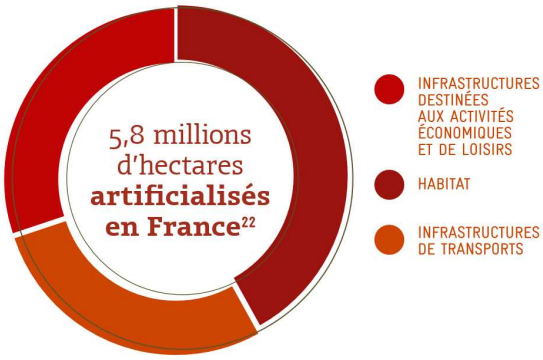


Figure 9 : répartition de l'usage des surfaces artificialisées en France (Terre de Liens 2022)

Les outils réglementaire mis en place depuis les années 2000 n'ont pas suffi a endiguer la vague de bétons dévoreuse de terres (Terre de Liens 2022).

En effet, l'artificialisation reste économiquement favorable : 1) l'augmentation du prix des terres artificialisées en périphérie urbaine est considérable et représente une plus value pour les entreprises d'aménagement ; 2) le fonctionnement du financement public local favorise l'expansion urbaine, vers une augmentation de « l'attractivité » (activité économique et augmentation de la population), alors que les emplois créés sont souvent contrebalancés par le déclin des centres urbains (Bechet et al. 2017) ; 3) la réhabilitation des espaces déjà artificialisée (démolition, dépollution, etc.) est économiquement défavorable face à l'exploitation de nouvelles surfaces (Terre de Liens 2022).

C’est pourquoi la majorité des bâtiments sont donc construits sur des espaces agricoles et forestiers : entre 2005 et 2013, seulement 41% des nouveaux bâtiments ont été construits en zone déjà urbanisée en 2005 (INSEE 2017, dans (Terre de Liens 2022)).

L’échec des politiques d’endiguement de l’artificialisation est explicite lorsqu’on constate que la plupart des projets ne représentent pas de réels besoins et/ou d’efforts d’évitement : la construction de logements se poursuit en majeure partie dans des zones où l’accès au logement n’est pourtant pas un problème (CGDD 2018), et plus de la moitié des surfaces artificialisées le sont pour de l’habitat individuel (Agreste 2015).

La désartificialisation est longue et complexe, énergivore, et à ce titre coûte cher : déconstruire, dépolluer, désimperméabiliser, décompacter, réintroduire de la végétation et le reconnecter aux écosystèmes naturels environnants coûterait entre 90 et 300 € par mètre carré de sol, soit pour les 570 km2 artificialisés par an en France, un coût entre 50 et 170 milliards d’euros (Levrel 2020).

L’objectif final de *zéro artificialisation nette* des sols en 2050 fixé par la loi française sous-entend que l’on peut compenser la perte de surface par une récupération. Cependant, la recréation des fonctionnalités d’un sol à partir d’une surface artificialisée est un processus quasi irréalisable (Terre de Liens 2022). En réalité, seule un objectif de réduction de l’artificialisation *brute* est donc réaliste pour protéger les terres.

1.3.1.1.8 Le terrassement du vivant

Dans un contexte d’abondance énergétique, sceller une surface par coulage de bétons à prise hydraulique est presque instantané. Sa destruction est en revanche plus chronophage et ne permet pas un retour total à l’état initial. Les techno-systèmes conventionnels libèrent dans l’environnement un ensemble de composés indestructibles à l’échelle temporelle des êtres vivants, qu’ils soient physiquement indestructibles (comme les divers bétons) ou chimiquement inaltérables (perticides, produits chimiques de synthèse, plastiques...). Leur dispersion est irréversible par entropie : ils sont dilués dans les écosystèmes (sols, océans, atmosphère), et leur épuration est considérablement plus difficile que leur libération. Ces composés sont *volontairement* inaltérables, ce qui est considéré comme avantageux pour la société humaine actuelle qui les emploie. Pourtant, c’est cette irréversibilité qui est à l’origine de leur accumulation dans les milieux naturels et des problématiques sociétales qui en découlent.

Comme la réversibilité, la diversité est combattue par le modèle de production industriel. Les techniques sont standardisées pour faciliter la centralisation des procédés de fabrication et de décision. Ce faisant, au lieu d’adapter la technique à son environnement, c’est l’environnement qui soit y être adapté par les chantiers de terrassement : la diversité écosystémique écosystémique (zones humides, topographie, végétation) devient alors un problème plutôt qu’une ressource. La rationalisation se confronte à la diversité, même dans le champ juridique, où les défenseurs du vivant s’attachent à identifier la diversité des écosystèmes menacés par des chantiers d’artificialisation pour ralentir la progression de la technosphère en invoquant les lois relatives aux milieux ou espèces protégées.

1.3.2 « société »

1.3.2.1 Accès au logement

1.3.2.1.1 Besoins quantitatifs: personnes sans logements et mal logées

Le droit au logement est reconnu dans plusieurs textes internationaux dont la Déclaration universelle des droits de l'homme. En France, il découle de la constitution, où la collectivité doit assurer à chacun « des moyens convenables d'existence ».

Il est difficile de définir ce qu'est un logement. En première approche, il s'agit d'une « fin » qui ne définit pas les moyens. La qualité de ce qui définit un logement décent n'est donc pas universelle et reste difficile à définir, du fait de la diversité des manières d'habiter qu'ont développé les sociétés humaines :

« Le logement est une notion proche de celle d'habitat. Toutefois la satisfaction obtenue d'un logement est un rapport entre équipements et besoins, ce qui est loin d'épuiser le rapport entre habitat et mode de vie. Le logement n'est donc pas l'habitat. »

Dans le contexte du confort moderne, un logement décent est défini selon les équipements dont il est composé : accès à l'eau potable, toilettes, etc. Ces commodités sont admises pour des questions réglementaires, mais en pratique il est impossible les besoins des habitant.es et d'homogénéiser ces besoins pour un « individu moyen ».

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 a 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 situations les plus graves, 12,1 millions de personnes sont touchées à des degrés divers par la crise du logement. (Fondation Abbé Pierre, 2022, p. 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 elles.eux 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 elles.eux. 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, p. 114).

Notons par exemple la grande mascarade du nettoyage de Paris pour les Jeux Olympiques, où des milliers d'habitant.es des logements Crous, de contrat de location précaires et de sans domiciles ont été expulsées de leur lieu de vie pour respectivement « libérer des logements pour les athlètes », maximiser le profit de la rente qui promettait d'exploser pendant ces périodes, ou invisibiliser la misère locale dans les médias internationaux. Comment suivre et accompagner les parcours de ces personnes pour les organisations qui peinent à maintenir le lien, lorsque non seulement les collectivités ne proposent aucune solution de relogement durable, mais de surcroît criminalisent et punissent les mal-logé.es ?

Le nombre de personnes sans domicile est en croissance : +58 % en moyenne entre 2001 et 2012 dans les agglomérations 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.

Le mal logement, ce n'est pas que l'absence totale de logement. C'est aussi ce qu'on appelle la « crise du logement » en France, qui se matérialise par des difficultés durables à accéder à un logement convenable. Il est estimé que « 5,1 millions de personnes [vivant en France] dans un logement ordinaire ont été dans le passé privées de logement personnel de manière durable et non choisie », hébergées « par la famille ou des amis », sans domiciles, et pour des durées d'au moins un an pour 60 % d'entre elles, d'au moins 3 ans pour 30 % d'entre elles.

L'impossibilité d'accéder à un logement est vécue par un nombre considérable de personnes en France, et la situation continue de se dégrader.

Sur le temps long, il y a une tendance durable : la taille des ménages se réduit. C'est une des composantes du besoin croissant de logements, car les surfaces et les équipements sont partagées la plupart du temps à l'échelle du ménage. Leur division accroît quantitativement l'espace nécessaire par habitant.e.

Mais ce changement est très lent et progressif et n'est pas significatif dans les dynamiques contemporaines.

En sept ans, la demande de logement social a progressé cinq fois plus vite que le nombre de ménages et deux fois plus vite que le nombre de logements sociaux, pour atteindre 2,2 millions de ménages.

Une partie du parc de logements sociaux est obsolète, car les modes constructifs de l'époque ne permettent pas de réhabilitation satisfaisante. Ainsi, face à la demande croissante d'accès au logement, la construction de nouveaux logements sociaux doit à la fois « répondre aux besoins de la population et renouveler le parc le plus dégradé » (Fondation Abbé Pierre, 2022, p. 16). Pourtant, la politique de construction de logements sociaux est insuffisante : depuis quelques années, le nombre de logements sociaux construits baisse, notamment « sous l'effet des coupes budgétaires de l'État dans les fonds propres des organismes Hlm » (Fondation Abbé Pierre, 2022, p. 16). « Les aides publiques au secteur du logement, exprimées en pourcentage de PIB, diminuent depuis 10 ans et n'ont jamais été aussi basses (1,6 % du PIB en2020) alors que les recettes fiscales que rapporte le logement à l'État ont plusque doublé en 20 ans (79 milliards d'euros). » (Fondation Abbé Pierre 2022)

Le rapport insiste sur le fait que la production de logements « est particulièrement inadaptée aux ménages à bas revenus, dans un contexte économique qui tend à les précariser. ». Le problème est « structurel », il y a une pénurie durable de « logements abordables et bien situés ».

Le mal logement découle bien plus de la croissance des prix du logement que de l'accroissement du nombre de ménages. Depuis 20 ans, le prix des logements n'a fait que croître pour atteindre une hausse de plus de 154 %.

- pourquoi augmentation des prix ? Spéculation foncière principalement. Ref

1.3.2.1.2 Qualité des logements : insalubrité, précarité énergétique, impacts sanitaires des matériaux

Le rapport de la Fondation Abbé Pierre alerte également sur la précarité énergétique, composante du mal logement :

> « Au total et sans doubles comptes, 12 millions d'individus étaient en situation de précarité énergétique en 2013, appartenant à 5,6 millions de ménages (soit 20 % des ménages) dont 2,3 millions de ménages modestes. » (Fondation Abbé Pierre, 2022, p. 186)

Plus d'un français sur 10 a froid en hiver dans son logement (ONPE 2014). Le froid n'est pas qu'une sensation, et les impacts sanitaires sont avérés : maladies et décès liés au froid existent même dans les pays industrialisés et à l'échelle mondiale, la World Health Organisation et l'ONPE considèrent que 40 % des décès liés au froid pourraient être évités par une isolation convenable des bâtiments (ONPE 2018; World Health Organisation (WHO) 2007). De meilleures performances thermiques, notamment sur le plan de l'inertie (voir XXX), permettraient également d'améliorer les températures

intérieures en été, alors que la souffrance et les décès liés aux épisodes caniculaires augmente avec l'intensité et la fréquence de celles-ci. En effet, le changement climatique pourrait exacerber les inégalités face à l'accès à des bâtiments climatisés et les impacts sanitaires associés (Sarofim et al. 2016).

Une isolation thermique efficace augmente également l'isolation acoustique. Plus de 65% des Européens sont concernés par un inconfort ou des problèmes sanitaires liés au bruit (European Union 2013).

1.3.2.1.3 Matériaux toxiques dans les logements

Le nombre et l'intensité des cancers est en forte hausse depuis la fin du 20^{e} siècle: +47% entre 1980 et 2005. Une fraction significative est attribuée à l' « environnement » de vie des personnes (estimations très variables, entre 5 et 80% selon ce qu'on considère comme l'« environnement » ou les « choix personnels »). Notamment, 4 à 8 % des cancers seraient liés aux expositions professionnelles.

A noter que certains affirment que l'environnement pourrait être impliqué à un stade ou un autre dans l'apparition de 80 % des cancers : ce chiffre est à interpréter avec beaucoup de prudence. Tout d'abord, il s'agit d'une hypothèse qui repose sur une définition très large de l'environnement comprenant les risques biologiques, les facteurs liés aux comportements individuels, modes de vie et l'environnement socio-économique (tout ce qui est non génétique). Ensuite, cette hypothèse tient compte du fait que le développement d'un cancer (cancérogénèse) résulte d'une accumulation de plusieurs altérations successives tout au long de la vie d'un individu, et est la conséquence d'une association de plusieurs facteurs, appelés facteurs de risque, dont le rôle et l'importance dans le développement de la maladie sont très variables. » (Anon s. d.)

Parmi les facteurs d'exposition environnementale, de nombreux composants présents dans les matériaux de construction participent au facteur de risque. Par exemple, les composants organiques volatils (COVs) aux effets cancérogènes possibles ou avérés :

L'acétaldéhyde (*cancérogène possible* – ex : « matières plastiques, panneaux de bois brut et de particules, isolants »),

Le dichlorométhane (*cancérogène possible* – ex : « décapage de bois et métaux, vernis, laques, colles, adhésifs, aérosols »)

Le benzène (*cancérogène avéré* – ex : « matériaux de construction et d'ameublement, produits de bricolage et d'entretien »)

Le formaldéhyde (*cancérogène avéré* – ex : « utilisé comme désinfectant ou biocide, comme fixateur et comme liant dans des résines (produits de bricolage, entretien, revêtements des murs, sols, meubles, plastiques, etc) »)

(Anon s. d.)

Tout produit traité avec des RFB en relargue constamment dans l'environnement, de sa production jusqu'à son élimination. Les principales sources d'émission sont donc les usines de synthèse, d'utilisation, de destruction ou de recyclage de ces composés, mais principalement les produits en eux-mêmes. Ils contaminent ainsi **l'air, les sols et l'eau**.

1.3.2.1.4 Quelles priorités pour le mal logement ?

	ménages	personnes
4,1 millions de personnes mal logées		
Personnes privées de logement personnel		
dont personnes sans domicile(1)		300 000
dont résidences principales en chambres d'hôtel(2)	21 000	25 000
dont habitations de fortune(3)		100 000
dont personnes en hébergement « contraint » chez des tiers(4)		643 000
TOTAL		**1 068 000**
Personnes vivant dans des conditions de logement très difficiles		
dont privation de confort(5)	939 000	2 090 000
dont surpeuplement « accentué »(6)	218 000	934 000
TOTAL sans double compte	**1 123 000**	**2 819 000**

	ménages	personnes
« Gens du voyage » subissant de mauvaises conditions d'habitat(7)		208 000
Résidents de foyers de travailleurs migrants non traités(8)		31 000
TOTAL des personnes mal logées (a) (sans double-compte)		**4 126 000**

Figure 10: État du mal logement en France, selon la Fondation Abbé Pierre (2022). Le détail des sources est présenté dans le rapport original.

12,1 millions de personnes fragilisées par rapport au logement		
	ménages	personnes
Propriétaires occupant un logement dans une copropriété en difficulté[9]	518 000	1 123 000
Locataires en impayés de loyers ou de charges[10]	493 000	1 210 000
Personnes modestes en situation de surpeuplement modéré[11]	1 055 000	4 299 000
Personnes modestes ayant eu froid pour des raisons liées à la précarité énergétique[12]	1 443 000	3 558 000
Personnes en situation d'effort financier excessif[13]	2 713 000	5 732 000
TOTAL des personnes en situation de fragilité (b) (sans double compte)	**4 952 000**	**12 138 000**

Pas possible d'éviter les doubles comptes dans cette estimation rapide.

Personnes concernées par le manque quantitatif de logements (neuf) : 1068 + 934 + 31 + 4299 = **6 331 000** (dont manque total de logement 300 000)

Personnes concernées par le manque qualitatif de logements (rénovation) : 3558 + 1123 + 2090 = **6 771 000**

Personnes concernées par les contraintes financières et juridiques liées au logement : 208 + 1210 + 5732 = **7 150 000**

1.3.2.2 Fabrication des logements : inégalités et violences dans la construction conventionnelles en France

Dans le monde les inégalités de genre se manifestent de manières diverses, mais on retrouve globalement la dimension du travail non ou peu rémunéré, notamment pour les travaux durs ou dangereux, ainsi que les différences de traitement à compétence égale. En France, on constate surtout une absence quasi totale des femmes dans les métiers manuels de la construction, notamment dans la maçonnerie conventionnelle (Jounin 2008).

La surexploitation de la main d'oeuvre dans le secteur du bâtiment est corrélée à l'externalisation du travail. En France, les entreprises de travaux délèguent en chaîne des tâches spécialisées. Malgré que les travailleurs se cotoient 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'oeuvre est également invisibilisée par la délégation des tâches et leur délocalisation. La chaîne d'approvisionnement de l'acier est notamment citée pour son manque de

transparence, entraînant des conditions de travail forcé précaires et dangereuses de l’extraction au façonnage des éléments (UNEP & YCEA 2023)

1.4 Conclusion constat

Répondre aux problématiques du logement passe avant tout par la sobriété d’usage (partage) et la rénovation des logements existants.

En ce qui concerne la construction neuve, l’enjeu est d’abord de réduire considérablement le nombre de nouvelles infrastructures. Dans le même temps, remplacer les procédés par des procédés en matériaux naturels, dont la terre crue, peut être pertinent, notamment pour maintenir et diffuser les savoir-faire existants.

Les techniques de construction en terre crue répondant à ces contraintes sont principalement les techniques légères et/ou non porteuses. Les freins « techniques » (on pourra les appeler R&D?) sur ces techniques ne semblent pas conséquents.

Les techniques de construction porteuses répondent principalement à la construction neuve. Leur déploiement est donc moins prioritaire.

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

Qu'est-ce qu'une technique adaptée à la terre à disposition ? Une approche courante dans les recommandations académiques[14] sur les choix techniques, dite de « convenance des terres », consiste en la comparaison de la composition de la terre à disposition à des *références* situant le matériau dans des « classes de convenance » pour chacune des techniques-type. En général, 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 et la pertinence sociale et environnementale des corrections apportées, par exemple par ajout de granulats issus de filières extractivistes. Cette approche dite de « convenance des terres » est à contre-courant des pratiques artisanales courantes visant à adapter la technique au matériau, que l'on pourrait 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 11) (Rojat et al. 2020). D'autres propriétés dites « intrinsèques », c'est à dire qui seraient 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*.

1. Un consensus sur l'inadaptation des références communément employées

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* proposées dans la littérature académique ou dans les normes du secteur de la construction.

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 11).

14 Académique : qui relève de la recherche universitaire, du savoir produit par des professionnels de la production de connaissances (voir lexique). 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.

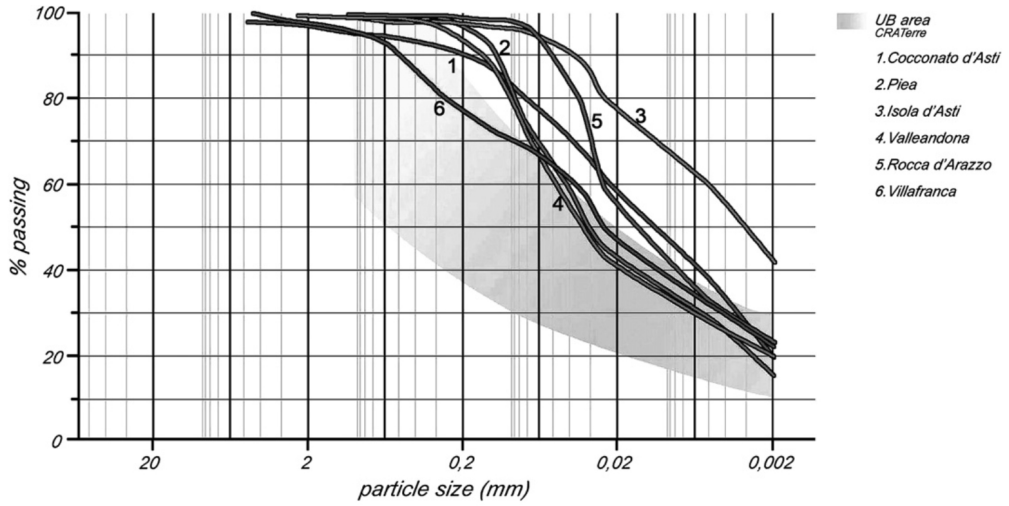


Figure 11 : Distribution granulométrique de 6 échantillons d'adobes comparés au fuseau granulométrique suggéré par Houben et Guillaud (2006) (Pagliolico et al. 2010)

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.

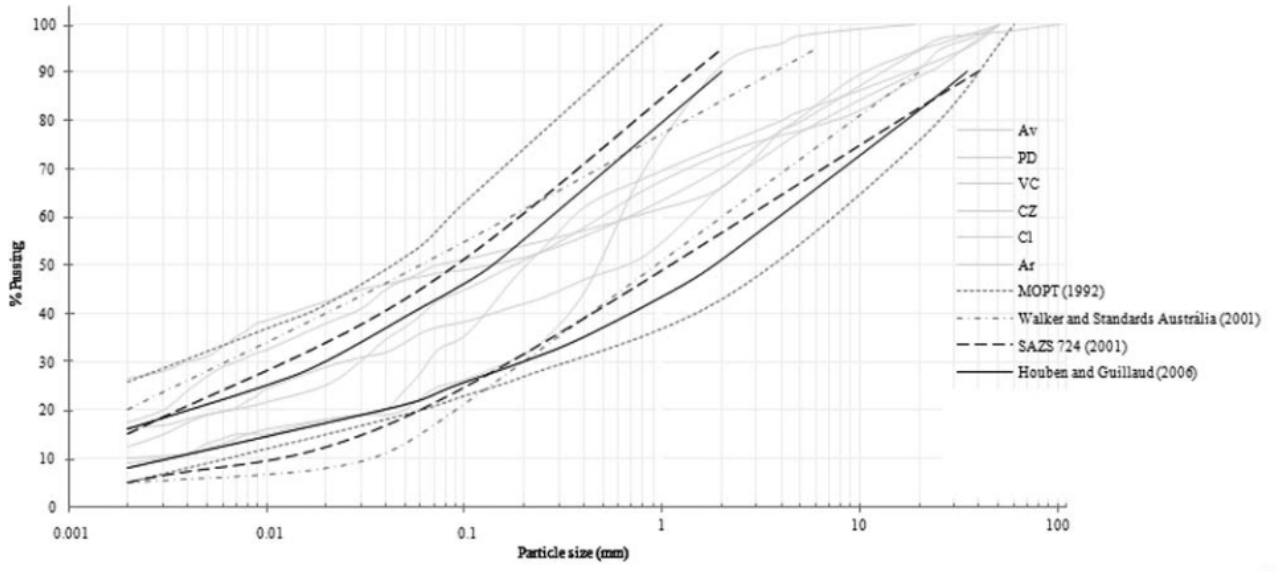


Figure 12 : Distribution granulométrique de 6 échantillons de pisé comparés à différents fuseaux granulométriques (Gomes et al., 2014, p. 13)

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 12). 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 relativement à la résistance mécanique des éléments d’ouvrage et la fragilité de surface (Gomes et al., 2014, p. 13).

Les recommandations sur les limites d’Atterberg[15] comparées aux échantillons analysés amènent à la conclusion que certains sols ne rentrent dans aucune des recommandations. Notamment, deux des sols ne sont mêmes pas assez plastiques pour déterminer la limite de plasticité (LP), ce qui est contradictoire avec la plupart des recommandations suggérant une LP minimum. Pourtant, ici encore, ces bâtiments ont bien été construits, et perdurent après plusieurs siècles de durée de vie.

Pour l’optimum Proctor[16], 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 relativement à celle des recommandations.

Pour la teneur en matières organiques, les auteur.ices remarquent encore un dépassement des seuils suggérés pour 4 des 6 sols testés : ils contiennent plus de 4 % de matières organiques y compris 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.

15 Limites de teneur en eau indiquant des changements de consistance de la terre. Certains sols à comportement très peu plastique ne permettent pas la mesure de limite de plasticité (LP).

16 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 propriétés terre XXX

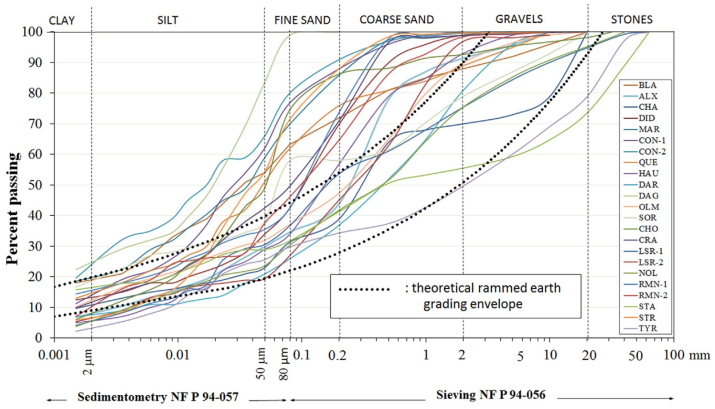


Figure 13 : Distribution granulométrique de 23 échantillons de pisé comparés au fuseau granulométrique de Houben et Guillaud (2006) (Rojat et al. 2020)

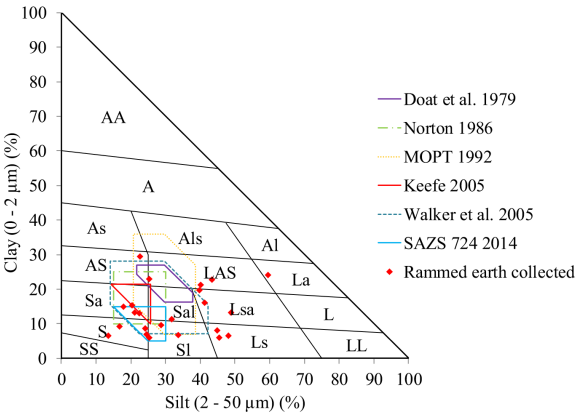


Figure 14 : Texture de 23 échantillons de pisé comparées à différentes recommandations sur la répartition des classes granulométriques, par Rojat et al. (2020).

En ce qui concerne leur teneur en sels, les éléments analysés ne présente globalement pas de teneurs supérieures aux recommandations.

Si l'on considère l'ensemble des recommandations auxquels les sols sont comparés, même les moins restrictives, pour chacune des propriétés, alors aucune terre testée ne serait « convenable » 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 *faisant référence* de 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 13). 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 14). La comparaison aux recommandations relatives aux limites d'Atterberg montre ici aussi que de nombreux sols ne rentrent dans aucune des références suggérées. Quelque 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.

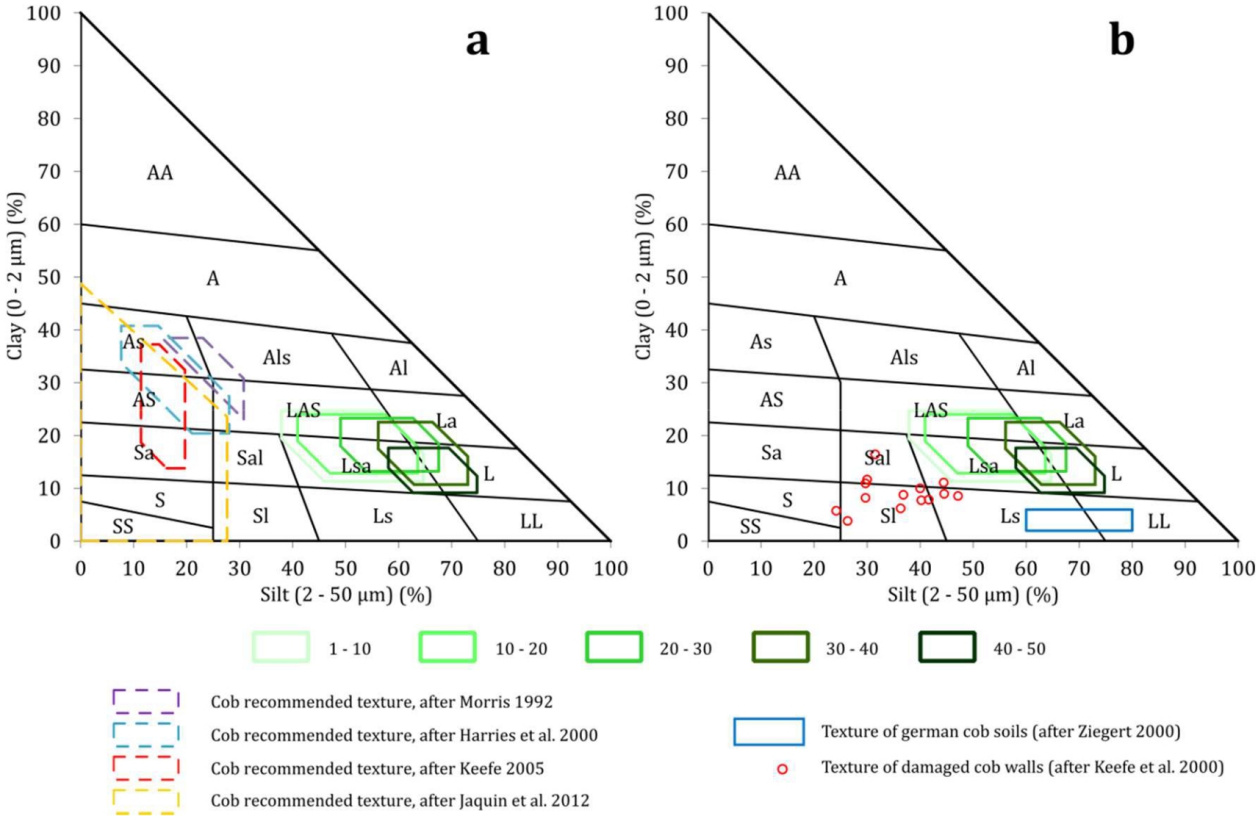


Figure 15 : Texture des sols employés pour la construction en bauge dans des bâtiments vernaculaires en Bretagne (dégradé vert par densité bâtie), Allemagne (bleu continu) et Royaume-Uni (points rouges) comparée à 4 seuils de référence (tirets discontinus) (Hamard, 2017, p. 61). Dans cette représentation, la somme des classes granulométriques Argile/Limon/sable est égale à 100 %.

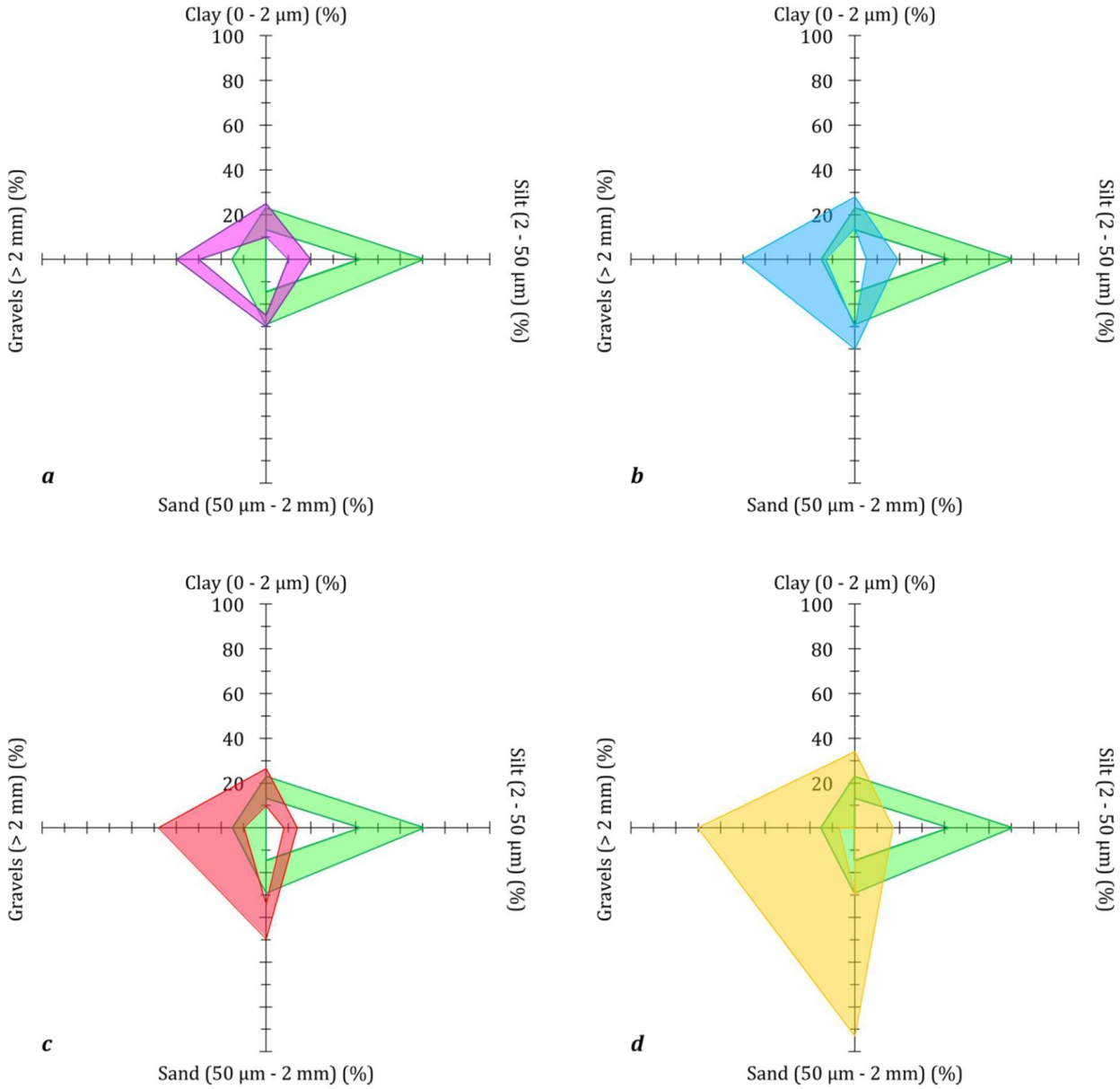


Figure 16: Texture des sols employés pour la construction en bauge dans des bâtiments vernaculaires en Bretagne, comparées à 4 références issues de la littérature académique (Hamard, 2017, p. 61). Dans cette représentation, la teneur en graviers est représentée.

Hamard et al. (2017) analysent la répartition géographique des bâtiments vernaculaires en Bretagne construits en bauge, relativement à d'autres matériaux, selon les propriétés des sols sous-jacents extraites via un croisement cartographique (la méthode est décrite en partie 2 XXX). En supposant que les sols employés pour l'édification soient les sols sous-jacents, ils représentent la densité relative de bâtiments en bauge selon la texture du sol (Figure 15, Figure 16). 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 15).

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 mais

cependant supérieure, mais 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 15b. Elles semblent confirmer la tendance observée, à savoir une dominance des sols limoneux relativement aux sols sableux suggérés dans les références.

2. Un début de consensus sur l'inadéquation des références courantes

Ces études analysent des matériaux issus de bâtiments vernaculaires pré-industrialisation (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 méthodes d'analyse variables et plus ou moins fiables. D'autres études sur des matériaux vernaculaires ou industriels ont été réalisés et sont disponibles dans la littérature académique. Rassembler l'ensemble de ces données pourrait permettre une vision plus globale de la diversité des matériaux employés pour construire en terre crue, comme le suggèrent Rojat et al. (2020). Cela nécessiterait un important travail d'homogénéisation des procédés d'analyse afin de rendre comparable les données issues de différents procédés d'analyse, et n'a pas été réalisé ici. Néanmoins des réflexions sur une base de données pouvant accueillir de telles données sont proposées au chapitre XXX (données vernaculaires).

Malgré tout, il apparaît clairement que les références présentées ne représentent pas la diversité des terres employées dans le patrimoine vernaculaire. Cette incohérence par l'existence de patrimoine bâti avec d'autres propriétés que celles recommandées indique premièrement la possibilité de construire en bauge ou en pisé en dehors des références, notamment les fuseaux granulométriques, et donc a minima leur conception « trop étroite » : les fuseaux granulométriques « échouent à représenter la diversité des terres employées pour la construction » (Rojat et al. 2020).

Ce constat a progressivement amené des chercheur.euses à ce qui peut sembler un début de consensus, déclarant l'inadaptation de ces recommandations par leur trop forte restriction (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).

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. C'est-à-dire que, 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.

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 (XXX ref patrimoine, enduits ciment). Dans le contexte de reprise inconditionnelle des recommandations, des fuseaux étroits entraîne 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) (xxx voir partie freins intro). Cette méfiance peut ainsi nuire à une réappropriation du matériau, par exemple en exacerbant les inquiétudes relative aux performances mécaniques des matériaux terre crue lorsqu'ils ne rentrent pas dans les standards (Luquain 2021), ou nuire la performances sociétales des procédés de construction en terre, en favorisant l'adjuvantation de granulats issus de filières extractivistes ou même de liants hydrauliques (Rojat et al. 2020). Pourtant, ces méfiances à l'égard des terres « hors fuseaux » semblent infondées.

A l'inverse, l'existence de références recommandant des typologies de terres peut au contraire inciter à une sur-confiance en le matériau considéré « convenable », alors qu'il est évident que les *propriétés d'usage* (solidité, durabilité, etc.) d'un matériau dépend 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 : par leur emploi généralisé (et peu questionné jusqu'à récemment) ; et par leur légères réinterprétation/variations qui donnent une impression de multiplicité de références concordantes alors même qu'un seule source est à l'origine de toutes. Par exemple, nous émettons notamment des doutes sur l'indépendance des quatre recommandations relevées par Hamard et al. (Figure 15a) pour la bauge et de celles relevées par Gomes et al. (Figure 12) pour le pisé, même s'il est rarement possible de remonter les références jusqu'à la source initiale. 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 » et mises en œuvre par des personnes non formées au matériau terre crue[17]. Ces désordres nuisent à l'image d'un matériau qui, on l'a vu (voir xxx intro) subit déjà de nombreux préjugés quant à sa pertinence constructive, et de fait freinent également sa réappropriation.

Les problématiques que posent les incohérence 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 2021) 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 mieux adaptés aux matériaux industriels normalisés aux propriétés homogènes (Lecompte 2020). Même non soutenues par un travail de normalisation légal, les références ont une portée

17 Nous n'avons pas d'exemple à citer, mais cette problématique nous a été confiée par des artisan.es au cours de discussions informelles. [xxx erwan suggère les commentaires du site argilus, mais je n'ai pas trouvé]

normalisante « *de fait* » dans le secteur du bâtiment, en favorisant le soutien d'acteurs centraux comme les assurances pour les techniques reconnues dans les référenciels techniques (Pelé-Peltier 2023:167).

[xxx sera surement dépalcé en introduction et juste fait référence ici]

L'exemple du chaux-chanvre est démonstratif : les DTU (Document Techniques Unifiés)[18] produites par l'association « construire en chanvre », rassemblant producteurs de chanvre, industriels chauliers et artisans (Lecompte 2020), sont difficiles à obtenir pour les petits acteurs car les démarches de certification sont longues et onéreuses[19]. L'établissement de ces règles, sensées « favoriser le déploiement de la filière chanvre » ont été mises en place par des organismes industriels dont la force de lobbying sur les organisations publiques est bien connue (Lecompte 2020). L'emploi des ressources en chanvre locales, 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 :

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

- les *propriétés cibles* (ex : mécanique) 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 relativement aux matériaux des 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) ;

18 Le contexte normatif français est décrit dans la thèse de Pelé-Peltier (2023)

19 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

- 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;

- adapter les classifications en passant de seuils simples à des modélisations plus complexes à partir des mêmes *propriétés prédictives*.

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).

Cucurullo et al. (2021) évaluent la variation de performance mécanique d'un matériau composé de terre crue lorsque sa distribution granulométrique est amendée par l'ajout de sable (figure xxx). Les deux matériaux sont hypercompactés à 100 MPa[20] 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 plus importante que l'échantillon non amendé hypercompacté et même que celui compacté à l'optimum Proctor. Les auteur.ices concluent que la *correction granulaire* , c'est à dire l'amendement en granulats (sable ou graviers) faisant entrer un matériau dans les standards n'est pas une garantie d'amélioration des performance mécaniques. Ils suggèrent que c'est plutôt la régularité de la distribution granulaire, garante d'une densité optimale, qui permet de bonnes résistances mécaniques.

20 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 le chapitre procedes-compaction XXX) : la compaction Proctor équivaudrait à une compaction statique de quelques MPa seulement.

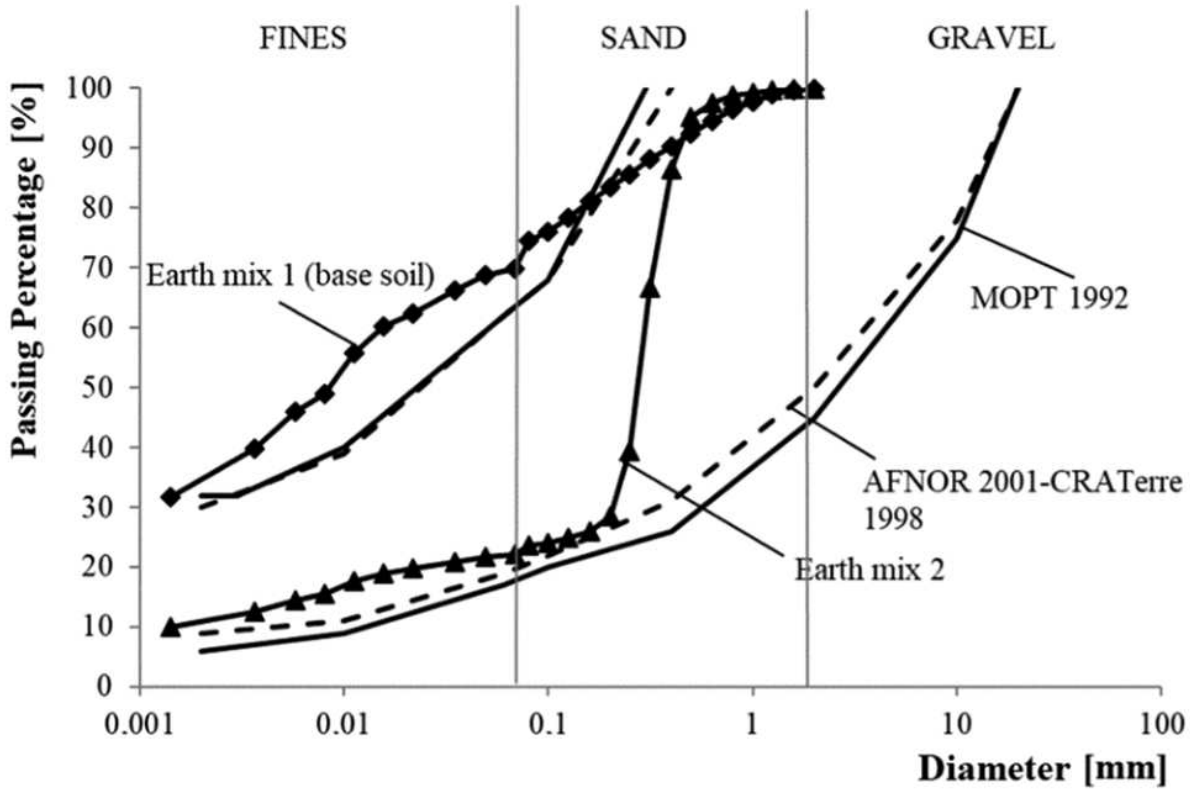


Figure 17 : Distribution granulométrique du sol non amendé (Earth mix 1) et du sol amendé de 68 % de sable (Earth mix 2), comparés aux deux fuseaux granulométriques les plus restrictifs de (Gomes et al. 2014) (voir Erreur : source de la référence non trouvée) (Cuccurullo et al. 2021)

Ces résultats sont « exploratoires », dans la mesure où ils n'ont été réalisés que sur un échantillon de terre, ce qui n'est absolument 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 (très) 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 s'il rentre également dans les recommandations relatives aux limites d'Atterberg de ces mêmes auteurs. Il est pourtant probable qu'il 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 fine, 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 observée dans les matériaux issus du patrimoine vernaculaire pour plusieurs techniques-types (xxx paragraphe vernaculaire) 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. 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.

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 est 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 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 (voir XXX excavation).

Lorsque les auteurs représentent les 23 échantillons de pisé Rhone-Alpins décrits précédemment et 33 échantillons de bauge Bretonne sur cette classification (Figure 18), semble apparaître une transition progressive 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[21]. Ils précisent cependant que cette classification ne pourra pas remplacer des essais performanciels complémentaires (essais sur échantillons d'éléments ou avis d'expert.es).

Si ces conclusions 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 18 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, piémonts Alpins pour le pisé), la différence de propriétés moyennes observée pourrait s'expliquer plus simplement par la différence de propriétés moyennes des sols des deux régions. On peut tout à fait envisager que le fait qu'on construise principalement en bauge en Bretagne et en Pisé dans la vallée du Rhône ne soit pas lié aux conditions pédologiques, par exemple par absence respective de connaissance des techniques constructives, tout en ayant une différence marquée entre les matériaux produits dans ces deux contextes, par le fait d'employer le sol disponible localement. Pour valider l'impact du sol sur les choix techniques, il faudrait idéalement observer la distribution du patrimoine bâti dans une région où les deux techniques sont employées (ou du moins connues) : une

21 La matière organique présente une forte VBS, ce qui fausserait les résultats. Voir XXX matière organique.

différence statistique entre les matériaux employés témoignerait d'un choix préférentiel influencé par les propriétés du sol.

Plus simplement, on observe une assez bonne corrélation entre VBS et passant à 80µm pour l'ensemble des échantillons. Dans le cas où les échantillons seraient bien séparés pour des questions de « convenance relative », on peut se demander si le seul emploi de la VBS par exemple ne suffirait pas à apporter le même discernement entre les choix techniques.

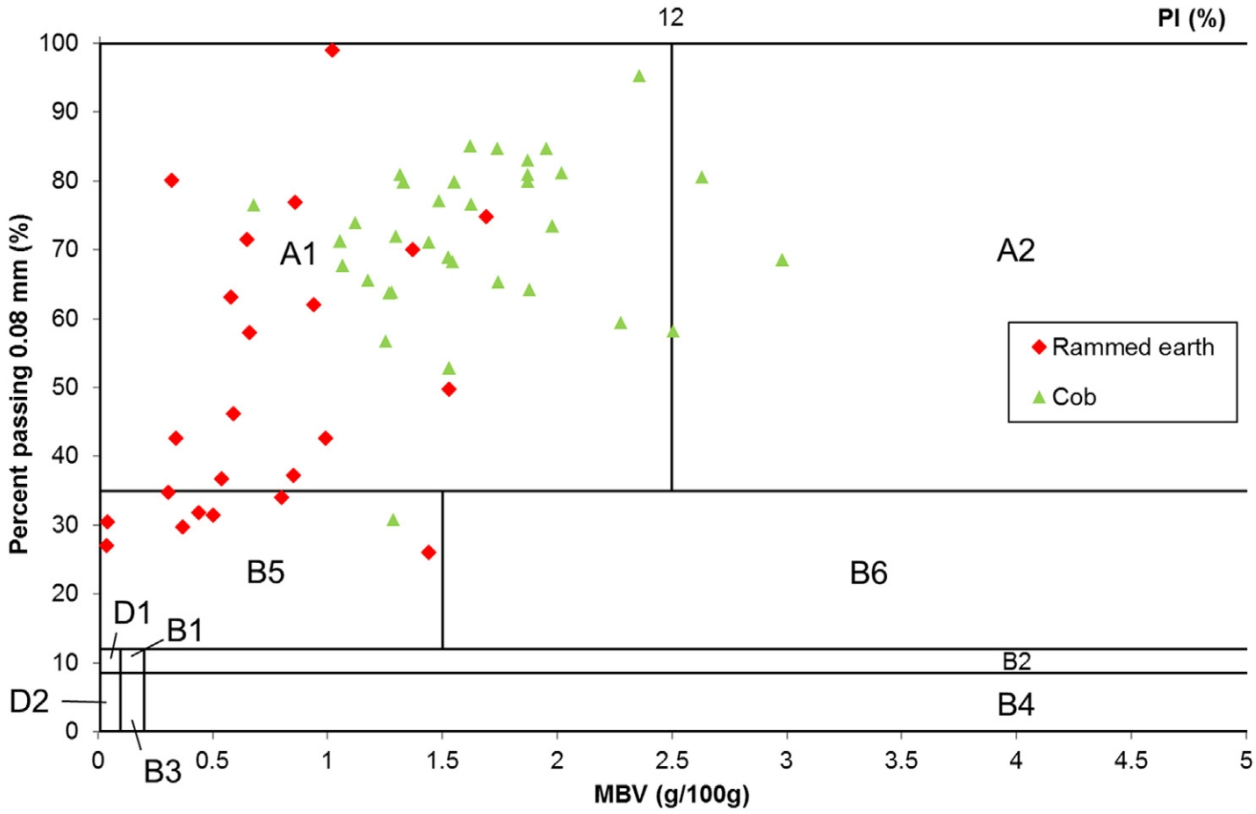


Figure 18 : Positionnement des 23 échantillons de pisé vernaculaire Rhone-Alpins et de 33 échantillons de bauge Bretonne selon leur passant granulométrique à 80µm et leur réactivité au Bleu de méthylène. La classification est issue du Guide des Terrassements Routiers (GTR). (Rojat et al. 2020)

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 « compressibilité » de chacune des classes granulométriques mesurée indépendamment, l'énergie de compaction et la forme des agrégats. En effet, la compacité du matériau gouverne sa résistance mécanique en compression (voir xxx propriétés terre). Le modèle permet le calcul de l'amendement en sable optimisant la compacité du matériau final, donc *a priori* la résistance mécanique. Un

essai en compression est réalisé sur un échantillon de terre naturelle, puis corrigée selon l'optimum : l'échantillon corrigé montre une résistance en compression supérieure de 137 % au premier (2.75 contre 1.16 MPa).

Ici encore, l'étude n'est réalisée que sur un échantillon. En admettant que les conclusions soient généralisables, ce résultat complète l'approche de (Cuccurullo et al. 2021) en suggérant que l'arrangement granulométrique n'est pas une question de fuseau mais d'empilement granulaire, optimisant la densité.

Les milieux granulaires 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. implique une analyse séparée de différentes classes granulométriques, pour leur densité et compactabilité 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 impossible à mettre en œuvre simplement sur le terrain. Est-il alors seulement possible de concilier simplicité du test et précision de la prédiction ?

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

Nous observons ici une ambiguïté dans les objectifs du travail de développement de références proposé par les auteur.ices présentées.

D'un côté, l'objectif de certains travaux 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, d'autre part à la complexité des modèles de prédiction.

De l'autre, il s'agit d'un travail visant à comprendre, et si possible participer à l'aide à la décision pour des choix techniques pertinents sur le terrain. C'est pourquoi l'analyse du patrimoine sert d'exemple, validant un ensemble de *propriétés cibles* incluant des performances d'usage et de mise en œuvre.

Il est évident que 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 ?

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

Rojat et al. (2020) suggèrent que les « fuseaux » ou « seuils » granulométriques, ou sur d'autre propriétés, 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 (Rojat et al. 2020).

En effet, plus généralement, la plupart des publications [a référencer xxx] justifient explicitement ou implicitement les références 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 (en terme de résistance en compression minimale, ou de vitesse d'érosion, *etc*.). Il est surtout très rare que ces *propriétés cibles* intègrent des propriétés de *facilité de mise en œuvre* dans leurs critères de « convenance des terres ».

Certain.es auteur.ices (Dialmy et al. 2023; Ji et al. 2023; Meimaroglou & Mouzakis 2024) sont manifestement conscient.es de l'importance de prendre en compte la facilité de mise en œuvre en situation réelle, ou du moins de la *possibilité* de mettre en œuvre les matériaux.

Par exemple, la méthode de Dialmy et al. 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, ils 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 :

> « […] compactness increases when gravel dosage is higher. [...] gravel dosage should be limited to ease compaction and ensure soil cohesion.» (Dialmy et al. 2023)

Un constat partagé par d'autres auteur.ices qui soulignent l'importance de la « qualité de la mise en oeuvre » sur les propriétés finales (Schroeder 2016; Fabbri et al. 2022; Ansaa-Asare et al. 2023).

Cependant ici, la facilité de mise en œuvre n'est pas rattachée à une variable d'économie d'effort*, mais encore une fois à la qualité de la résistance mécanique ou esthétique des échantillons. Pour Dialmy et al. par exemple, des difficultés de compaction entraîneraient une densification inférieure à celle prédite par le modèle.

Cependant, on voit que certain.es auteur.ices constatent que lorsque l'on cherche à prédire avec précision les propriétés mécaniques des 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 une terre « convenable », pourtant de fait, souvent implicitement ou explicitement ramené à une performance mécanique.

Même Rojat et al., fort critiques à l'égard des classifications granulométriques faisant référence et paraissant concernés par les problématiques de terrain puisque cherchant des essais de convenance « faciles à réaliser sur le terrain », n'explicitent pas ce qu'ils entendent par une terre « convenable ».

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 (p. ex. (Kouakou & Morel 2009; Ansaa-Asare et al. 2023)). 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, l'optimisation de ces seules variable seule n'est probablement pas la seule variable objectif des constructeur.ices dans les procédés vernaculaires, également préoccupés 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.).

En pratique, le choix d'une technique de construction implique donc d'autres considérations que la résistance mécanique finale. En effet, à partir du moment où celle-ci est supposée suffisante pour l'ouvrage réalisé, il faut désormais penser à l'implication dans l'ensemble des procédés de travail de la matière. C'est à dire, *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 clarifier ce que sont les *propriétés cibles* des recommandations existantes et 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* fait donc sans aucun doute 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 et *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. Pourtant, l'adjuvantation hydraulique annule tout intérêt écologique de l'emploi des matériaux biosourcés (xxx introduction liants hydrauliques). La méconnaissance des impacts au-delà des performances mécaniques est manifeste lorsque les auteur.ices indiquent en introduction que l'intérêt de la construction en terre est sa performance environnementale.

L'optimisation d'une seule variable, aveuglément aux autres, est appelée *pensée en silo* (Berlan et al. 2023). C'est un des mécanismes menant à la *contre-productivité* sociétale du

développement technique, surtout lorsqu'il est régi par une classe d'experts-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, dans le sens de l'économie d'effort (qui impacte par ailleurs l'économie monétaire), 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, elles sortent 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, 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.

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

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. Certaines techniques pourraient être « optimales » pour une terre, en facilitant sa mise en œuvre, optimisant ses performances finales. Cependant, on observe que dans de nombreuses régions, plusieurs procédés de mise en œuvre de la terre crue coexistent (XXX voir intro techniques carte). Ces différentes techniques sont parfois trouvées dans une même rue, ou parfois un même bâtiment [xxx une photo de terrain serait bienvenue XXX], et certaines dispositions nous assurent qu'elles ont été mises en œuvre dans un même processus de construction, c'est à dire dans un même espace temps, en utilisant exactement la même terre [un exemple de ça par exemple XXX]. 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, la présence d'autres matériaux, des questions esthétiques, ou encore politiques. On sort alors d'une approche *déterministe* de l'environnement sur les choix techniques.

L'impact du contexte constructif lorsqu'il est indépendant des propriétés de la terre à disposition ne peut cependant expliquer le *décalage* entre les recommandations et l'occurrence des terres employées dans le patrimoine observé dans ce chapitre. Un tel décalage, s'il est statistiquement valable, ne peut en effet s'expliquer que par des choix

préférentiels liés plus ou moins directement à l'impact de ces propriétés de la terre. En revanche, les variables du contexte constructif indépendantes des propriétés de la terre peuvent expliquer la *variabilité* des choix techniques pour une même terre et expliquer le fait que les terres employées ne soient pas mises en œuvre dans les procédés a priori « optimaux » au regard des performances d'aisance de mise en œuvre et/ou des performances d'usage. Cette discussion sera prolongée en partie XXX (contexte constructif analyse carto)

4. Conclusions et hypothèses de travail

Il nous semble important de commencer par clarifier l'expression de « convenance des terres ». En l'état, elle porte en elle l'idée d'un processus de choix technique d'abord indépendant de la terre à disposition (par exemple esthétique), puis impliquant une sélection d'une terre appropriée à ce choix, en évaluant sa « convenance » au procédé préalablement choisi. Pourtant, dans le cadre de l'emploi de terres à disposition (sur site ou déjà excavées), garant d'une pertinence environnementale et d'efficacité de 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. 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 consiste en 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 patrimoine 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 évidentes. 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 patrimoine 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. Ces constats pose plusieurs questions : 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. Celles employées dans les recommandations 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 d’optimisation, par ailleurs peu représentatifs car réalisés sur peu de terres différentes [a référencer xxx], 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 2019).

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) (voir XXX freins). Malheureusement, le mauvais dimensionnement de recommandations peut poser problème en pratique au sein de la filière terre crue. Analyser et comprendre ce qui déconnecte les recommandations des choix techniques en pratique 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.

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 sont gouvernés par un ensemble de propriétés cibles, 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. 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 : le choix d’une technique de construction en terre crue en pratique, relativement aux propriétés de la terre employée, dépend d’assemblages complexes

d’interactions entre propriétés compositionnelles et comportementales de la matière influant sur toutes les variables faisant la « qualité » d’un choix technique.

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, 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, permettant de percevoir l’impact des propriétés de la terre sur les étapes de transformation et 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.

Chapitre 2 : Propriétés de la matière

Dans la recherche académique, il semble y avoir 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 adaptées 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 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 ».

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. La forme que prend ce chapitre garde sa structure-modèle, et peut ainsi être vue comme un « dictionnaire » relatifs aux propriétés des mélanges de terre crue. La lecture de l'ensemble n'est pas nécessaire pour comprendre chaque partie : on peut se référer directement à une propriété d'intérêt.

Les propriétés de la terre sont décrites dans un ordre de causalité. Les conditions de formation du sol (1) permettra d'abord de comprendre son impact sur sa composition en différents éléments (2). C'est dans l'interaction entre ces éléments que les mélanges de terre développent leurs propriétés : on proposera une nouvelle représentation permettant de décrire l'état d'un sol relativement à sa composition en phases solide, liquide et gazeuse (3). Cette représentation volumique sera utilisée pour décrire les propriétés mécaniques fondamentales des dynamiques des mélanges de terre crue en lien avec la composition des mélanges (4). Enfin, on décrira comment ces propriétés fondamentales sont mobilisées dans les contraintes-types appliquées aux mélanges de terre crue (5). Ces contraintes-types composent les propriétés d'ouvrabilité des mélanges pour chacune des étapes de leur transformation dans les procédés mobilisant la terre crue, en interaction avec d'autres propriétés influant les choix techniques (6).

2 Le sol, la terre

2.1 Variabilité spatiale et temporelle

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.

2.1.1 Le temps : la pédogenèse

La pédogenèse est l'ensemble des mécanismes ayant participé à la formation d'un sol. La diversité des propriétés des sols découlant de leurs conditions de formation, comprendre la pédogenèse permet de mieux la comprendre ainsi que son évolution dans l'espace.

Le sol est l'interface entre la géosphère et l'atmosphère : la pédogenèse est donc l'histoire de l'interaction entre ces deux milieux.

Les sols se développent dans un *matériau parental* exposé à l'atmosphère par affleurement, ou préalablement déposé par des processus de transports de sédiments - eux-mêmes issus de l'érosion d'un *matériau parental*. Par exemple sur le territoire hexagonal[22] la plupart des processus pédogénétiques débutent à la fin de la dernière ère glaciaire (-10 000 ans) avec le retrait des glaciers : le lent déplacement des glaciers ayant érodé les sols et roches sous-jacentes, celles-ci affleurent désormais en surface au contact de l'atmosphère.

C'est ainsi que débute la pédogenèse. Progressivement, sous l'effet du climat et des organismes pionniers, le matériau parental évolue. Dans le cas illustré sur la Figure 19, il s'agit d'un matériau non meuble : la roche se fragmente progressivement depuis la surface puis de plus en plus en profondeur, sous l'effet du gel-dégel de l'eau dans les anfractuosités de la roche, de l'action physique ou chimiques des racines des plantes et d'autres organismes. Progressivement le sol gagne en épaisseur, en diversité de composition et de taille de constituants minéraux et organiques, ce qui favorise l'installation d'autres organismes qui participent à leur tour à la pédogenèse.

La limite, généralement horizontale, à partir de laquelle l'altération du matériau parental n'est plus visible est appelée *front d'altération*. A mesure que celui-ci progresse, il laisse derrière lui des fragments de roche qui continuent à se fragmenter et à se mélanger à de plus en plus de constituants d'origine organiques. Les couches supérieures sont donc non seulement plus « âgées » d'un point de vue pédogénétique, mais également plus en interaction avec l'atmosphère et la biosphère. Dès lors qu'on distingue des propriétés physiques ou chimiques différentes entre deux couches de sol, on peut les classifier en différents *horizons* (A, B et C sur la Figure 19). Bien entendu, ces limites sont artificielles car les variations sont souvent relativement progressive bien que parfois assez brutale comme dans le cas des processus de dissolution des carbonates, ou de redistribution des constituants par éluviation-illuviation[23] dans les sols d'âge avancé.

On voit que l'on peut presque lire le *profil de sol* comme une frise chronologique : plus l'horizon est profond, plus sa pédogenèse est jeune ; néanmoins les phénomènes de redistribution des constituants, particulièrement à l'œuvre dans les sols d'âge avancé, complexifient cette lecture.

Ces processus engendrent un approfondissement progressif du sol, tant qu'il n'y a pas de phénomènes d'érosion. En l'espace des 10 000 ans qui nous séparent de la dernière

22 On utilisera ce terme pour décrire le territoire français rattaché au continent eurasiatique, préférable au terme « France métropolitaine » portant un sens colonialiste désormais reconnu par l'État français https://fr.wikipedia.org/wiki/France_m%C3%A9tropolitaine

23 éluviation-illuviation: processus au cours desquels des constituants du sol sont emportés par la circulation de l'eau (éluviation), par exemple vers des horizons plus profonds où les conditions sont plus favorables à leur dépôt (illuviation). Il peut s'agir par exemple d'argiles ou de matières organiques.

glaciation, 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* s'il est détruit au cours de son emploi (voir xxx intro matériaux naturels renouvelables).

Les éléments solides d'un sol érodé seront déposés ailleurs. Par exemple, l'érosion hydrique les emporte dans les rivières et *in fine* jusqu'à la mer, où ceux-ci sédimentent avec d'autres sédiments issus de l'érosion continentale ou de la biodiversité marine. A plus grande échelle temporelle (millions d'années), ces sédiments seront progressivement enfouis, déplacés et transformés avant d'affleurer à nouveau sur un continent. A chaque changement de conditions (profondeur, température, hydratation, etc.), l'équilibre thermodynamique change et les minéraux formés ne sont plus stables dans les nouvelles conditions, ils se transforment. Ce cycle des roches, et la diversité de composition ou de transformation que peuvent subir les minéraux au cours de leur géogenèse [?] est à l'origine de la diversité des minéraux rencontrés dans les roches. L'affleurement à la surface et l'érosion n'est qu'une des étapes, où la roche n'est plus à l'équilibre thermodynamique de ses conditions de formation et se transforme (fragmentation, dissolution...) au contact de l'atmosphère.

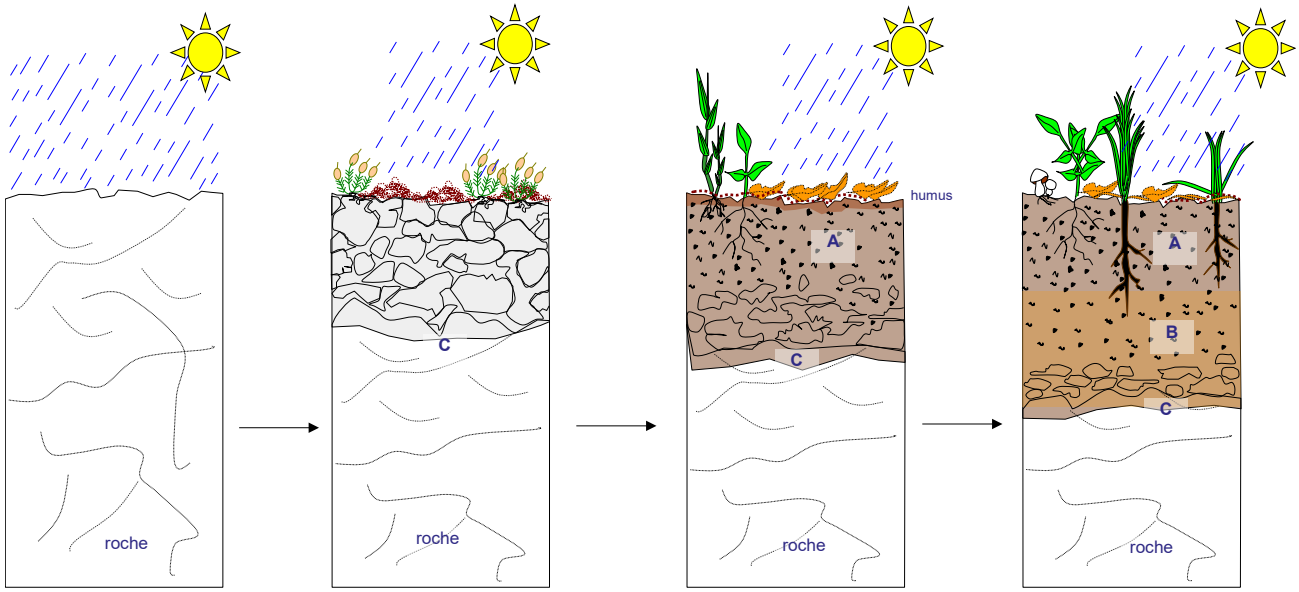


Figure 19: Pédogenèse à partir de l'affleurement d'un matériau rocheux. A, B et C : dénomination des horizons respectivement « organiques », « minéraux » et « d'altération » (AFES (Association Française pour l'Etude des Sols) 2008). *Notons l'influence du **climat**, des **êtres vivants** et du **temps** en tant que facteurs pédogénétiques. ©Erwan Hamard [Univ. Gustave Eiffel?] [c'est bien de toi?]*

Nous avons relevé l'influence du **temps**, du **climat** et des **êtres vivants** en tant que catégories de facteurs pédogénétiques (Egli et al. 2014). On peut distinguer deux autres catégories de facteurs. Le **relief** engendre des phénomènes de *solifluxion*, 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 favorise l'apparition de pierres plus « récemment » détachées du matériau parental en surface du sol. Sur la Figure 20, le relief engendre un départ des éléments en haut de versant, la pédogenèse produit des

sols plus fins ; tandis qu'en bas de pente, une accumulation produit des sols plus profonds. Sur les versants, les profils sont donc plus « mélangés » que sur les plateaux ou dans les plaines. Enfin, le **matériau parental** est un facteur pédogénétique important. S'il est dur (cas des roches cristallines, p. ex. les granites), la fragmentation de la roche est lente et le sol produit est peu profond ; s'il est meuble (cas des dépôts de limons éoliens, de certains grès ou schistes ou des roches carbonatées), la pédogenèse altère rapidement le matériau en profondeur (Egli et al. 2014).

[Note : si besoin de discussion sur la profondeur du sol, cf. image formation du sol (Egli et al. 2014)]

Le matériau parental conditionne également la composition minéralogique du sol : certains minéraux sont *hérités* des matériaux parentaux, par exemple les argiles piégées dans des roches calcaires, libérés par leur altération. D'autres minéraux sont *transformés* ou *néoformés* au cours de la pédogenèse.

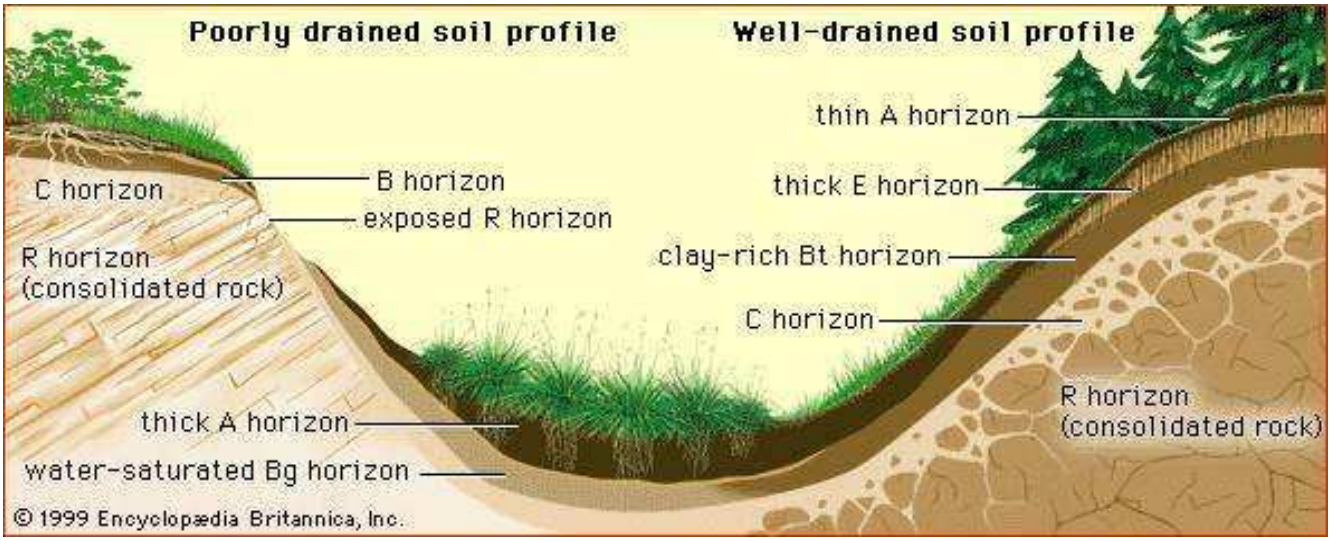


*Figure 20: Influence du **relief** et du **matériau parental** sur la pédogenèse. La solifluxion entraîne le départ ou l'accumulation de sol selon sa place sur le versant. Dans les mêmes conditions, des roches dures engendreront des sols moins profonds que des sols meubles. ©www.britannica.com/science/soil*

Ces 5 catégories de facteurs pédogénétiques sont regroupées sous l'acronyme (un peu) mnémotechnique ClORPT (Climat, Organismes, Relief, matériau Parental, Temps), proposé par Hans Jenny (1941). Notons que la civilisation humaine prend une place considérable dans la catégorie « Organismes » et particulièrement depuis le début de l'industrialisation (Price et al. 2011). Ils deviennent ainsi le principal facteur pédogénétique par exemple via le déplacement, l'érosion, le tassement, l'appauvrissement ou l'eutrophisation des sols.

Les catégories de facteurs pédogénétiques ne sont pas indépendantes, et c'est dans leurs interactions que naît la diversité des sols. Par exemple, le **temps** multiplie l'impact de tous les autres facteurs ; le **climat** influence la **biodiversité** locale, le **matériau parental** conditionne en partie le **relief** par sa résistance à l'érosion, etc.

On parle de *série pédogénétique* lorsque l'on étudie une série sols dont seul un facteur ou une catégorie de facteurs de pédogenèse varie (p. ex. la topographie). Dans une série pédogénétique, la variation des propriétés suit généralement une fonction assez simple du

facteur de pédogenèse considéré. Dans ces contextes, il devient alors possible de prédire par interpolation les propriétés d'un sol de la série (p. ex. sa profondeur) *via* la valeur du facteur étudié (p. ex. sa position dans le paysage). La fonction de prédiction s'appelle une *fonction de pédotransfert*. A l'inverse, si la pédogenèse varie de manière multifactorielle, il devient difficile de proposer des fonctions de pédotransfert simples et valides sur l'intégralité des sols considérés : le besoin d'échantillons de calibrage est démultiplié par chaque nouveau facteur de variation à considérer.

2.1.2 L'espace : organisation multi-échelles

Il résulte de l'ensemble de ces facteurs pédogénétiques une diversité des sols sur l'ensemble de la surface des terres émergées. La France hexagonale fait d'ailleurs partie des territoires ayant le plus de diversité pédologique en Europe et dans le monde (Minasny et al. 2010).

La variabilité spatiale des sols peut d'abord s'appréhender **verticalement**. Les facteurs de pédogenèse et notamment la distance au front d'altération induisent une variation plus ou moins progressive des propriétés du sol depuis le matériau parental jusqu'à la surface. Des schémas récurrents dans les sols de latitudes tempérées sont l'augmentation exponentielle de la teneur en matières organiques à l'approche de la surface ; l'augmentation de la teneur en éléments grossiers avec la profondeur et à l'approche d'un matériau parental dur qui se fragmente ; ou encore le lessivage par phénomène d'éluviation-illuviation des argiles et/ou de la matière organique depuis des horizons proches de la surface (horizons dits « E ») vers des horizons d'accumulation en profondeur (dits « B »), particulièrement dans les sols aux composants grossiers (à dominante sableuse) (voir XXX argiles).

Lorsque la variation des propriétés physico-chimiques d'un sol est décelable par un.e expert.e pédologue, iel détermine une limite séparant deux *horizons de sol*.

Les propriétés considérées peuvent être par exemple le degré d'altération du matériau parental, le contenu et le type de matières organiques, la teneur en minéraux particuliers (par exemple en argiles), le pH, la granulométrie (Mitchell & Soga 2005), ou encore l'organisation de la macrostructure du sol.

Un profil pédologique est donc composé d'un ensemble d'horizons pédologiques empilés, dont l'ordre de grandeur d'épaisseur de chacun varie de quelques centimètre à plusieurs mètres. En France, ils sont nommés selon la classification du Référentiel Pédologique 2008 (AFES (Association Française pour l'Etude des Sols) 2008) qui permet d'unir la sémantique des bases de données nationales.

[illustration profil pédologique xxx]

Selon ce référentiel, c'est la classification des horizons qui permet de catégoriser les profils de sol dans des typologies, et ainsi appréhender la variabilité **horizontale** des sols dans l'espace. Une organisation typique d'horizons, leur épaisseur et profondeur permet le diagnostic.

Comme la variation verticale, la variation horizontale est relativement continue. Surtout, elle est généralement bien plus lente : là où quelques centimètres séparent des changements de propriétés notables entre horizons dans la dimension verticale, leur variabilité horizontale est très lente (épaisseur, composition, etc.). La variabilité des sols est donc souvent d'échelle de distances bien plus conséquentes horizontalement, de quelques mètres lorsque le relief est changeant à plusieurs kilomètres en plaine (Sivakumar Babu & Mukesh 2004).

A l'échelle du paysage d'une zone de la taille d'une commune de l'hexagone, ou de ce qu'on peut appeler un « pays » traditionnel, ou même parfois d'un département, il n'y a généralement qu'un ou deux facteurs majeurs de pédogenèse qui font varier les propriétés des sols. Par exemple, dans le pays du Trégor (22 - côtes d'armor), c'est principalement le *matériau parental* et la *topographie* qui gouverne la pédogenèse. Le climat, l'âge et le type de biocénose[24] (à l'exception de l'impact des humain.es) sont similaires sur l'ensemble de la zone. La *série pédogénétique* observable consiste en une continuité de brunisols, développés, dans une épaisseur variable de limons éoliens couvrant ou non des (schistes ? Granite?). Les fortes pentes notamment proche de la côte réduisent la profondeur des sols. (?)

[carte des sols du trégor, quelques exemples de sols xxx a ajouter lorsuq'on fait carto convenance]

Autre exemple en champagne ? En IDF ?

[Note : ces informations serviront dans la partie discussion relativement à la connaissance des sols par les maçon.nes local.es XXX]

A cette échelle, on parle de *système pédologique*, unité permettant de considérer les dynamiques de pédogenèse « horizontales » entre différents sols, par exemple à l'échelle d'un versant complet de colline. Ruellan (2010) suggère que l'étude des sols est généralement plus pertinente lorsqu'elle considère les unités « horizons » et « systèmes pédologiques » plutôt que les profils/types de sols, car ce sont des unités pédologiques plus aisément individualisables : les premiers pour leur relative homogénéité de propriétés, les second pour la bonne délimitation des dynamiques pédogénétiques.

Dans ce travail de thèse, nous travaillerons en considérant les horizons en tant qu'unité de sol relativement homogène : dans ce chapitre, le travail de mise en correspondance des propriétés du sol sera réalisé via cette unité de base, dans les chapitres de travaux cartographiques, cette unité sera préférée à la typologie des sols (voir XXX cartographie).

Nous garderons cependant à l'esprit que si la catégorisation d'unités pédologique permet de « discrétiser » les évaluations peut faciliter la compréhension des phénomènes étudiés, ces délimitations n'existent pas forcément dans la réalité, la couverture pédologique étant un continuum aux variations intermédiaires infinies dans les trois dimensions de l'espace ainsi que dans le temps (Ruellan 1984).

24 Ensemble des êtres vivants d'un écosystème (écosystème = biotope + biocénose + leurs interactions)

2.2 Le sol, un objet de recherche interdisciplinaire

Dans ce processus, à partir de quel moment apparaît la *terre* ? 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'oeil 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. C'est un mot aux définitions aussi multiples et variées qu'il y a de cultures, tant 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 21a.).

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'Etude du Sol 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, qui par leurs propriétés « meubles » sont considérés à la fois sur les cartes pédologiques et géologiques. 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.

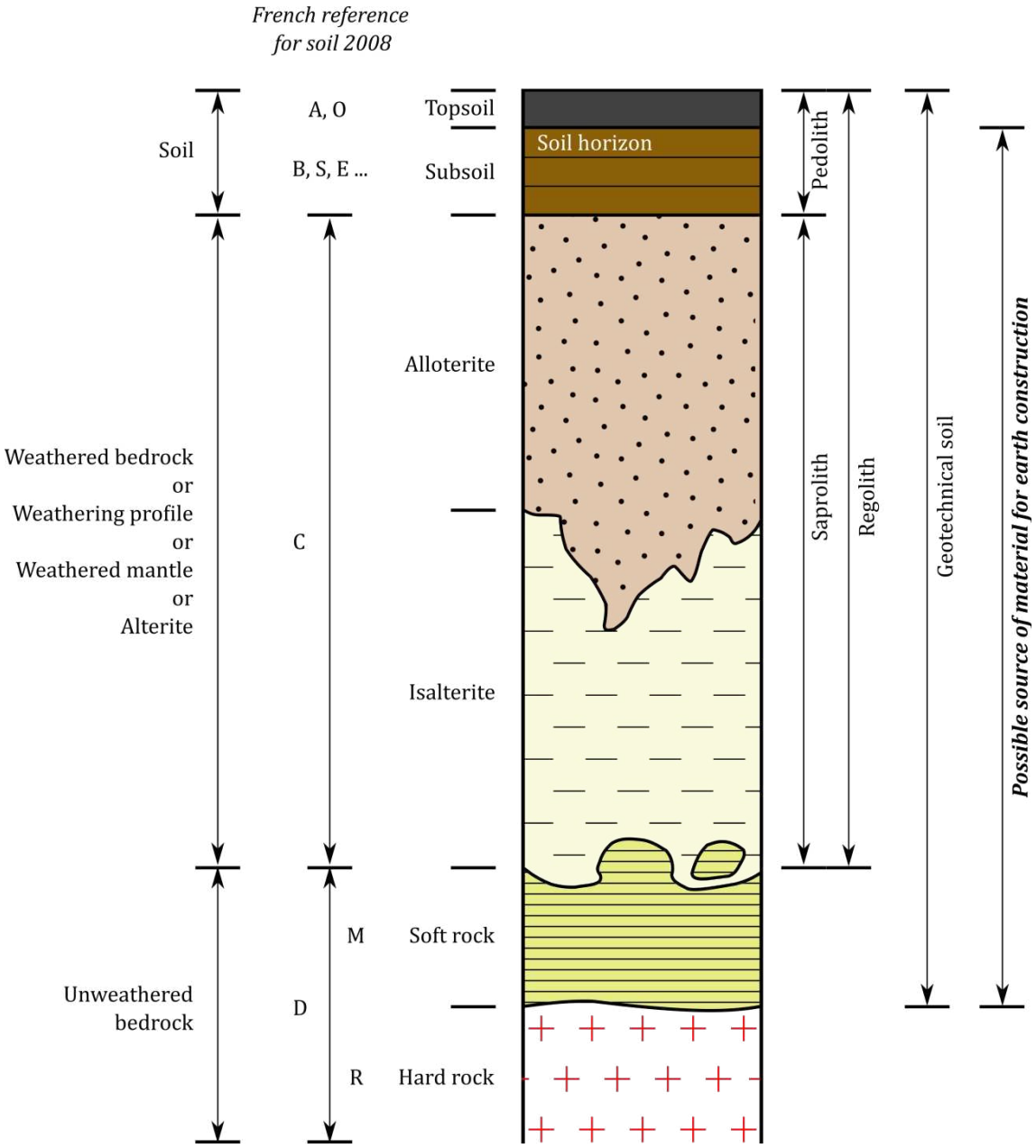


Figure 21: Définition du sol selon les disciplines d'étude. Adapté de (Hamard et al. 2018)

[xxx Schéma a revoir. Discuter avec Erwan de allotérite isaltérite pédogenèse ?

Préciser disciplines comme sur diapo]

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 géologique est meuble. Cette définition spatiale d'une terre convenable est une première approche, mais d'une part on a vu d'une part que la teneur en matières organiques n'était pas une condition stricte d'emploi de la terre pour bâtir en terre crue, et d'autre part la profondeur d'extraction influence la facilité d'accès au matériau et donc sa convenance, ce qui explique que par le passé seules les couches superficielles aient été employées dans la construction en terre crue (Hamard et al. 2018; Fabbri et al. 2022). Mais nous reviendrons sur ces deux points (XXX extraction diff contexte, matière organique gazon discussion finale). Il est difficile à ce stade de conclure sur une définition du « sol » appropriée aux considérations propres à la construction en terre crue, car cela nécessite de mieux comprendre les propriétés de composition et d'organisation de la matière qui sont intéressantes pour les procédés de construction.

2.3 Terminologie dans ce travail de thèse

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 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 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… voir XXX mélange). On utiliser 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 *adjuvantation hydraulique*, *ultratransformés*[25] ou *non biodégradables* (voir xxx objectifs de thèse).

La *terre* qualifiera la matière terre en général dans tous ses états, excavé ou non, mélangé ou non. Cependant dans la mesure du possible on utilisera les termes précédents, plus précis quand aux états de la matière concernés.

3 Propriétés compositionnelle: propriétés indépendantes du remaniement

Le sol est une interface en trois dimensions entre la géosphère et l'atmosphère : les composés organiques et minéraux composent une structure poreuse où l'eau et l'air circulent. Les propriétés physiques et chimiques des sols dépendent en grande partie des propriétés de ses constituants, que l'on appellera ici les *propriétés compositionnelles*.

On définit ici un *composant* du sol comme un ensemble de molécule associées en élément relativement homogène au moins à échelle nanométrique, fluide ou solide. Les solides sont des grains minéraux plus ou moins grands et des composés organiques de la

25 [peut-être défini en introduction objectifs de thèse.] Dont le procédé de production nécessite une échelle de transformation industrielle, surtout pour être employés purs et en grande quantité. Voir chap XXX additifs (alginates...)

taille d’une molécule à celle d’un organe végétal. L’eau de la *solution du sol* et l’air sont organisés en réseaux plus ou moins continus dans la porosité intergranulaire.

3.1 Fluides

3.1.1 Air

Dans la porosité du sol, c’est la fraction gazeuse (que l’on appellera l’air par simplicité) qui permet les phénomènes d’évaporation et de condensation qui apportent une inertie et une régulation hygrométrique aux matériaux de terre crue (voir intro terre crue XXX). La composition de l’air a peu d’impact sur les comportements physiques macroscopiques du sol. L’essentiel de son intérêt relativement aux propriétés mécaniques des mélanges de terre crue est fonction de sa teneur relativement à la teneur en eau et en solides (voir XXX prop statiques, et Figure 36).

3.1.2 Eau

3.1.2.1 Tension superficielle et pression partielle

Les molécules d’eau (H_20) ont pour particularité d’avoir des propriétés électrostatique conséquentes qui favorisent l’attraction électroniques entre elles et avec les autres molécules chargées électroniquement : les liaisons hydrogène. Ce sont ces liaisons qui maintiennent les molécules d’eau solidaires et permet son état liquide à température ambiante. De ce fait, elles sont à l’origine de la *tension superficielle* à l’interface entre l’eau et l’air (voir tension superficielle dans cohésion capillaire succion XXX).

Une autre particularité de l’eau est la mobilité des ions hydrogène (H+) entre les molécules d’eau. La molécule peut gagner un H+ (H_30^+) ou perdre un H^+ (HO^-). C’est par ce mécanisme que lorsque la quantité d’ions H^+ augmente ou baisse relativement aux molécules d’eau, les ions « manquants » ou « supplémentaires » sont distribués dans l’ensemble de la solution par échange ionique. La variation de charge qui en résulte est mesurée par le potentiel hydroxyde, ou pH.

L’eau du sol n’est jamais pure et contient des quantités variables d’ions dissous. Ils proviennent principalement directement de la dissolution des minéraux du sol ou par apport atmosphérique, ou par apport biologique.

3.1.2.2 Réactivité : équilibre acido-basique

3.1.2.2.1 Mécanismes

L’eau est dite acide lorsque la quantité d’ions H+ moyenne par molécule d’eau est supérieure à 2 (présence d’H_3O^+ dominante). A l’inverse, elle est basique lorsque cette quantité est inférieure à 2 (présence d’HO^- dominante). Le pH du sol est une mesure de la quantité d’ions H+ dans l’eau, et varie sur une échelle de 0 à 14. Il ne s’agit donc pas directement de la propriété de *réactivité* de l’eau mais d’une unité de mesure, cependant celle-ci est fondamentale et l’on parle souvent de pH pour désigner les propriétés d’acidité et de basicité de l’eau. A pH = 7, la charge est neutre, il y a autant d’ions H+ que d’ions HO-. Lorsque le nombre d’H+ domine, le pH est inférieur à 7 : le sol est dit « acide ». Lorsque le nombre d’HO- domine, le pH est supérieur à 7 : le sol est dit « basique ».

Dans les sols, cette teneur est un équilibre complexe entre tous les éléments chimiques en contact avec l'eau du sol, solides et dissous.
En France hexagonale, les pH rencontrés dans les sols sont pour la plupart compris entre pH 5 et 8 (Figure 22).

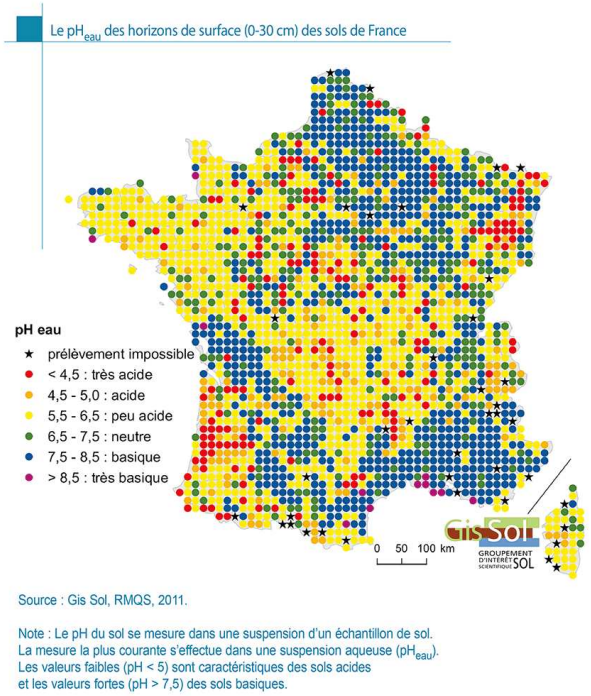


Figure 22

Chaque élément solide du sol présente un équilibre de dissolution (Figure 23). Pour les minéraux carbonatés, cet équilibre est situé autour de pH 8 : au dessus, la forme solide est majoritaire, en dessous, c'est la forme dissoute qui domine. Les oxydes métalliques et notamment les hydroxydes d'Aluminium sont solubles à des pH proches de 5. Pour les composés siliceux comme les argiles, l'équilibre de dissolution est généralement inférieur à pH 4.

La dissolution/précipitation de ces éléments a un effet « tampon » sur le pH (Figure 23). Par exemple, lorsque le pH baisse, la dissolution des carbonates le stabilise autour du pH 8, et tant qu'il restera des carbonates en quantité significative, le pH ne descendra pas plus bas. A l'inverse, tant que tous les ions en solution ne sont pas précipités, on ne peut dépasser leur pH d'équilibre. C'est pourquoi la lente dissolution des minéraux « tamponne » l'acidification des sols. Des pH très bas (<5) sont ainsi rarement rencontrés sur le territoire hexagonal aujourd'hui, car les sols sont relativement « jeunes » avec une pédogenèse datant de la dernière glaciation (-10 000 ans) (voir pédogenèse XXX).

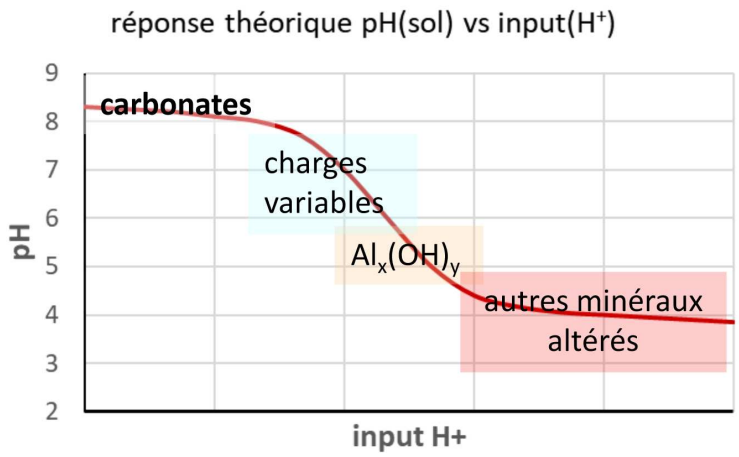


Figure 23: Effets tampons successifs des éléments du sol face à l'acidification. (Philippe Cambier 2020), d'après (Julien et al. 2011).

Dans les sols tempérés, la solution du sol est constamment renouvelée par les précipitations. Les ions dissous sont *lessivés* en profondeur, tandis que l'activité biologique et l'équilibre avec l'atmosphère réitèrent l'acidité par exemple via la dissolution de l'ion carbonate (HCO3-) ou la production d'acides organiques. L'acidité renouvelée est donc propice à la dissolution de nouveaux minéraux. La plupart des sols sont donc en contexte d' « acidification permanente » : s'il existe des minéraux tampons, comme dans les sols calcaires, l'acidification est lente (Julien et al. 2011).

La gestion agricole ou sylvicole influence fortement les conditions acido-basiques locales, directement via l'amendement carbonaté (chaulage) ou azoté/phosphoré, ou indirectement par l'écosystème du sol produisant diverses formes d'humus. Les sols grossiers (sableux, graveleux) et non calcaires sont particulièrement sensibles à l'acidification : l'eau s'y renouvelle rapidement par perméabilité, et il y a peu de minéraux disponibles pour tamponner la baisse du pH (p. ex. les sols sableux des landes, cf. Figure 22).

L'influence du climat sur la dissolution-lixiviation des minéraux carbonatés et donc sur le pH est négligeable à l'échelle du territoire de l'hexagone. Celle du relief est anecdotique et concerne les phénomènes de remise en surface d'éléments grossiers par le mélange des horizons dus aux phénomènes de *solifluxion* (voir XXX relief pédogenèse).

On retiendra que l'équilibre acido-basique du sol est essentiellement lié au matériau parental dans lequel se développe le sol, ainsi qu'à l'activité biologique et notamment les pratiques agricoles ou sylvicoles (Figure 24).

3.1.2.2.2 Mesure et estimations

3.1.2.2.2.1 Mesure

La mesure du pH de la solution du sol consiste en l'extraction de la solution du sol puis sa mesure via des appareils spécifiques ou par réaction avec des composés dont la couleur est pH-dépendante.

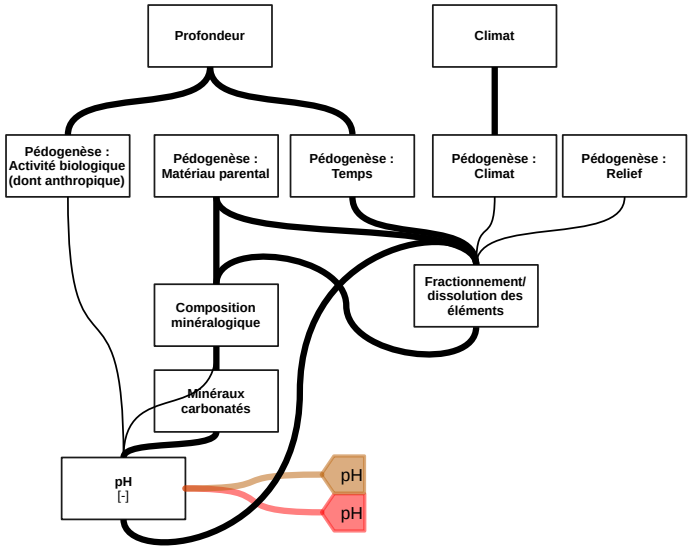


Figure 24: [a actualiser XXX] Dépendances de la propriété "pH" aux propriétés d'une terre. Traits gras/fins : propriétés principales/secondaires affectant la propriété cible. En rouge : méthodes de mesure. Notez l'interdépendance de tous ces éléments, par exemple la rétroaction de la minéralogie sur le fractionnement/dissolution des éléments, et inversement ; ainsi que celle du pH sur la dissolution des éléments.

3.1.2.2.2.2 Estimations par fonctions de pédotransfert

Le pH étant gouverné par le matériau parental et notamment sa teneur en éléments carbonatés et par l'activité biologique, des corrélations à partir de ces informations peuvent permettre de l'estimer.

3.1.2.2.2.3 Bases de données pédologiques

[xxx sujets à déplacer dans la partie cartographie pour ne pas perturber la lecture ici]

Étant aisé à mesurer en laboratoire et relativement bien corrélé à plusieurs facteurs pédogénétiques d'intérêt et aisé à mesurer en laboratoire, le pH est souvent présent dans les bases de données pédologiques spatialisées.

3.1.2.3 Ions en solution et adsorbés

3.1.2.3.1 Mécanismes

La baisse de pH dissout progressivement les minéraux du sol qui libèrent des ions chargés positivement : Na+, Ca2+, Al3+ (Torrance & Pirnat 1984). Les cations possédant respectivement une, deux ou trois charge positive sont dits « monovalents » (Na+, K+), « divalents » (Ca2+) et « trivalents » (Al3+).

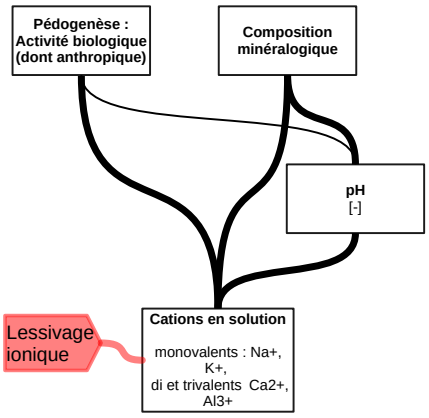


Figure 25 : Dépendances de la propriété "pH" aux propriétés d'une terre. Traits gras : propriétés principales affectant la propriété cible. En rouge : méthodes de mesure.

Par ailleurs, ils peuvent être apportés par l'activité biologique et notamment anthropique. Le calcium est apporté en grande quantité dans les pratiques de chaulage. Le sodium peut être apporté par l'eau d'irrigation lorsque celle-ci ne provient pas des précipitations, ce qui a terme peut mener à la salinisation des sols, dégradant fortement leur qualité agronomique et écosystémique. Les anions azotés et phosphorés sont apportés par épandage de fumures animales ou de via des fertilisants synthétiques (pour l'azote) ou issus de l'extraction minière (phosphore). Le type de culture, via l'humus qu'elles engendrent participe à l'acidification et à la libération/rétention des ions du sol.

Ces ions sont dits libérés dans le sens où ils ne sont plus liés par liaisons covalentes à leurs minéraux d'origine. En revanche, ils peuvent être soit « mobiles », en solution, soit *adsorbés* en surface d'éléments solides chargés par attraction électronique.

La quantité d'ions liés aux minéraux, adsorbés ou libres dans la solution du sol dépend d'équilibres acido-basiques complexes détaillés par XXX (trouver ref).

3.1.2.3.2 Propriétés gouvernantes

La qualité et quantité d'ions en solution est donc dépendante de la composition minéralogique du sol initial, mais peut aujourd'hui évoluer rapidement dans un sol selon sa gestion agronomique, directement ou via la variation du pH.

[xxx Question pour Myriam : faut-il traiter les cations seulement car ce sont eux qui se lient préférentiellement avec les argiles… ?]

3.1.2.3.3 Mesures et estimations

3.1.2.3.3.1 Mesure

La mesure des ions de la solution du sol n'est pas courante car elle suppose son extraction pour l'analyse et est sujette à des variation selon la méthode de mesure (Mitchell & Soga 2005).

De plus, elle varie fortement dans le temps selon la gestion agronomique. Une mesure plus courante est la Capacité d'Echange Cationique (CEC) qui ne mesure pas la quantité d'ions du sol mais la quantité de charges disponible pour leur adsorption en surface des solides du sol (voir XXX CEC).

3.1.2.3.3.2 Estimations

Comme le pH, la composition ionique peut être supposée en connaissance des pratiques agronomiques passées et récentes et du matériau parental.

3.1.2.3.3.3 Bases de données pédologiques

Cette donnée est rarement présente dans les bases de données pédologiques pour les raisons explicitées précédemment.

3.2 Solides

Dans ce chapitre, on considérera comme élément *solide* indépendant une masse d'atomes liées essentiellement par des liaisons covalentes : structures cristallines des minéraux, molécules organiques, *etc*. Ces liaisons sont dites « fortes », car elles sont généralement plus stables que les liaisons ioniques (voir XXX cohésion?).

Au cours de la pédogenèse, un matériau parental rocheux est amené à se fragmenter progressivement sous l'influence des conditions pédogénétiques en *granulats minéraux* de plus en plus petits. D'autres granulats dits *allochtones* peuvent être apportés et se mélanger aux granulats développés in situ : ceux-ci sont eux-mêmes issus de mécanismes de pédogenèse-érosion. Enfin, certains granulats peuvent être issus de la *néoformation* de minéraux par cristallisation d'éléments dissous dans la solution du sol. Les granulats minéraux forment la majorité des éléments solides dans la plupart des sols. La proportion d'éléments apportés par procédés de transformation *in situ* ou *allochtones*

permet de classer les sols selon leur développement dans un matériau parental sous-jacent ou dans des dépôts sédimentaires ; mais bien souvent les apports sont mixtes. Par exemple dans Nord du Massif Armoricain, des dépôts de limons éoliens se sont déposés sur des sols au cours d'une pédogenèse de roches granitiques ou schisteuses : les dépôts allochtones se mélangent avec les éléments produits par la pédogenèse autochtone qui continue par ailleurs à altérer la roche sous-jacente. En résulte des transitions plus ou moins claires entre des horizons mélangeant des proportions variables des deux matériaux.

[carte exemple? Profils exemples ? Xxx ajouter avec chapitre carto]

Les *matières organiques* issues de la croissance et la décomposition d'êtres vivants s'ajoutent à cette composition minérale. Les cycles des matières organiques du sol sont divers et complexes, de partla diversité des processus biologiques y participant. On peut cependant expliciter des grandes étapes du cycle de vie de la biomasse dans les écosystèmes : 1) Les végétaux produisent la majorité de la biomasse en captant le CO_2 atmosphérique par photosynthèse ; 2) Les tissus végétaux sont progressivement dégradés par la biodiversité du sol qui les fragmente en éléments de plus en plus petits ; 3) des tissus et molécules organiques sont néoformées au cours de la dégradation et apporte encore de la diversité organique. On peut faire un parallèle avec la décomposition minérale des granulats du sol, fragmentation progressive menant à une néoformation de nouveaux minéraux (voir xxx pédogenèse).

Enfin, au cours des processus pédogénétiques et particulièrement par action biologique, par exemple par l'action des lombriciens, les granulats minéraux et les composés organiques sont mélangés et agrégés.

Les propriétés des granulats solides dépendent de leur composition minéralogique ou chimique, de leur taille et de leur forme.

Pour les granulats de grande taille, la composition minéralogique a peu d'effet sur les propriétés comportementales mobilisées dans les procédés de terre crue, tant que leur résistance mécanique est d'un ordre de grandeur supérieur aux contraintes appliquées au cours des procédés: les granulats fragiles pourraient être rompus et avoir pour conséquence la modification de leurs propriétés de taille et de forme (p. ex. pour des roches sédimentaires peu indurées, notamment roches calcaires). Pour tous les autres cas, la taille et la forme gouvernent les propriétés mécaniques et de rétention d'eau.

Pour les granulats de petite taille, les propriétés comportementales sont fortement influencées par leur composition minéralogique, notamment leur réactivité électronique, et dans une moindre mesure leur potentiel de dissolution/cimentation au cours des procédés (p. ex. pour les roches calcaires). Les solides de petite taille présentent en effet des propriétés *colloïdales*, un comportement spécifique de particules de taille inférieur au micromètre, qui en mélange dans un liquide sont moins impactés par les effets de la gravitation que par ceux de l'agitation thermique moléculaire propres aux fluides : le mouvement Brownien[26]. La conséquence est que ces particules ne sédimentent que très

26 mouvement aléatoire d'une « grosse » particule immergée dans un fluide et qui n'est soumise à aucune autre interaction que des chocs avec les « petites » molécules du fluide environnant. Il en résulte un mouvement très irrégulier de la grosse particule.

lentement et donnent une apparence de stabilité de la suspension. Ces propriétés colloïdales sont favorisées par leur petite taille, mais également par les possibilités de liaisons hydrogènes et les charge électronique qui les font interagir avec l'eau et être retenues en suspension. Par ailleurs, la stabilité du comportement colloïdal des particules en suspension est affectée par le pH et la composition ionique de la solution (Communauté Wikipédia 2024).

Ces propriétés décrivent un comportement en suspension, mais le sol n'est pas une suspension liquide tant qu'il n'a pas été remanié. Cependant, dans les sols naturels la présence d'eau induit l'expression de ces propriétés colloïdales, qui entraînent une plus grande sensibilité à la réactivité électronique avec d'autres colloïdes ou avec l'eau qu'à la gravité ou la friction.

3.2.1 Éléments solides non colloïdaux

3.2.1.1 Granulométrie

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

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

	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	0.002
Limon	0.002	0.075	0.002	0.05	0.002	0.063	0.002	0.08
Sable	0.075	2	0.05	2	0.063	2	0.08	2
Gravier	2	-	2	-	2	-	2	-

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, 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.

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.

On rencontre de nombreuses terminologies concernant la granulométrie qui peuvent prêter à confusion et favoriser une mauvaise transmission des informations. 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). Pour la fraction maximale qui n'a pas de limite supérieure, on rajoutera le suffixe _D (« jusqu'au plus gros diamètre »).

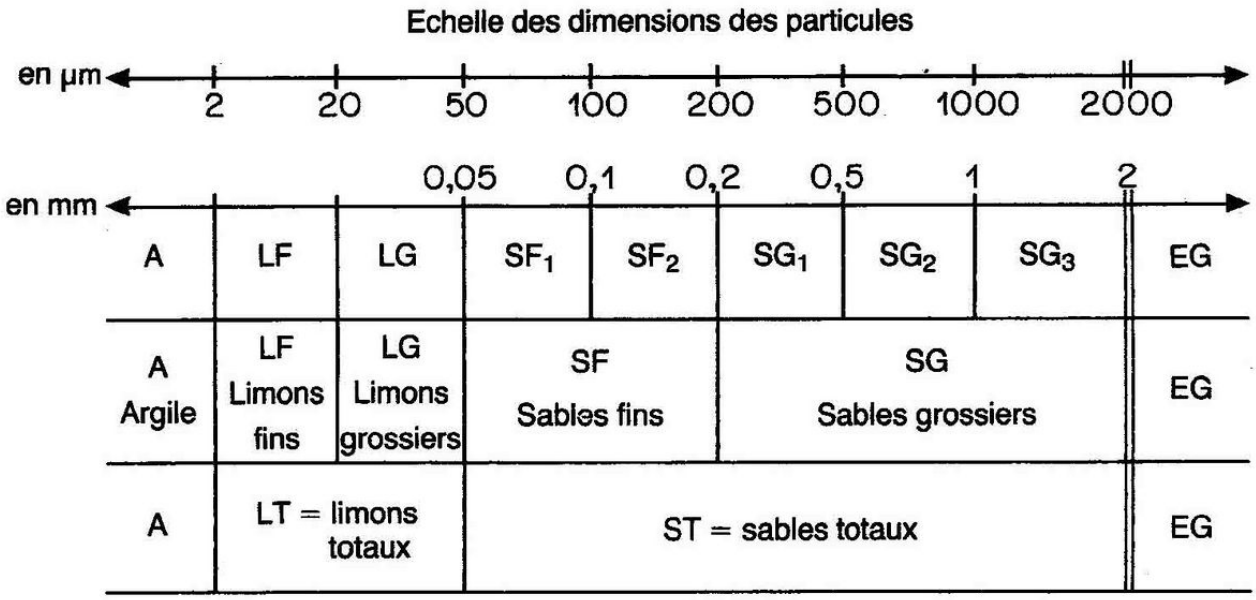


Figure 26 : classification des éléments du sol selon leur taille (Baize 2024)

Dans cette classification issue de la littérature agronomique (Figure 26), 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 26.

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 parfois la formule F2000µm_D. Si nécessaire, suivant la classification du Référentiel Pédologique (AFES (Association Française pour l'Etude 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).

3.2.1.1.1 Minéraux argileux et fraction granulométrique « argiles »

La classification des tailles des éléments du sol repose sur le constat d'une certaine homogénéité des propriétés des éléments de ces fractions, et qu'ainsi les propriétés du sol sont plus ou moins bien corrélées à l'abondance de chacune de ces fractions. Les fractions les plus fines du sol sont souvent associées à des tendances de composition minéralogiques qui expliqueraient leurs propriétés particulières. Par exemple, les éléments présents dans la « fraction argileuse » sont souvent des phyllosilicates (argiles, voir XXX plus loin), ceux de la fraction limoneuse des minéraux peu réactifs par exemple des quartz, et les granulats plus grossiers seraient souvent des éléments rocheux composés de plusieurs types minéraux (Brady & Weil 1984).

Pourtant, ces tendances générales ne peuvent être utilisées avec précision, et l'idée qu'à une fraction granulométrique correspond une propriété du sol, par exemple une famille de minéraux, est purement théorique. Les classes granulométriques ne traduisent pas directement la composition minéralogique d'une terre. En réalité, les limites abruptes n'existent pas, la terre est plutôt constituée d'une succession de particules de différentes tailles (Peinemann et al. 2000). Aussi, la classe 0-2 µm est souvent appelé « argiles » ou « fraction argileuse », ce qui crée une ambiguïté avec les minéraux argileux (Mitchell & Soga 2005; Schaller et al. 2021), alors que la définition granulométrique des « argiles » ne correspond pas à la définition minéralogique (Peinemann et al. 2000). D'une part car des particules non argileuses (quartz, micas, etc.) sont présentes dans la classe 0-2 µm (Vinceslas 2019), d'autre part car les classes 2-50 µm et 50-2000 µm contiennent des argiles, sous forme d'agrégats ou en manteau sur d'autres particules (Curtin & Smillie 1976; Brady & Weil 1984; Peinemann et al. 2000).

Le terme « argiles » sera peu utilisé dans ce rapport, on préférera préciser l'expression « minéraux argileux », et lorsque que l'on n'utilisera pas les formulations présentées (F ou P), on parlera de *fraction granulométrique argileuse* ou *fraction argileuse* pour désigner la fraction inférieure à 2µm (F2µm).

3.2.1.1.2 Granulat ou agrégat ?

La granulométrie du sol est parfois instable lorsque des agrégats semi indurés ou friables peuvent se fragmenter dans les processus de mélange in situ ou de tamisage pour caractérisation (Harries et al. 1996). Ainsi, la granulométrie grossière peut être amenée à varier significativement.

Il y a donc une certaine continuité avec la structure des *agrégats* dans la mesure de la granulométrie. La définition de l'unicité des « éléments solides » est donc discutable et dépend d'un ensemble d'interactions covalentes et non covalents. Notamment, certains granulats fragiles (p. ex. certains calcaires ou roches sédimentaires) peuvent être moins

cohérents que des agrégats argileux. De manière générale, on pourra considérer que ce qui relève de la granulométrie est la distribution de taille qui n'est pas modifiée dans les étapes de manipulation de la matière, tandis que ce qui relève de la structure des agrégats est un état à un moment donné du procédé, par exemple après l'extraction du sol (voir xxx extraction).

3.2.1.1.3 Représentation

Lorsque l'analyse des tailles des granulats permet l'obtention de classes granulométriques plus fines, le *passant granulométrique cumulé* peut être représenté relativement au logarithme de la taille des éléments sous forme d'une *courbe de distribution granulométrique* (voir les figures X et X au chapitre 1). Cette représentation appelée *nomogramme* est la seule qui permet de positionner sur un même diagramme l'ensemble des passants granulométriques mesurés. Cependant, lorsque peu de passants sont

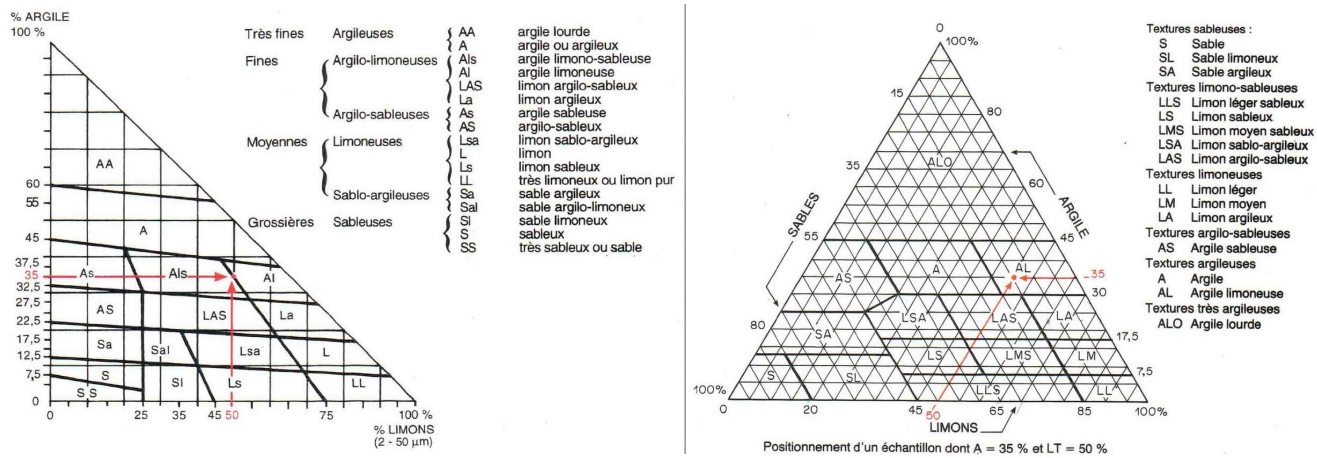


Figure 27 : A gauche, diagramme des textures du GEPPA (1963). A droite, diagramme de classification des textures du service de la carte des sols de l'Aisne (Jamagne, 1967).

mesurés, l'interpolation entre deux points peut devenir assez hasardeuse et donner une fausse impression de qualité d'information.

Lorsque seule la fraction fine est étudiée, et que l'on dispose des trois fractions F2µm (argiles), F50µm (limons) et F2000µm (sables), on peut représenter la granulométrie sur un diagramme ternaire en pourcentage massique de chaque fraction, supposant que la somme des trois fractions est égale à 100 %. Ce diagramme ternaire est appelé *diagramme des textures*. Il peut être représenté de manière orthogonale avec F2µm en ordonnées et F2000µm en abscisse (Figure 27, à gauche), ou sous forme d'un triangle équilatéral (Figure 27, à droite). La seconde forme est plus facile à lire, tandis que la première est plus aisée à faire représenter par un logiciel. Les deux formes seront rencontrées dans ce travail de thèse. Le diagramme des textures apporte moins d'information que le nomogramme granulométrique lorsque des passants intermédiaires aux trois fractions citées sont connus. Il est cependant fréquemment utilisé et relativement plus aisé à lire.

Le diagramme des textures est souvent découpé en *classes texturales* qui facilitent les échanges en nommant des typologies de texture à propriétés semblables. Les classes texturales dépendent également des systèmes de classifications choisis. Dans la plupart des diagrammes des textures, il s'agit de délimitations basées sur la variation de propriétés d'intérêt pour l'agronomie : sensibilité au tassement du sol, rétention d'eau,

facilité de travail du sol, etc. Certain.es auteur.ices suggèrent donc de ne pas employer ces délimitations pour d'autres propriétés que pour l'agronomie (Twarakavi et al. 2010). D'autre part, on a vu que la granulométrie n'était pas une garantie des propriétés des sols. Selon les propriétés que l'on cherche à prédire, on s'orientera préférentiellement vers des représentations plus spécifiques à celles-ci.

[je n'en reparle pas. Peut être ajouter description du GTR quand on parle de VBS/CEC ? xxx]

3.2.1.1.4 Mesure, estimations, représentations

3.2.1.1.4.1 Mesure

La mesure de la granulométrie est une opération de routine dans les sciences du sol et de ce fait, il existe plusieurs méthodes permettant d'évaluer et de classer la taille des granulats qui le composent. Les deux méthodes paraissant les plus courantes combinent le tamisage par voie humide de la fraction grossière du sol et l'analyse par sédimentométrie ou granulométrie laser des fractions fines. Ces deux méthodes ont l'avantage d'être relativement rapides pour procurer une information presque continue sur les passants granulométriques ce qui permet de réduire les biais d'interpolation sur les nomogrammes. Cependant, les méthodes de sédimentométrie et granulométrie laser sont basées sur des modèles supposant les granulats sphériques et non chargés, ce qui entraîne des biais dans l'estimation des granulométries fines où des minéraux comme les argiles sont chargées et/ou non sphériques.

De plus, il est parfois difficile d'éviter les biais d'échantillonnage pour les fractions grossières. En effet, la teneur en éléments grossiers du sol varie très vite dans l'espace (verticalement et horizontalement), et nécessite des prélèvements conséquents pour être représentatifs (AFES (Association Française pour l'Etude des Sols) 2008).

[est-ce le moment de parler de tests de terrain? Je sais pas si je vais avoir le temps de développer...]

3.2.1.1.4.2 Estimations

La compréhension des phénomènes pédogénétiques permet d'expliquer la composition granulaire des sols dans l'espace (voir XXX pédogenèse). Par exemple, dans les sols développés par altération d'un matériau parental dur, la fragmentation progressive des éléments détachés du front d'altération explique une corrélation positive entre la teneur en granulats grossiers et la profondeur de l'horizon. Particulièrement pour les sols issus de matériaux plus durs (p. ex. granites), qui seront par ailleurs plus grossiers pour un même âge pédogénétique. Pour ces sols « peu mélangés », on peut donc avoir de bonnes présomptions de composition granulométrique des sols par le biais de la connaissance du matériau parental via des cartes géologiques ou pédologiques, et par la distance des horizons considérés au front d'altération.

Lorsque les sols ont subi des phénomènes de transport, la prédiction est plus difficile dès lors que l'organisation verticale est modifiée par mélange des horizons et/ou que les matériaux ont pu être transportés sur de grandes distances. C'est le cas des sols issus de transports sédimentaires qui peuvent subir des phénomènes de granuloclassement très

marqués. Dans ces cas, les facteurs principaux gouvernant la granulométrie sont l'intensité des flux de transport éoliens ou hydriques locaux et les matériaux transportés, qui peuvent avoir fortement varié au cours des millénaires et sont donc peu prédictibles. Cependant, les sols issus d'alluvions sont souvent identifiés comme tels dans les bases de données géologiques et pédologiques. On peut donc suggérer l'emploi des cartes géologiques comme première approche des granulométries potentielles locales, sauf pour les sols alluvionnaires pour lesquels la composition est moins prédictible (Figure 28).

3.2.1.2 Elancement, rugosité

3.2.1.2.1 Description

La taille des granulats du sol est une première approche de la forme des constituants. Les modèles de mesure et d'estimation de la taille des éléments supposent souvent des formes sphérique, par exemple pour étudier l'empilement granulaire potentiel. Or, les éléments du sol sont de formes très variées.

Une première approche de la forme globale du granulat peut être décrite par son *élancement*, c'est à dire le rapport entre la plus grande et la plus petite dimension, que l'on nommerait *longueur* et *épaisseur*. Ensuite, c'est la forme de sa surface qui peut être qualifiée par l'intensité de son *angularité* (à moyenne échelle) et sa *rugosité* (à échelle microscopique) (Mitchell & Soga 2005; Koutous & Hilali 2019). La régularité d'un granulat donc dépend de l'échelle de mesure considérée, puisque une surface d'apparence macroscopique lisse peut se montrer rugueuse à l'échelle microscopique, et inversement.

Par exemple, plusieurs qualificatifs sont donnés pour les formes des éléments grossiers du sol dans les bases de données pédologiques. On peut distinguer leur forme globale : arrondis, allongés, aplatis, ou irréguliers ; et leur état de surface : émoussés ou anguleux (InfoSol 2021).

Les éléments microscopiques sont également concernés : les minéraux argileux sont décrits comme en forme de plaquettes dont le rapport entre l'épaisseur et la surface peut être considérable.

Enfin, les éléments minéraux du sol ne sont pas les seuls dont la forme participe à ses propriétés. Les macro et microéléments organiques présentent des élancements parfois bien plus conséquents que ceux des éléments minéraux. Notamment, l'élancement des fibres organiques issues de racines ou tiges plus ou moins dégradées naturellement

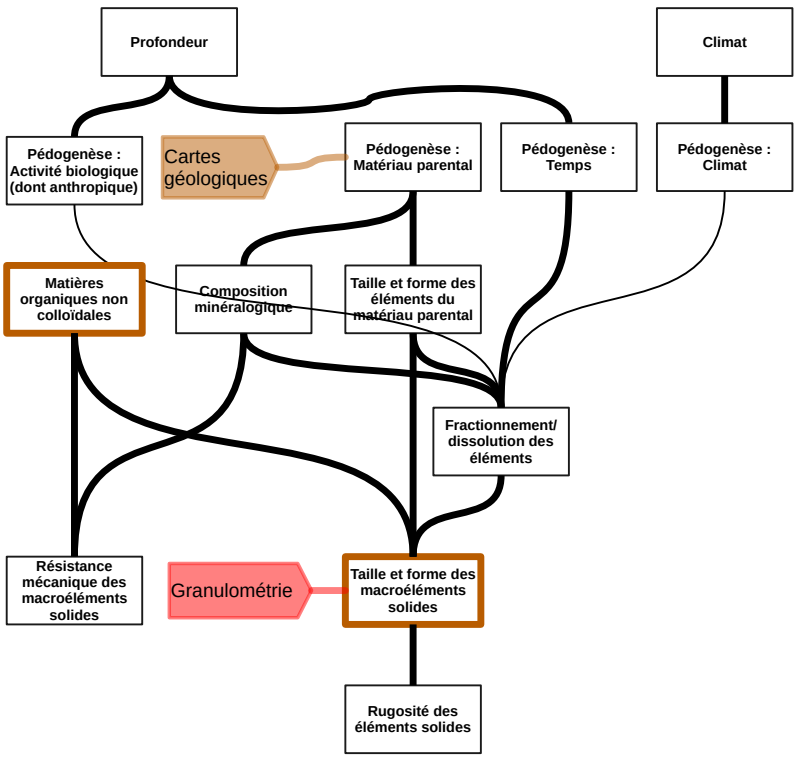


Figure 28 : [XXX a actualiser] Dépendances des propriétés de composition des granulats aux propriétés pédogénétiques. Traits gras : propriétés principales affectant la propriété cible. En rouge et marron : méthodes de mesure et données spatialisées existantes.

présents ou ajoutés aux mélanges de terre est souvent supérieur à 10 ; les molécules organiques en chaînes comme les polyosides peuvent s'étendre entre les éléments du sol avec des élancements encore plus grands (Vissac et al. 2017).

Surtout, dans les mélanges de terre crue remaniés, des éléments organiques élancés sont souvent ajoutés pour modifier leurs propriétés (voir xxx fibres ductilité?).

3.2.1.2.2 Mesure et estimations

Diverses méthodes sont utilisées pour l'étude de la forme des grains et dépendent de la taille des grains étudiés et des propriétés recherchées. Certaines permettent l'évaluation quantitative de la forme des grains et sont utilisées dans l'étude des matériaux granulaires non cohésifs (Yao & Li 2023). En ce qui concerne les sols naturels, la description typologique est fréquente pour les éléments grossiers dans les études pédologiques (InfoSol 2021). Il est aussi fréquent de rencontrer des évaluations de l'élancement des fibres ajoutées aux mélanges de terre pour la construction en terre crue (Vinceslas 2019). Cependant, pour l'ensemble des grains du sol et notamment les plus fins les mesures quantitatives ne sont pas fréquentes (Koutous & Hilali 2019). Koutous & Hilali (2019) proposent une méthode d'estimation de l'élancement des granulats de chaque fraction granulométrique tamisée par un second tamisage des granulats avec un tamis deux fois plus fin, permettant la détermination d'un coefficient d'élancement (« flakiness index ») par le rapport entre la fraction passante et non passante entre le demi-tamis.

On peut supposer que lorsque la forme des éléments grossiers du sol est liée à leur composition minéralogique (p. ex. pour les schistes qui se délitent en plaques), les microéléments issus de leur dégradation partagent des similarités avec les macroéléments jusqu'à une certaine échelle. Mais en dessous de l'échelle de la structure de la roche initiale cela est moins probable.

La forme des éléments du sol témoigne de l'histoire érosive qu'ils ont subi. Des éléments issus de roches dures fraîchement fragmentées auront des élancements caractéristiques de l'éventuelle structure de la roche (p. ex. pour les schistes), ainsi qu'une forte *angularité*. Des éléments transportés par des fluides (eau ou air) présenteront des géométries moins anguleuses, arrondies par les chocs répétés avec d'autres granulats. Ici encore, le matériau parental est d'importance centrale et pourrait être une bonne estimation de la forme des éléments. Pour les dépôts sédimentaires, l'origine du dépôt pourra également renseigner en permettant l'identification de l'origine du matériau parental et/ou le mode de transport (gravitaire, hydrique, éolien…). Pour cette raison, la topographie aura également un impact sur les typologies d'agrégats rencontrés car elle participe au déplacement de roches fraîchement fragmentées (p. ex. en contexte montagneux).

3.2.2 Solides colloïdaux et chargés électroniquement

Les tailles de particules inclues ou non dans la catégorie des colloïdes est généralement définie par la limite inférieure de 1 nanomètre et supérieure de 1 micromètre. En sciences du sol, les auteur.ices décrivent généralement la fraction granulométrique argileuse (F2µm) et tout ou partie de la fraction limoneuse (F50µm) comme des fractions granulométrique au comportement colloïdal (Weil & Brady 2016; Meimaroglou & Mouzakis 2019). Cependant, le comportement dit « colloïdal » n'est pas uniquement lié à la taille

mais également à la réactivité chimique des particules, elle-même dépendante de leur composition. Dans les sols naturels, on rencontre parmi les composants chargés électroniquement :

- des phyllosilicates, c'est à dire des minéraux argileux aux propriétés de réactivité chimique variables ;

- des matières organiques presque toujours réactives mais également variables ;

- des oxydes et hydroxydes métalliques.

Les oxydes et hydroxydes métalliques ont un impact important sur les propriétés des sols en contenant des quantités significatives, notamment les sols tropicaux (Meimaroglou & Mouzakis 2019). Dans les sols de l'Hexagone, ils sont généralement présents en faibles quantités devant les autres colloïdes du sol. On ne considérera donc pas leur impact sur les propriétés des sols dans ce travail.

3.2.2.1 Minéraux argileux

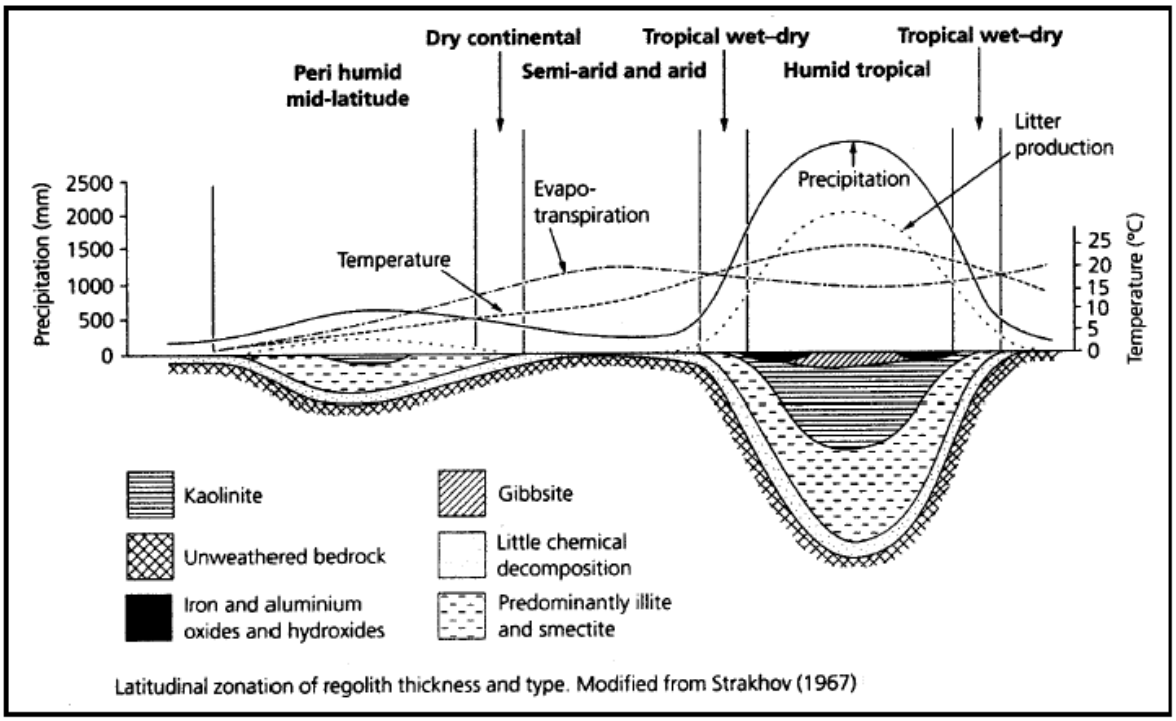
3.2.2.1.1 Composition minéralogique

3.2.2.1.1.1 Formation

A l'affleurement des roches au contact de l'atmosphère, les minéraux qui les composent ne sont plus à l'équilibre thermodynamique de leur formation. La pédogenèse fragmentant les matériaux parentaux en agrégats de plus en plus petits, la surface d'échange avec la solution du sol se développe. Les minéraux entament alors un processus de dissolution plus ou moins rapide selon leur réactivité et les conditions de la solution du sol, aussi appelée *hydrolyse*. Notamment, le pH (XXX pH), la chaleur et le renouvellement de la solution du sol par les précipitations influencent cette vitesse de dissolution des minéraux : elle est donc dépendante du climat et de leurs propriétés chimiques.

Leur dissolution entraîne la mise en solution de divers éléments chimiques (silice, aluminium, magnésium, et autres ions solubles). Selon les conditions chimiques de la solution du sol, notamment la quantité relative des ions dissous, le pH, l'oxygénation, etc., ces éléments vont s'assembler sous la forme minérale dont l'équilibre thermodynamique est le plus favorable. Ainsi, selon les matériaux parentaux, le climat, et le temps conditionnant l'avancée de la dissolution, les formes majoritaires de ces minéraux *néoformés* ne sont pas les mêmes (Weil & Brady 2016). Les minéraux sont une forme stable de précipitation des éléments dissous, et la diversité de leurs compositions dépend des éléments en solution. Les oxydes et hydroxydes métalliques sont aussi des minéraux néoformés issus de la dégradation des roches. Ils représentent un stade de dégradation très avancée où la majorité de la silice a été dissoute et lessivée : ces minéraux sont rencontrés principalement en zones tropicales où l'intensité de la pédogenèse est plus conséquente (Figure 29). Dans les climats tempérés, les diverses formes de feuillets argileux (voir ci-après) représentent des formes courantes de minéraux néoformés mais les oxydes et hydroxydes métalliques sont présents en quantités négligeables pour les propriétés du sol, sauf cas particuliers comme les paléosols[27].

27 Les paléosols sont des sols hérités de temps géologiques plus anciens que la pédogenèse majoritaire alentours, préservés de l'érosion récente (en France hexagonale, la dernière glaciation). Par le biais du déplacement des continents, ils peuvent avoir été formés sous d'autres latitudes ce qui explique leur similitude avec certains sols



Hydrolyse et zonation climatique (Allen, 1997).

Figure 29 : néoformation des minéraux dans les sols selon le climat de la pédogenèse. La variation des températures et des précipitations selon la latitude est représentée.

Les argiles du sol, comme les autres composants, peuvent également être *héritées* d'un matériau parental, celui du socle sous-jacent ou un apporté par les processus sédimentaires. Lorsqu'elles sont *héritées*, c'est qu'on considère le processus de formation s'est fait dans d'autres conditions que la pédogenèse en cours: elles ont pu être transportées, enfouies, transformées depuis leur formation au sein du cycle des roches (XXX cycle des roches). Il n'y a pas de vraie limite entre la néoformation et l'héritage mais plutôt un continuum de situations qui peuvent parfois se rapporter à l'une comme à l'autre.

Le procédé de néoformation est relativement lent en climat tempéré, et à l'échelle de la pédogenèse, la dissolution des minéraux et la *néoformation* des argiles est parfois négligeable devant l'apport d'argiles *héritées* du matériau parental fragmenté lorsque celui-ci en contient (p. ex. des roches sédimentaires comme les marnes ou certains calcaires). En revanche, lorsque le matériau parental contient peu d'argiles, la néoformation permet l'apport de quelques pourcents de minéraux argileux sur les millénaires de pédogenèse, notamment sous l'influence du couvert végétal et des acides organiques de la litière du sol (Caner et al. 2010).

3.2.2.1.1.2 Description

Afin de comprendre l'effet d'un groupe de minéraux argileux relativement à un autre dans un sol, il est nécessaire de comprendre leur structure et leur composition. Les briques élémentaires composant la plupart des minéraux argileux sont les tétraèdres silice-oxygène et les octaètres aluminium-hydroxyle ou magnésium-hydroxyle. Ces briques élémentaires, et les principaux minéraux argileux qu'ils composent, sont représentés sur la Figure 30.

actuels que l'on retrouve dans des climats très différents.

Les formes cristalline stables de ces briques élémentaires sont les *couches*, associés en *feuillets*: les *couches* sont composées soit d'octaèdres, soit de tétraèdres, et s'associent en *feuillets élémentaires* comprenant un enchaînement de *couches* octaèdres-tétraèdres et éventuellement d'*espaces interfoliaires*. Les catégories d'argiles sont définies selon le nombre de couches de tétraèdres et d'octaèdres composant les feuillets : 1:1 pour un feuillet octaèdre-tétraèdre (p. ex. kaolinite), 2:1 pour un feuillet tétraèdre-octaèdre-tétraèdre (p. ex. illite).

C'est la plus petite unité de répétition de cet enchaînement qui est appelée *structure élémentaire* et qui est employée pour distinguer les familles de minéraux argileux. En climat tempéré, cinq sont prédominantes: kaolinite, illite, smectite, vermiculite et chlorite (Figure 29). Certaines structures élémentaires sont composées de « deux couches puis un espace » (kaolinites) ou trois couches puis un espace » (illites, smectites, vermiculites), d'autres d'un enchaînement de « trois couches, un espace, une couche, un autre espace » (chlorite) (Figure 30). On peut encore distinguer des variations de composition chimique au sein de ces familles, par exemple par les teneurs relatives en différents ions au sein des structures cristallines des couches ou entre les feuillets lorsque la structure élémentaire comprend des espaces interfoliaires (Meunier 2003).

Les forces d'attraction entre deux feuillets argileux parallèles sont généralement fortes ce qui induit leur agrégation (ou directement leur formation) en association de feuillets parallèles : les agrégats argileux. Dans ces agrégats, les feuillets sont séparés par des *espaces interfoliaires* plus ou moins accessibles aux ions de la solution du sol et à l'eau (Figure 30).

Dans tous les cas, l'agencement en agrégats consiste en la superposition des structures élémentaires. Souvent, les agrégations ne sont pas purement d'une seule famille de *feuillets élémentaire*, mais présentent une alternance de plusieurs types: associations illites/smectites par exemple. D'autre part, des structures minérales argileuses en cours de formation peuvent être difficile à

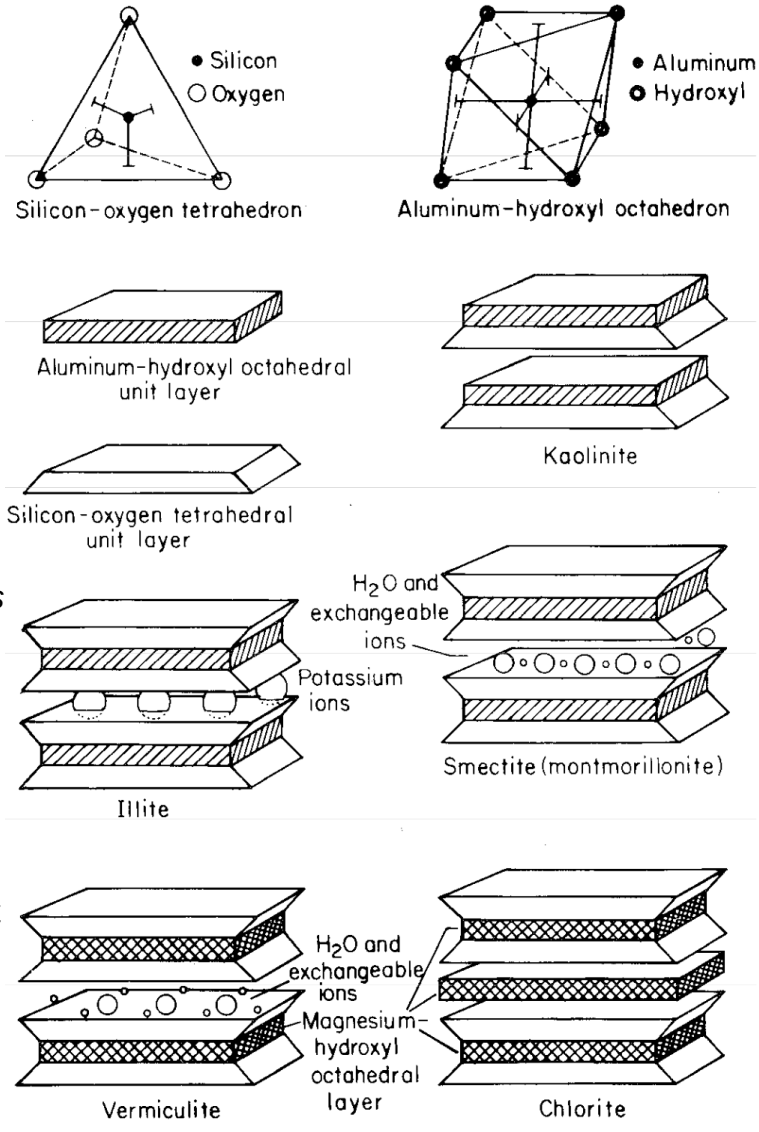


Figure 30 : Diagramme représentant les principaux types de minéraux argileux. (Smith & Austin 1989), modified from Harrison and Murray, 1964; Austin, 1975).

catégoriser par leur irrégularité : on parle d'argiles *amorphes* (Meimaroglou & Mouzakis 2024).

Le type d'argile dissout ou néoformés dans un sol dépend de l'équilibre des ions en solution et du pH (Schaller et al. 2021).

De manière simplifiée, l'avancement de la pédogenèse tend à favoriser la dissolution de la silice (désilicatisation) et par conséquent favoriser la concentration relative des couches d'hydroxydes métalliques (p. ex. aluminium ou Magnésium). C'est ainsi que certaines argiles comme les kaolinites sont néoformées dans des processus de pédogenèse plus avancés que les smectites. C'est pourquoi dans une chronoséquence pédologique[28], le suivi de la composition des argiles et notamment de la composition relative des associations de plusieurs types argileux peut être considéré comme indicateur d'étapes d'avancement de la néoformation des argiles (Caner et al. 2010). Elles peuvent faire l'objet de classifications plus détaillées (Meunier 2003).

Les octaèdres et les tétraèdres composant les couches des feuillets argileux peuvent comporter des charges négatives. L'intensité d'électronégativité est dépendante de l'intensité des *substitutions isomorphiques*, c'est à dire remplacement des atomes Al3+ des octaèdres par d'autres atomes de charge différente (Mg2+ par exemple) (Meimaroglou & Mouzakis 2019).

Les *substitutions isomorphiques* sont rares pour les kaolinites et fréquentes pour les smectites et Illites par exemple. L'intensité de charge négatives qui en découle influence le contenu des espaces interfoliaires, qui peuvent alors être de différentes natures :

- Lorsque les différents feuillets sont neutres, ils sont liés entre eux par des liaisons hydrogène dans le cas des espèces 1:1, ou par des liaisons de Van Der Wals dans le cas des minéraux 2:1 (Coventry 2004). Les liaisons hydrogène sont des liaisons relativement fortes, qui empêchent la pénétration d'ions et l'hydratation de l'espace interfoliaire. C'est pourquoi les argiles 1:1 (kaolinites) ne sont pas « gonflantes ». Elles ont aussi une plus forte tendance à s'accumuler, formant des empilements jusqu'à 70-100 couches, réduisant d'autant plus la surface de contact cohésive potentielle avec d'autres particules à leur seule périphérie (Coventry 2004). C'est également pour cette raison que la CEC et les propriétés cohésives des argiles de type 1:1 sont généralement inférieures à celles des argiles de type 2:1 (Coventry 2004; Ciancio et al. 2013; Weil & Brady 2016).

- Lorsque les différents feuillets sont chargés négativement par *substitution isomorphique,* ils sont occupés par des cations qui rétablissent l'électro-neutralité du système et en même temps assurent la liaison entre les feuillets adjacents, qui est alors de nature ionique. En effet, puisque les charges négatives se repoussent, pour les argiles chargées l'agrégation en feuillets n'est possible que par liaison *via* la présence de cations dans les espaces interfoliaires (Coventry 2004; Shainberg & Levy 2005). Les cations les plus fréquents sont Ca2+, Mg2+, K+, Na+,Li+. Ces cations, et l'espace interfoliaire conséquent généré par leur présence entre les couches favorise la pénétration d'eau entre les argiles et donc les phénomènes de retrait-gonflement des agrégats argileux lorsque la teneur en eau varie (voir retrait-gonflement XXX).

28 Série pédogénétique dont le facteur de variation relatif est le temps. Par exemple, sols progressivement découverts par un glacier ; sols issus d'éboulements ou de dépôts sédimentaires semblables mais plus ou moins récents, etc.

Enfin, pour tous les minéraux argileux, la périphérie des feuillets est systématiquement chargée car la structure cristalline n'est pas « complète » (Meimaroglou & Mouzakis 2019). Les feuillets argileux s'agrègent principalement parallèlement, mais peuvent donc également interagir latéralement et plus généralement dans une diversité d'arrangements dépendant de nombreux paramètres de composition et de remaniement du sol (voir Figure 51).

3.2.2.1.1.3 Mesures et estimations

La minéralogie peut être mesurée par diverses techniques d'observation directe (microscopie) ou de caractérisation chimique (Mitchell & Soga 2005; Lagouin et al. 2021; Fabbri et al. 2022). Ces méthodes permettent d'identifier la présence de différentes familles de minéraux argileux, mais la quantification exacte reste complexe, notamment dû aux associations de couches de différentes familles et aux argiles faiblement cristallisées qui peuvent pourtant représenter des quantités significatives des minéraux argileux du sol (Meimaroglou & Mouzakis 2024).

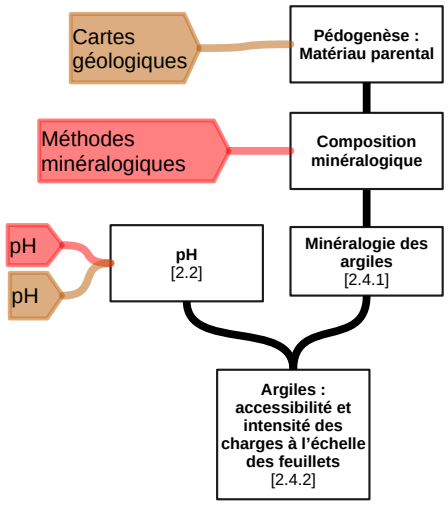


Figure 31 : [a actualiser XXX] Dépendances de la propriété "pH" aux propriétés d'une terre. Traits gras : propriétés principales affectant la propriété cible. En rouge et marron : méthodes de mesure et données spatialisées existantes. Notez l'éloignement causal entre la taille et forme des éléments du sol (mesurée par granulométrie) et la teneur/composition des minéraux argileux (mesurée par minéralogie).

L'apport de minéraux argileux par néoformation dans un sol est un procédé complexe et lent, qui peut souvent être dominé par l'apport via l'un des matériaux parentaux. La composition minéralogique d'un sol en différents éléments argileux est donc globalement sensible à de nombreux facteurs pédogénétiques qui rendent difficile une prédiction de composition relative entre différentes familles de minéraux.

Les fractions granulométriques fines, et notamment la « fraction argileuse » (F2µm) sont souvent bien corrélées à la présence de ces minéraux. Nous avons relevé les raisons pour lesquelles cette corrélation n'est pas parfaite (XXX argiles granulo ou minérales), mais elle existe malgré tout et peut être utilisée avec précautions lorsqu'aucune autre information n'est disponible pour approximer la quantité de minéraux argileux, sans informations sur la proportion des différentes familles (Figure 31).

Enfin, les propriétés de ces minéraux, notamment leur taille et leur affinité à l'eau font qu'elles peuvent subir des phénomènes de transport au sein du profil de sol que l'on appelle *lessivage* ou *éluviation-illuvation*. Les conditions de pH et de composition chimique d'un horizon de sol favorables entraînent la mise en solution des argiles et leur départ (éluviation) avec le déplacement de l'eau en profondeur. A l'arrivée dans un horizon aux conditions défavorables à la mise en solution, elles coagulent à nouveau et se déposent (illuviation). Ce phénomène est particulièrement courant dans les sols les plus grossiers (p. ex. sableux ou sablo-limoneux). Il en résulte que l'on peut observer sur certains profils pédologiques un horizon appauvri en minéraux argileux, appelé horizon éluvial (E) et souvent positionné directement sous l'horizon organique (A) et éventuellement un horizon

sous-jacent enrichi (B). Ainsi, par observation du profil de sol et reconnaissance de la présence de ce type de mécanismes, il est possible d'estimer une certaine richesse relative en minéraux argileux. Notons que c'est parfois l'inverse qui est réalisé sur le terrain par les experts pédologues, à savoir l'identification d'une variation de texture dans le sol permettant d'identifier les horizons E et B, ce qui revient à employer la granulométrie (ou plutôt la plasticité, voir XXX test de terrain pédologie = plasticité) comme indicateur de teneur en argiles minéralogiques. Cependant, dans les bases de données pédologiques où le nom des horizons est décrit, on peut utiliser cette information pour connaître la répartition des minéraux argileux dans le profil de sol.

[si je dis tout ça c'est parce qu'au chapitre carto je discute de l'éluviation illuviation]

3.2.2.1.2 Propriétés des minéraux argileux

3.2.2.1.2.1 Charges électroniques accessibles

Les charges issues de *substitutions isomorphiques* ne sont pas affectées par le pH. Les argiles de la famille des smectites, caractérisées par un fort taux de substitutions isomorphiques, sont donc fortement chargées pour toutes valeurs de pH. Pour les kaolinites, il y a peu de *substitutions isomorphiques* donc peu de ces charges dites « permanentes ».

Cependant, toutes les argiles possèdent une fraction de charges dites « variables », dépendant du pH, notamment issues des bords des feuillets.

Lorsque le pH est bas, les charges positives en périphérie des feuillets augmentent par liaison avec les ions H+ (cf. XXX pH). La Capacité d'Échange Cationique est la capacité à fixer des ions positifs d'un sol (voir aussi plus loin XXX). Cette capacité de fixation est essentiellement liée aux charges négatives du sol, c'est donc en quelque sorte la « négativité » de charge du sol. Donc, plus le sol est chargé positivement, plus la CEC est basse, car les cations ne sont pas fixés. Or, puisque lorsque le pH baisse les argiles développent des charges positives, la CEC baisse également.

Sur la Figure 32, la CEC est représentée selon le pH pour une argile kaolinite, une smectite et un humus organique. Pour les kaolinites, lorsque le pH augmente les charges variables positives sont réduites et ainsi la CEC augmente. En deça de pH 5, les charges positives deviennent inférieures aux charges négatives issues des substitutions isomorphiques et la CEC passe en dessous de zéro. Le pH 5 est donc le *point isoélectrique* des argiles kaolinites, conditions auxquelles la charge totale est neutre (les charges négatives sont égales aux charges positives). Les charges variables des smectites baissent également avec le pH, ce qui fait augmenter la CEC.

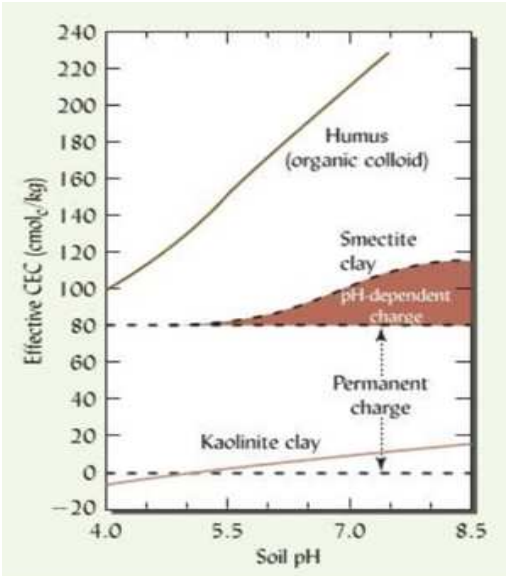


Figure 32 : Influence du pH sur la Capacité d'Echange Cationique d'une Kaolinite, une Smectite et de l'humus organique. (Weil & Brady 2016)

[Question pour Myriam : est-ce les charges positives qui se développement en dessous de pH 6 ou les charges négatives au dessus de pH 6 ? En

fait, la figure donne la charge totale, mais ce qui compte c'est l'ensemble des charges positives-négatives : même au point isoélectrique, l'argile présente de la cohésion électronique avec des charges négatives sur les faces et positives sur les bords… ? Pourquoi une forme de courbe différente pour smectites et kaolinites ? Plus j'y réfléchis moins je comprends !A revoir !]

[comment peut-on mesurer une CEC négative ? Ne serait-ce pas une CEA (anionique)? Avec la baisse de pH, les charges latérales des argiles deviennent également négatives...]

3.2.2.1.2.2 Retrait-gonflement élémentaire

Lorsque des molécules d'eau sont adsorbés à la surface d'éléments du sol, on parle de *manteau d'hydratation*. Lorsque deux éléments solides sont en contact, le développement de ce manteau peut les éloigner l'un de l'autre. La présence de charges électroniques à la surface des argiles ainsi que de cations attire les molécules d'eau et favorise le développement du manteau d'hydratation et donc de l'éloignement des feuillets argileux en contact les un des autres (Brady & Weil 1984).

De manière générale, les argiles de type 2:1 (trois couches) gonflent plus que les argiles 1:1 (deux couches) car les liaisons inter-feuillets sont moins fortes et les substitutions isomorphiques plus fréquentes, ce qui implique d'une part une plus grande accessibilité des espaces interfoliaires à l'eau et d'autre part l'adsorption d'ions dont certains peuvent favoriser d'autant plus l'hydratation.

Par exemple, les smectites présentent de fortes charges négatives, même à bas pH, et contiennent des ions dans leurs espaces interfoliaires. Dans des conditions de pH et d'hydratation du milieu similaires, leur manteau d'hydratation sera donc plus épais que celui des kaolinites, aux charges moins fortes et aux espaces interfoliaires peu chargés et peu accessibles car fortement liés (Coventry 2004).

Toutes les familles d'argiles sont susceptibles de participer aux phénomènes de retrait-gonflement par adsorption de cations et donc d'eau en périphérie des feuillets chargés électroniquement. Pour toutes les argiles, plus la taille des agrégats est petite, plus la surface externe développée est grande, plus les phénomènes de retrait-gonflement sont intenses (Weil & Brady 2016).

Seulement, certains minéraux argileux présentant **en plus** une perméabilité *interfoliaire* aux ions et à l'eau, donc entre les couches argileuses et non seulement à la surface des agrégats de couches, sont susceptibles d'y adsorber de grandes quantités d'eau, pouvant faire doubler de volume les agrégats. Ces argiles sont alors dites « gonflantes » car elles le sont via leurs propriétés cristallines (p. ex. smectites) (Gomes et al. 2014). Les autres sont dites « non gonflantes » en elle-mêmes, mais peuvent l'être dans une moindre mesure, en tant que *colloïdes* qui adsorbent de l'eau à leur surface (p. ex. kaolinites).

Le retrait-gonflement élémentaire des argiles dépend donc, comme la cohésion élémentaire, de la charge électronique donc de la composition minéralogique des argiles et probablement du pH de la solution. Mais il dépend également de la composition de la solution du sol, notamment la présente d'ions qui étendent le manteau d'hydratation. Enfin, il dépend probablement de l'organisation des argiles et leur agrégation initiale et

finale, notamment pour les argiles non-gonflantes, car des argiles moins agrégées développent plus de surface d'adsorption d'eau et d'ions.

Il est habituel de classer les familles d'argiles selon leurs potentiels de retrait-gonflement (Smith & Austin 1989; Meimaroglou & Mouzakis 2024). Dans l'ordre croissant de « retrait-gonflement élémentaire », on peut classer :

- La famille des **kaolinites** qui est considérée comme la moins gonflante, dû aux liaisons hydrogène et de Van der Waals qui relient fortement les feuillets.

- la famille des **Chlorites** est également peu gonflante. En effet, l'espace entre deux feuillets 2:1 est comblé par une couche d'octaèdres qui comme pour les kaolinites se lie fermement aux feuillets et empêche le gonflement.

- les **Illites** sont également des minéraux 2:1 donc la composition interfoliaire réduit le gonflement, par la présence d'ions potassium qui relient fermement les feuillets. Leur gonflement est donc « intermédiaire ».

- les **vermiculites** présentent également une composition ionique réduisant l'expansion de l'espace interfoliaire, qui induisent un comportement intermédiaire.

- enfin, les **smectites** sont considérées comme les plus gonflantes due à l'absorption d'eau qu'engendrent les ions dans son espace interfoliaire. La taille de l'espace interfoliaire peut ainsi doubler en présence d'eau (Tableau 2).

Enfin, les mélanges de différentes familles présentent des propriétés intermédiaires, que l'on peut supposer proportionnelles à leur composition (mélanges illites/smectites par exemples) (Smith & Austin 1989).

Tableau 2 : Propriétés des colloïdes du sol (d'après Ray R. Weil 2016, Jlassi et al. 2017).

Colloïde	**Type**	**Taille (µm)**	**Surface externe ($m^2.g^{-1}$)**	**Surface interne ($m^2.g^{-1}$)**	**Espace interfoliaire (Å)**	**CEC ($cmol^+.kg^{-1}$)**
Kaolinite	1:1	0.1 - 5.0	5 - 30	ø	0.72	1-15
Chlorite	2:1	0.1 - 2.0	70 - 100	ø	1.41	10 - 40
Illite (Mica)	2:1	0.2 - 2.0	70 - 175	ø	1.0	10 - 40
Vermiculite	2:1	0.1 - 0.5	70 - 120	600 - 700	1.0 - 1.5	100 - 200
Smectite	2:1	0.01 - 1.0	80 - 150	550 - 650	1.0 - 2.0	80 - 150
Allophane, Imogolite	Silicate non cristallin	< 0.1	80 - 200	ø	0.48	0 - 5
Gibbsite	Oxyde Al	< 0.1	100 - 300	ø	0.42	0 - 5
Goethite	Oxyde Fe	< 0.1	100 - 1000	ø	ø	0 - 150
Humus	Organique	0.1 - 1.0	20 - 800	ø	ø	100 - 500

3.2.2.1.2.3 Mesure et estimation

Les propriétés de gonflement des argiles peuvent être mesurées par la variation de la taille de leurs espaces interfoliaires selon leur hydratation. Le gonflement maximal peut être obtenu par traitement à l'éthylène glycol. C'est une des méthodes utilisée pour déterminer la composition minéralogique des argiles du sol (Fabbri et al. 2022).

L’agrégation des argiles et la taille des feuillets influence les charges électroniques accessibles et les propriétés de gonflement des agrégats. L’organisation des argiles dans l’espace peut s’observer en microscopie à balayage électronique (MEB).

Ces méthodes ne sont pas « simples » et ne permettent pas une caractérisation systématique des échantillons de sol.

Les charges électroniques accessibles du sol peuvent être mesurées par diverses méthodes d’évaluation de la Capacité d’Echange Cationique (CEC), dont certains sont des mesures de routine dans l’analyse des sols et peuvent être réalisées simplement (par exemple l’absorption de bleu de méthylène ou VBS).

Une autre mesure moins commune est l’évaluation de la surface spécifique d’un échantillon de sol. Le sol est mis à réagir aveca formation d’une monocouche de la substance adsorbée, connaissant les dimensions des molécules et leurs possibilités d’arrangements, en déterminant alors la quantité fixée, on peut évaluer la surface qui leur sert de support. Les corps adsorbables qui permettent d’obtenir des résultats satisfaisants sont : les gaz inertes (N2), hydrocarbures aliphatiques ou des polyalcools simples comme le glycol ou glycérol.).

Les mesures de Surface Spécifique et de Capacités d’Echange Cationiques sont bien corrélées entre elles et avec les charges accessibles et le potentiel de gonflement des argiles. Cependant ces mesures ne donnent pas le détail de l’attribution des charges à chacun des composants du sol mais seulement une mesure d’ensemble. Ainsi, si en présence d’une seule espèce réactive on peut estimer sa teneur dans l’échantillon, dès lors que plusieurs argiles ou autres composés réactifs sont présents – cas de la plupart des sols - on ne peut connaître leur proportions relatives (voir CEC, SS XXX).

La Figure 31 indique la dépendance des propriétés des argiles à leur composition minéralogique, elle-même principalement gouvernée par les matériaux parentaux du sol. Cependant, le lien de causalité est suffisamment lointain pour qu’il soit difficile de prédire la teneur, la diversité en minéraux argileux du sol et leur organisation, et ainsi leurs propriétés.

3.2.2.2 Matières Organiques

3.2.2.2.1 Formation

Les matières organiques (MOs) sont présentes en quantité variable dans presque tous les sols (Weil & Brady 2016). Elle sont parfois qualifiée d’ « humus », mais les pédologues préfèrent réserver ce terme aux horizons humifères, horizons superficiels du sol quasi-exclusivement composés de MOs à différents stades de décomposition (FAO 2020). Les MOs présentes à l’état naturel sont constituées d’une grande variété de résidus d’être vivants : des biomolécules issues de microorganismes jusqu’aux fragments de tissus végétaux (Weil & Brady 2016). Nous utiliserons donc ici l’expression *matières organiques,* au pluriel, afin d’insister sur leur diversité. En effet, « la matière organique », au même titre que « l’humus », laisse penser qu’il s’agit d’une matière homogène alors que la diversité des propriétés des matières organiques est aussi diverse que leur composition.

La teneur en matières organiques des sols dépend de leur vitesse de *minéralisation*, c'est à dire la consommation et dégradation (oxydation) de l'ensemble des molécules carbonées qui les composent jusqu'au retour dans l'atmosphère sous forme de CO_2. Selon les conditions de dégradation et le type de matières organiques, cette minéralisation peut prendre quelques jours à plusieurs années, voir jusqu'à des centaines d'années pour les molécules adsorbées à la surface des minéraux argileux. La dynamique biologique gouverne la production et la dégradation des matières organiques, donc son stock. Elle-même étant dépendante des autres facteurs pédogénétiques, la teneur et la qualité des matières organiques sont des variables multifactorielles. On notera cependant parmi les variables d'importance l'influence du pH dont l'augmentation favorise la minéralisation des matières organiques, la présence d'argiles qui fixe durablement les molécules organiques dans les *complexes argilo-humiques* et surtout, la profondeur de l'horizon car à l'état naturel la teneur en matières organiques augmente de manière exponentielle à l'approche de la surface et devient très faible au-delà de quelques dizaines de centimètres.

Le cas échéant, les horizons de surface contenant quasi-exclusivement des matières organiques sont appelés horizons O et se distinguent par le stade de dégradation des éléments organiques. En dessous, un horizon organo-minéral est souvent présent. Il contient des matières organiques relativement dégradées et la plupart des racines des végétaux. Souvent, l'horizon A correspond à un horizon labouré ou anciennement labouré, on parle alors d'horizon L ou AL. Il n'y a alors pas d'horizon O et la teneur en matières organiques y est relativement homogène puisque fréquemment mélangée (AFES (Association Française pour l'Etude des Sols) 2008).

3.2.2.2.2 Propriétés

La composition des matières organiques du sol est infiniment diversifiée. Pour simplifier la compréhension, on les distinguera ici par leurs propriétés d'intérêt relativement à la construction en terre crue : retrait-gonflement et charges électroniques, taille et forme des éléments.

Les matières organiques végétales et animales peu dégradées ont des propriétés plus proches des granulats minéraux que des colloïdes. Elles peuvent être relativement élancées, par exemple des fragments de racines ou de tiges végétales cellulosiques ou siliceuses, des morceaux de branches ou d'autres éléments ligneux. L'avancement de leur dégradation peut réduire l'élancement par leur fragmentation. Cependant, à l'inverse des macrogranulats minéraux, ces éléments organiques sont souvent creux ou poreux et peuvent contenir de l'eau et/ou de l'air, et montrent un certain retrait-gonflement selon leur porosité.

Les composés plus dégradés, ou synthétisés par des microorganismes du sol (microfaune, bactéries, champignons) peuvent être divisés en deux catégories :

- des composés en chaînes comme les polyosides : celluloses, chitines, polysaccharides… Issues de la solubilisation de composés végétaux ou synthétisés par l'activité microbienne, ces molécules carbonées peuvent être extrêmement longues et ramifiées et leur affinité à l'eau et charges électroniques sont fortes. On peut assimiler leur comportement à celui de l'amidon ou au gluten : ces molécules gonflent en présence d'eau et peuvent former des gels, certaines pouvant retenir jusqu'à 100 fois leur poids en

eau. Leurs charges variables issues de groupes hydroxyles induisent de nombreuses liaisons entre elles et aux autres éléments du sol.

- un *pool* de matières organiques amorphes, mélangées et dont l'origine organique n'est pas évidente. Ces matières organiques sont riches en cycles aromatiques issus de composés ligneux et sont peu dégradables. Leur affinité à l'eau et leur charges électronique est conséquente car elles déploient de nombreux groupes hydroxyle (-OH) qui échangent des charges électroniques positives ou négatives selon le pH de l'eau. Leur capacité de liaison entre les éléments du sol est moins forte que les polyosides mais elles gonflent également en présence d'eau.

Dans l'ensemble, les matières organiques du sol sont sujettes au gonflement (Wolfskill et al. 1970; Weil & Brady 2016; Meimaroglou & Mouzakis 2019; Fabbri et al. 2022) par absorption d'eau dans la porosité des macroéléments ou par hydratation des molécules organiques en solution.

Les colloïdes organiques sont fortement chargés électriquement, généralement plus par unité de masse que les argiles. De manière générale, la charge résultante est négative et cette négativité augmente avec le pH, comme pour les argiles (Weil & Brady 2016) (Figure 33).

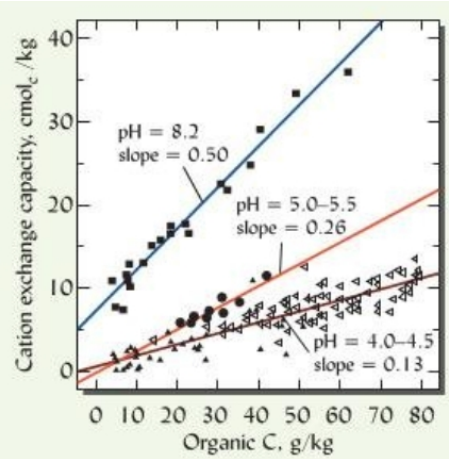


Figure 33 : influence du pH sur la CEC des matières organiques du sol (Weil & Brady 2016). La teneur en MOs est mesurée par la teneur en carbone organique. Lorsque le pH augmente, les MOs développent des charges variables négatives ce qui peut faire quadrupler la Capacité d'Echange Cationique du sol.

3.2.2.2.3 Mesure et estimations

La teneur en matières organiques peut être mesurée par différentes méthodes faisant intervenir l'oxydation du carbone organique. Pour la méthode de calcination, un échantillon de sol est séché, pesé, chauffé à environ 500°C et re-pesé. La différence de masse indique la quantité de carbone oxydé par combustion et libéré en CO_2. Le suivi de la variation de la masse selon la température peut également être réalisé via des appareils combinant combustion et mesure de masse. Une autre méthode moins commune consiste en la digestion chimique des matières organiques (Fabbri et al. 2022).

Ces méthodes mesurent la teneur en carbone organique, or les matières organiques ne sont pas composées uniquement de carbone. La masse des matières organiques est environ 1,7 à 2 fois plus importante que celle du carbone qu'elles contiennent (FAO 2020). Malgré cette variabilité, c'est le coefficient de Van Bemmelen (1.724) qui est le plus souvent utilisé pour réaliser la conversion (Baize 2016). La teneur en MOs s'obtient alors par l'équation :

MOs = CO x 1.724

La mesure de la Capacité d'Echange Cationique (CEC) permet l'évaluation des charges électroniques des matières organiques du sol. En effet, celles si sont fortement chargées et leurs CEC peuvent être plusieurs dizaines de fois supérieures à celles des minéraux argileux. Cependant, comme nous l'avons remarqué pour les argiles, cette méthode ne différencie pas les charges des différents composants du sol. De plus, la CEC dépend fortement du types de MOs ce qui complexifie une quantification. Cependant, dans

certaines conditions la CEC peut s'avérer intéressante pour mesurer certaines propriétés liées aux charges électroniques des MOs (voir XXX CEC).

Enfin, la compréhension des phénomènes pédogénétiques nous apporte ici aussi des informations sur la distribution et la composition des MOs. Dans l'essentiel des sols naturels, la plupart des MOs sont présentes dans les 20 à 30 premiers centimètres du sol, et au-delà, il n'y a généralement pas plus de quelques grammes par kilogramme (supposons 1% en masse). La position de l'horizon considéré dans le profil est donc une indication qui peut suffire pour s'assurer d'une faible teneur en MOs. D'autre part, le couvert végétal et la gestion agronomique le cas échéant participe à la constitution des MOs du sol à échelle temporelle relativement courte. La compréhension de ces contextes pédogénétiques permet d'expliquer si ce n'est d'estimer les teneurs en MOs des horizons étudiés.

4 Propriétés statiques : composition et organisation d'un mélange composé de terre crue

Connaître les quantités relatives des composants, notamment des différentes phases solides, liquides et gazeuse, ainsi que leur organisation dans l'espace est indispensable pour étudier les propriétés d'un *mélange composé de terre crue*. Ce type de milieu granulaire sera étudié dans cette partie et les suivantes. Son organisation varie selon les remaniements mécaniques et de composition qui lui sont appliqués : homogénéisation par mélange, ajout d'eau, séchage, ajouts de composants solides, etc. Dans cette partie, nous considérons les propriétés *statiques* du sol, c'est à dire essentiellement des propriétés descriptives de la distribution des composants dans l'espace dans un mélange à un instant donné. Les remaniements menant à ces états statiques et les dynamiques qu'ils entraînent seront décrits dans les parties suivantes.

4.1 Quantités relatives des phases du sol

L'analyse des composants du sol montre une diversité de compositions et de propriétés de chacune des familles d'éléments solides et fluides, pris individuellement ou dans un assemblage de composés purs. Afin de passer à l'échelle des propriétés de la terre naturelle, mélangeant ces familles d'éléments, il est fréquent d'analyser leurs proportions relatives dans le sol. On peut les exprimer en masses relatives, comme c'est généralement le cas pour les analyses granulométriques (voir xxx taille solides), 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.

4.1.1 Volumes relatifs des fluides et des solides : proposition d'un diagramme ternaire volumique des phases

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 leurs propriétés. Nous proposons ici une représentation de ces proportions dans un diagramme ternaire (Figure 34).

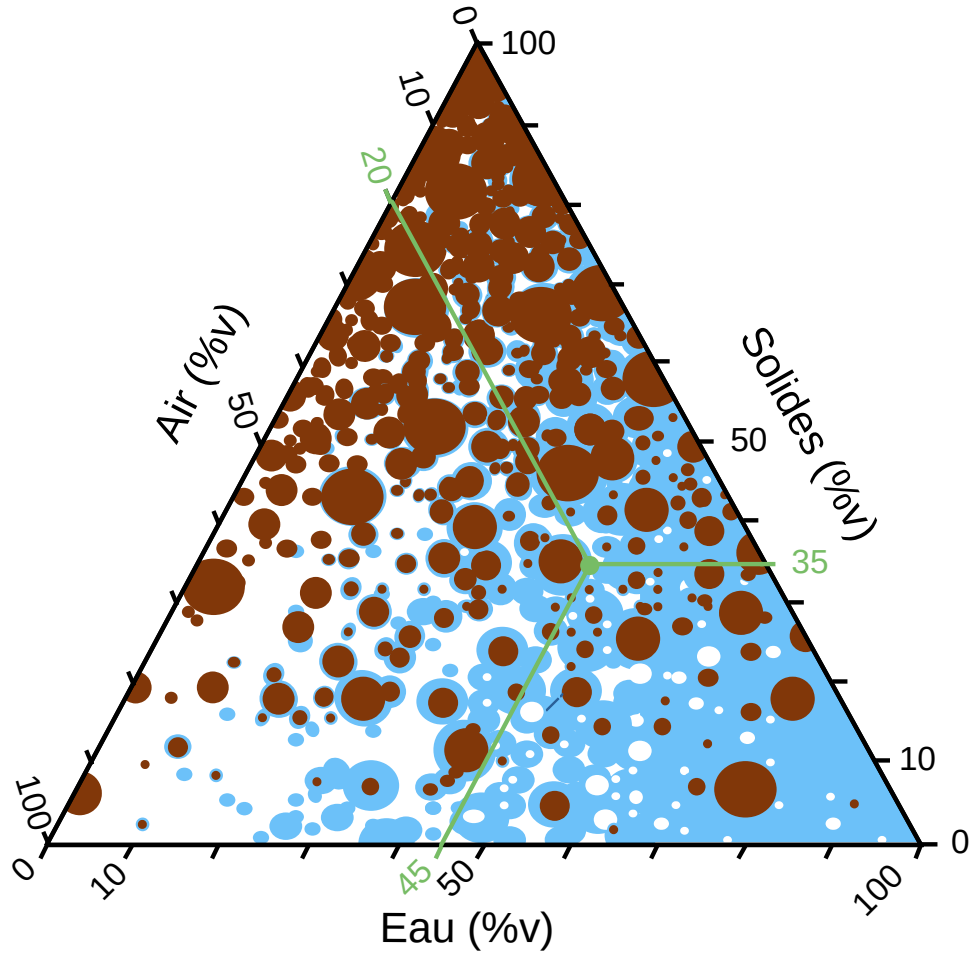


Figure 34 : représentation dessinée des la teneur volumiques solides, eau et air selon leurs proportions relatives dans le diagramme ternaire volumique. Un exemple de lecture du diagramme est donnée et montre le point où la teneur en solides est de 35 %, la teneur en eau est de 45 %, et la teneur en air de 20 %. On a bien 35+45+20 = 100 %.

Dans ce diagramme, les volumes relatifs d'air, d'eau et de solides est exprimée en pourcentage et sa somme est égale à 100%. C'est à dire que si l'une des teneurs augmente, l'une ou les deux autres teneurs décroît d'autant, comme pour les diagrammes de texture granulométrique du sol (voir xxx granulométrie). Il aurait été plus « rigoureux » de nommer les trois pôles par nom de phases : solides, liquides et gaz. Cependant, dans le cas de l'application aux mélanges de terre cette classification nous est apparue plus parlante et facilitera la lecture du diagramme.

Cette représentation sera utilisée tout au long de ce chapitre et des commentaires seront apportés pour sa pertinence de représentation des propriétés de la terre.

4.2 Teneur en solides : compacité

4.2.1 Compacité, porosité totale et densité

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, la compacité est donc 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 densité supérieure.

La *densité propre* (ou *poids spécifique*) est la *masse volumique des solides* du mélange de sol. C'est la densité du mélange lorsque la *porosité totale* est nulle. 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 * 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, la densité peut varier à compacité égale si les solides n'ont aps la même densité propre. Or, c'est bien la compacité qui gouverne les propriétés mécaniques de la matière, ce qui impose son évaluation dans les études de capillarité granulaires, par exemple pour (Scheel et al. 2008).

La densité (ou masse volumique) en revanche indique la masse d'un certaine volume d'éléments, ce qui peut servir dans des évaluations de contraintes de gravité sur des éléments de terre crue (voir XXX prop usage contrainte compression).

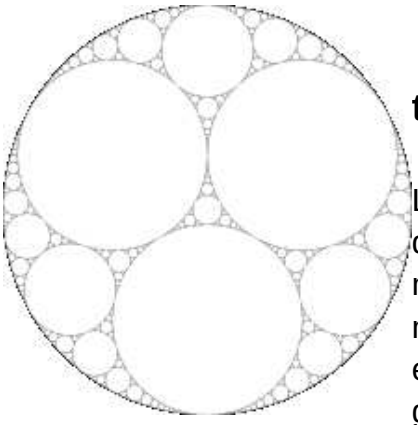


Figure 35: représentation en deux dimensions d'un empilement granulaire dit « appolonien » où l'ensemble des vides entre sphères est rempli par des sphères plus petites.

4.2.2 Empilement granulaire et compacité théorique maximale

L'empilement granulaire est une propriété théorique des sols qui décrit la possibilité des granulats du sol de s'emboîter de manière compacte. L'idée est que lorsque des grains sont mélangés, il existerait une configuration idéale où les espaces laissés entre les gros grains sont comblés par des grains plus petits, les espaces entre ceux-ci sont eux mêmes comblés par de plus petits, etc.

Dans un sol naturel, les grains sont de formes et de tailles variables. Leur *compacité théorique maximale* (aussi appelé « arrangement compact ») qualifie un état d'arrangement des grains maximisant la compacité du mélange sans changement de la taille des granulats (Scheel et al. 2008). Ainsi, sans changement de la composition de taille et de formes des éléments solides au cours d'un effort de compaction, par exemple par broyage ou déformation des éléments présents, cette compacité maximale ne peut être dépassée.

Un mélange granulaire donc la *compacité théorique maximale* serait parfait, c'est à dire que la proportion volumique des solides est de 100 %, est dit « appolonien » (Figure 35). L'empilement théorique parfait n'est que rarement rencontré dans les sols naturels et surtout, atteindre l'arrangement compact maximal est impossible en pratique (voir XXX compactabilité).

De manière générale, les mélanges dont la composition granulométrique est « étalée » ou « bien distribuée », c'est à dire présentant des éléments solides de taille variable en proportions semblables sont supposés présenter des compacités théoriques maximales plus importantes que les sols « triés » à la courbe de distribution granulométrique cumulée (sur le nomogramme voir XXX [ou mettre un exemple?]) « étroite » (Gomes et al. 2014; Dialmy et al. 2023).

Il est généralement admis que dans les terres naturelles, c'est la fraction grossière qui gouverne l'empilement granulaire, car l'empilement de la fraction fine est plus gouvernée par des propriétés de cohésion électrostatique ou capillaire que par un empilement lié à leur taille. L'expression de « squelette granulaire » revient souvent dans les descriptions des propriétés de la terre. Celui-ci serait composé des éléments de taille environ supérieure ou égale au passant granulométrique des « limons » (P50µm) et représenterait une structure « conférant la résistance du matériau » (PHUNG 2018).

4.2.3 Mesures et estimations

4.2.3.1 Mesures

La mesure de la compacité est celle de la fraction volumique solide. Elle peut être réalisée par porosimétrie, ou par mesures de la *densité propre* des solides combinée à la mesure du volume de l'échantillon, respectivement par les méthodes du picnomètre à eau et de l'immersion ou le scan 3D d'un échantillon non perturbé (Delcroix 1972).

4.2.3.2 Estimations

4.2.3.2.1 Densité et densité sèche

La mesure de la densité sèche d'un échantillon du sol consiste en l'évaluation de sa masse et son volume après séchage, respectivement par pesée et par immersion ou scan 3D.

La mesure de densité propre au picnomètre à eau étant plus chronophage que celle de la densité, elle est moins couramment réalisée. La densité étant une bonne estimation de la compacité lorsque la densité propre des solides d'un mélange de terre ne varie pas ou peu, c'est elle qui est généralement utilisée pour évaluer la variation de l'état de compacité

de mélanges ayant subi différents procédés de transformation mécaniques (Kouakou & Morel 2009).

4.2.3.2.2 A partir de la granulométrie : Coefficients d'uniformité, de courbure et distributions de Fuller

Plusieurs modèles plus ou moins simples proposent d'évaluer l'empilement granulaire potentiel à partir des classes granulométriques, ce qui représente une estimation de la compacité atteignable d'un mélange. De manière générale, le nomogramme des passants granulométriques cumulés est déjà une approche qualitative : un nomogramme dont la distribution granulaire apparaît étalée et progressive suppose l'existence de tailles de grains variées et donc un empilement potentiel plus dense qu'une distribution granulaire peu étalée (voir par exemple la fig. 7 chapitre 1 : essais cuccurulo et al xxx) (Gomes et al. 2014; Cuccurullo et al. 2021).

Pour quantifier cet « aspect » qualitatif, certain.es auteur.ices proposent des calculs simples, par exemple :

1) les « coefficient d'uniformité » (Cu) et « coefficient de courbure » (Cc) : Soro (2017) emploie ces deux indicateurs provenant de la recherche sur la compacité des bétons de ciment pour décrire la distribution granulométrique des mélanges de terre. Trois classes de passants granulométriques sont définies, cette fois-ci non pas à partir des tailles granulométriques limites (p. ex. P50µm), mais à partir du pourcentage massique cumulé des passants granulométriques ; c'est à dire que l'on catégorise par l'ordonnée du nomogramme (le pourcentage de passant) plutôt que l'abscisse, par interpolation entre les couples taille/pourcentage connus. Iel nomme D10, D30, D60 les diamètres de tamis correspondant à respectivement 10, 30 et 60 % du passant cumulé identifié sur la courbe du nomogramme.

[xxx placer sur une courbe exemple? Par exemple sur les courbes cuccurulo et al. ? On pourra le faire pour des terres au chapitre carto]

Le coefficient d'uniformité (Cu) est alors décrit par Soro comme « la répartition en taille des éléments qui composent un matériau de type sol ». Il est aussi appelé « facteur de Hazen ». Il se calcule par la formule :
$Cu = D60 / D10$
Le coefficient de courbure (Cc) « permet de caractériser la forme de la courbe ».
Il se calcule par la formule :
$Cc = D30^2 / D60*D10$

On peut suggérer que le Cu caractérise l'« étalement » de la courbe en donnant la pente des 50 % de sa composition qui seraient les plus importants pour l'empilement. Cc est supérieur à 1 lorsque le D30 est au dessus de la droite allant du D10 au D60, et inférieur à 1 si c'est l'inverse : le Cc donnerait la « régularité » de la courbe.
Ces deux paramètres paraissent intéressants pour comparer la régularité de distribution granulométriques et pourraient être corrélés avec des propriétés de compacité ; mais à notre connaissance n'ont pas été explorés d'avantages qu'avec les deux échantillons de Soro (2017).

- la distribution dite « de Fuller » : il s'agit d'une distribution granulométrique estimant l'empilement granulaire qui compléterait idéalement les vides entre les plus gros granulats d'un mélange. Une courbe granulométrique est alors proposée et ne dépend que de la

taille des plus gros granulats. Ce modèle, utilisé dans plusieurs applications granulaires dans différents domaines, suppose que l'empilement est effectivement réalisé et que les granulats sont des sphères, mais ces deux hypothèses sont fausses dans les terres naturelles.

$$Pi = 100 \times \left(\frac{Di}{Dmax}\right)^{w}$$

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)

Utiliser les distributions de Fuller afin d'en faire un indicateur de comparaison des distributions granulométrique des terres suppose le calcul de leur « proximité » cette courbe. Dans le chapitre XXX (analyse données pédologiques) nous proposons un calcul de proximité basé sur la méthode des moindres carrés.

D'après (Koutous & Hilali 2019), les distributions de Fuller sont à l'origine de plusieurs fuseaux granulométriques dont ceux proposés par Houben et Guillaud (Houben & Guillaud 1994, 2006) et décrits en chapitre 1 XXX.

4.2.3.2.3 A partir de la granulométrie et la compacité propre des classes granulométrique

Dialmy et al. (2023) présentent différents modèles de prédiction de la compacité basés sur des mesures granulométriques. Cependant, ces modèles étant initialement orientés vers la formulation des bétons de ciment, les auteur.ices indiquent que leur application aux mélanges de terre n'est pas forcément adaptée, dû aux efforts de compaction plus importants et aux conditions de coffrage (effets de bords notamment).

Les auteur.ices proposent alors un modèle de prédiction de la compacité d'une terre par la connaissance de la compacité propre de différentes classes granulométriques sous contraintes de compaction connues.

4.3 Organisation des solides : homogénéité

L'homogénéité de la distribution des composants du sol peut être définie par la proximité de l'organisation des constituants *solides* à une organisation « aléatoire ». Dans un mélange parfaitement homogène, la porosité serait continue et il n'y aurait pas d'agrégats. Par exemple, il n'y aurait pas d'agrégation de feuillets argileux (voir XXX argiles), ceux-ci étant dispersés et désorganisés parmi les autres composants solides.

Cependant, dans les mélanges de terre crue, la distribution des éléments solides s'approche rarement d'un état homogène. En effet, des phénomènes d'agrégation ou d'orientation des éléments organisent spontanément la matière au cours des contraintes qui lui sont imposées.

4.3.1 Une question d’échelle

De manière générale, l’homogénéité pour une propriété d’un mélange de terre dépend de l’échelle de l’observation. On peut considérer que le mélange est homogène lorsque le déplacement de l’échantillonnage a un effet négligeable sur les propriétés. Par exemple, de gros éléments grossiers nécessitent l’observation de la granulométrie à grande échelle : une échelle d’échantillonnage de la taille des éléments risquerait de donner des variations de résultats considérables selon la sélection ou non d’un des gros éléments.

On appellera *matrice* la matière observée à une échelle d’observation où les propriétés étudiées semblent homogènes. Dans une matrice, on ne distingue pas de zones de taille significative où le comportement est différent du reste. L’échelle du comportement matriciel est dépendante de la propriété observée et de l’état et la composition du mélange étudié.

Dans la suite de ce travail, on ne considérera pas ici les discontinuités entre éléments mis en œuvre séparément (éléments préfabriqués maçonnés, pré-séchés ou non, jonctions entre levées, etc.).

4.3.2 Homogénéité de répartition : Agrégation et porosité

4.3.2.1 Description

L’homogénéité de répartition des phases du sol peut être approchée par sa variation de compacité dans l’espace. L’agrégation désigne généralement la concentration des éléments solides, tandis que la porosité désigne le reste du volume de terre, c’est à dire l’ensemble « eau + air ».

Une structure agrégée des solides indique que les éléments solides sont organisés en agrégats qui peuvent être de formes variées, mais souvent peu élancés dans les mélanges de terre crue.

L'agrégation est fortement dépendante de la composition des éléments solides et notamment la présence d'éléments cohésifs. Par exemple, les feuillets argileux ne sont généralement pas organisés en structure dite matricielle, c'est à dire avec un arrangement continu et plus ou moins aléatoire entre les feuilles argileux. Ils sont plus généralement spontanément agrégés en macro ou microagrégats (Collins and McGown 1974/Barden 1972/Barden and Sides 1970 dans (Barnes 2013b)). L'agrégation se fait par arrangement

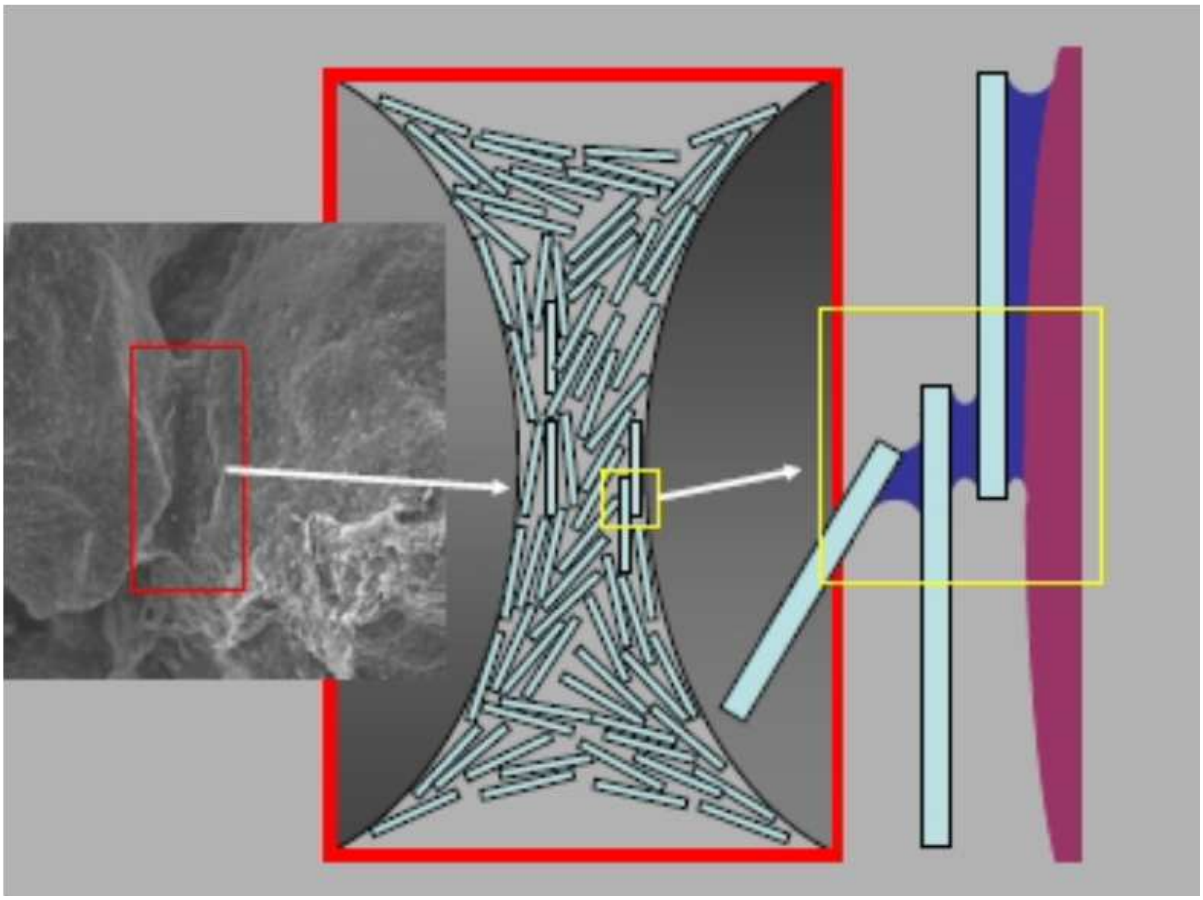


Figure 36: Observation microscopique d'un « pontage » argileux entre deux macro granulats, schéma d'interprétation de la distribution de feuillets argileux dans l'interface et détail des interactions capillaires interfoliaires et à l'interface avec les macroéléments (Gelard 2017)

parallèle de feuillets argileux, ou par agrégation en « peau d'oignon » autour d'autres éléments solides du sol (Figure 36, Figure 37). C'est ainsi que les mélanges de terres argileuses ou comprenant des matières organiques cohésives s'organisent spontanément en agrégats.

Si la distribution des éléments solides dans la matrice était aléatoire, la distribution de la porosité serait proportionnelle à la taille des particules : de plus gros granulats favoriseraient une porosité large. Cependant dans les sols naturels, l'agrégation entraîne une distribution des pores plus complexe (Nimmo & Park 2004). Ainsi, la taille de la

porosité et sa continuité dépend fortement de la taille des agrégats : une structure de macro agrégats est plutôt favorable au développement d'une macroporosité continue, dite inter-agrégats. La typologie de la porosité peut être décrite selon sa relation à la structure des solides (Barnes 2013b) :

- au sein des micro-structures d'éléments solides du sol (p. ex. interfoliaire pour les minéraux argileux)

- au sein des macro-structures (intra-agrégats)

- entre les macro-structures (inter-agrégats)

- porosité traversante de l'ensemble de la matrice

L'intensité et la répartition de la porosité dans un mélange de terre dépend de la compacité globale, de l'empilement granulaire, de la forme des éléments solides, et de la cimentation interparticulaire (Nimmo & Park 2004).

4.3.2.2 Impact de la teneur en eau

Par son impact sur la cohésion capillaire (voir xxx cohésion capillaire), la teneur en eau gouverne l'agrégation spontanée des solides et donc la porosité. Dans une terre mélangée, lorsque l'on s'éloigne de la saturation, l'agrégation est favorisée par capillarité, et ce sont les macro-agrégats qui dominent, ce qui produit une macroporosité. A proximité de la saturation, les macroagrégats sont rompus car moins cohésifs et la microstructure devient dominante, car contrairement aux macro-éléments solides, les colloïdes montrent des propriétés de cohésion indépendantes de la capillarité. C'est d'ailleurs la séparation du sol en agrégats qui définit la teneur en eau inférieure de *l'état plastique* (voir XXX etat plastique) (Barnes 2013b).

Par ailleurs, la seule variation de la saturation en eau d'un mélange de terre crue induit des phénomènes d'agrégation spontanée : les éléments solides sont amenés à se rapprocher par cohésion capillaire durant le séchage (voir xxx cohésion capillaire). Cette agrégation n'est pas complètement réversible et l'enchaînement de phases hydratées et déshydratées tend à favoriser l'apparition d'agrégats ainsi que son corollaire, une continuité de la porosité. Ce phénomène est connu pour favoriser la perméabilité des sols naturels, conditions de qualité agronomique. Cependant, il est moins conséquent dans les mélanges de terre crue car l'agrégation-désagrégation liée aux contraintes mécaniques impacte plus fortement l'agrégation que la variation de teneur en eau directement. En revanche, le retrait au séchage a bien un impact sur l'homogénéité de la porosité des matériaux secs. Lorsque le retrait matriciel n'est pas *libre*, des fissures apparaissent (voir retrait-gonflement XXX).

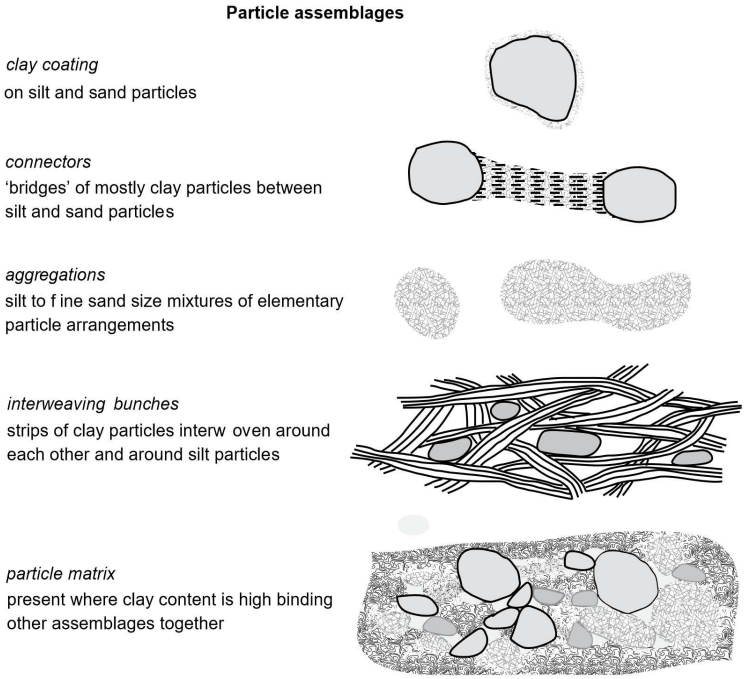


Figure 37: Typologie d'assemblage des éléments argileux rencontrés dans les mélanges de terre crue (d'après Barnes, 2010, dans (Barnes 2013b)

4.3.3 Hétérogénéité orientée: isotropie

Lorsque le mélange étudié est hétérogène, cette hétérogénéité peut être orientée plus ou moins aléatoirement dans l'espace. Cette hétérogénéité peut être liée à plusieurs propriétés de la terre et de son organisation, par exemple d'agrégation, de taille ou de forme de granulats, ou des propriétés de comportement, par exemple thermiques ou mécaniques. Dans le cas d'une orientation aléatoire de l'hétérogénéité, on parle d'isotropie. L'anisotropie peut être induit par l'application de contraintes dont l'orientation est constante, par exemple au cours de la compaction d'un mélange de terre.

Koutous et Hilali (2019) relèvent l'impact de la forme des granulats minéraux sur l'anisotropie des propriétés mécaniques des mélanges de terre crue. En effet, les granulats de formes élancée (p. ex. des fragments de schistes) s'orientent spontanément perpendiculairement à la contrainte de compaction dans les éléments compactés. La résistance est alors moins conséquente lorsque la force est appliquée parallèlement aux éléments élancés. Vinceslas (2019) indique la présence d'une anisotropie dans les propriétés thermiques des éléments de terre allégée. De la même manière que les granulats minéraux élancés, les granulats végétaux (chanvre, paille) s'orientent perpendiculairement à la contrainte de compaction, ce qui induit une conduction thermique anisotrope.

4.4 Teneur en eau de la porosité : 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. Pour évaluer le remplissage de la porosité du sol, on évalue la saturation 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, la *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 38). 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

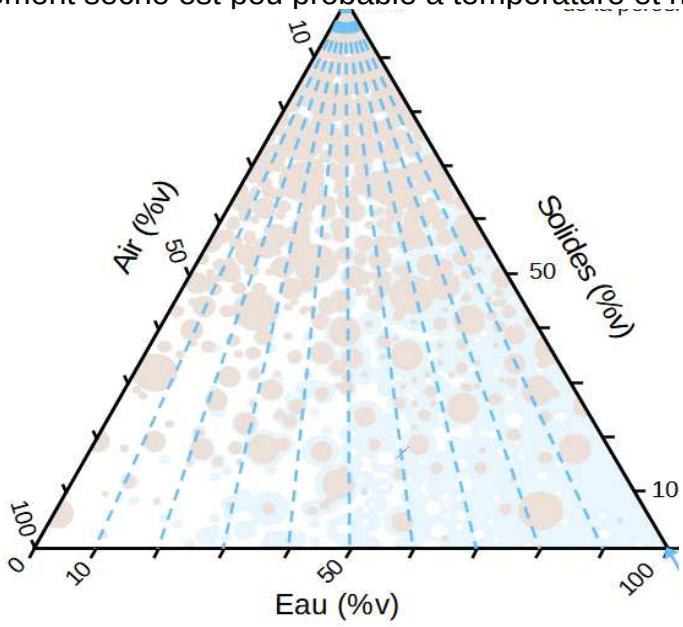


Figure 38 : évolution de la saturation sur le diagramme volumique. Lorsque air = 0 %, le sol est saturé. Lorsque eau = 0 %, le sol est sec.

notamment lorsqu'il y a présence d'éléments colloïdaux qui adsorbent fortement les molécules d'eau (voir cohésion ? Xxx).

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 la fraction saturée évolue (resp. se rapproche de la saturation).

Si la densité propre des solides est modifiée, 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 et on peut être amenés à comparer différentes terres, on a donc potentiellement des variations de compacité et de densité propre. La teneur en eau massique doit alors être employée avec précautions.

4.4.1.1 Mesure

La teneur en eau massique ($W_{massique}$) d'un échantillon de sol peut être mesurée selon un protocole simple de pesée différentielle au séchage:
1) pesée de l'échantillon humide (M_{humide}) ,
2) séchage en étuve
3) pesée de l'échantillon sec (M_{sec}).
Elle se calcule ainsi :

$$W_{massique} = \frac{M_{humide} - M_{sec}}{M_{sec}}$$

La teneur en eau volumique peut être mesurée selon deux protocoles.
Le premier consiste en la mesure du volume total d'un échantillon non perturbé et de sa teneur en eau :
1) Obtenir le volume total de l'échantillon non perturbé (V_{tot}). Cela peut se faire par scan 3D de l'échantillon. La mesure par immersion est impossible dans cette méthode, car elle ne peut être réalisée sur un échantillon humide et qu'un échantillon séché aura un volume faussé par le retrait.
2) Obtenir la teneur en eau massique ($W_{massique}$) par pesée différentielle au séchage.
La densité de l'eau étant égale à 1, on a alors la relation :

$$W_{volumique} = \frac{W_{massique}}{V_{tot}}$$

[XXX je crois que je l'ai inventée celle là, ça se fait? Sinon y a pas une méthode via le picnomètre à eau ?]

La seconde consiste en la mesure du volume d'air de l'échantillon ainsi que de sa porosité totale et ne nécessite pas de mesure de masse.
1) On mesure d'abord le volume total de deux échantillons (V_{tot-1} et V_{tot-2}).,
2) L'un est séché, puis immergé sans protection et mélangé. Le volume d'eau déplacé après mélange correspond au volume de solides ($V_{solides-1}$).
3) L'autre est immergé sans séchage et mélangé. Le volume d'eau déplacé après mélange correspond à la somme du volume de solides et d'eau ($V_{solides-2}+V_{eau-2}$).
On obtient la teneur en solides volumiques :

$$S_{volumique} = \frac{V_{solides-1}}{V_{tot-1}}$$

Puis la teneur en eau volumique :

$$W_{volumique} = \frac{V_{solides-2} + V_{eau-2}}{V_{tot-2}} - S_{volumique}$$

La teneur en eau massique est plus aisée à mesurer et donc fréquemment employée. Notamment, elle permet de suivre facilement l'entrée ou la sortie globale de l'eau d'un mélange de terre (séchage, ajout d'eau, etc.).
Cependant, la saturation de la porosité en eau est mieux représentée par la fraction saturée. Sa mesure n'est pas beaucoup plus complexe que celle de la teneur en eau. Par ailleurs, la mesure de la masse volumique sèche de l'échantillon est fréquente et tend à le devenir avec l'utilisation des scanners 3D. Une mesure supplémentaire de masse volumique humide suffirait à permettre le calcul de la teneur en eau volumique et son utilisation dans les études de comportement des matériaux composés de terre crue.

4.5 Organisation des fluides

L'organisation de la porosité est l'inverse de celle des éléments solides. Au sein de la porosité, l'air et l'eau sont répartis dans l'espace. Une répartition parfaitement aléatoire des molécules d'eau relativement à la phase gazeuse n'est pas possible, car les phénomènes de tension superficielle et de capillarité séparent quasi-instantanément les phases gazeuses et liquides d'une part, et d'autre part l'eau liquide tend à couvrir les phases solides (voir capillarité XXX). Ainsi, à l'échelle d'une *matrice* granulaire, en négligeant l'impact de la gravité (voir ressuyage xxx), l'homogénéisation de la teneur en eau est relativement spontanée à petite échelle. Cependant, une faible perméabilité des agrégats du sol, par exemple dans les agrégats argileux ou indurés par cimentation (voir cimentation XXX) peut induire une homogénéisation relativement lente de la teneur en eau même après un effort de mélange. La saturation de la porosité étant centrale dans la plupart des propriétés des mélanges de terre, l'hétérogénéité de la saturation induit l'hétérogénéité de leurs propriétés.

5 Propriétés dynamiques : composition des forces au sein des mélanges de terre crue

La composition et l'organisation des éléments du sol est à l'origine de propriétés de *cohésion* et de *friction* entre les éléments solides, qui impactent les propriétés macroscopiques des mélanges de terre crue. Ces deux familles de propriétés sont dites *dynamiques* car elles impactent le comportement des mélanges de terre crue face à des contraintes mécaniques.

5.1 Friction

La friction est la résistance à une contrainte par frottement entre les éléments solides du mélange. Elle est impactée par :

- la taille, forme et l'arrangement des éléments solides
- la saturation en eau
- l'angle de la force appliquée

5.1.1 Taille, forme et arrangement des éléments solides

La friction est favorisée par le développement de points de contact entre les éléments solides du sol. De ce fait, elle augmente fortement avec la compacité du mélange (Weil &

Brady 2016). De plus, pour une même compacité, plus les éléments solides sont fins plus les contacts sont nombreux : c'est ainsi que la friction augmente avec la Surface Spécifique mesurée dans un mélange (Coventry 2004).

La rugosité des éléments solides empêche leur glissement relatif lors de la déformation de la matrice. Ainsi pour une même compacité, un mélange comprenant des granulats minéraux ou végétaux rugueux aura une friction plus intense qu'un mélange comprenant des éléments plus lisses. Ce phénomène est significatif au moins pour les granulats de la fraction sableuse ($F_{2000\mu m}$), tant dans les éléments de terre crue compactés (pisé) (Koutous & Hilali 2019) ou moulés (adobes) (Smith & Austin 1989).

L'impact de la rugosité des granulats sur la mécanique de la matière est bien connu dans les bétons de ciment mais reste peu étudiée pour les mélanges composés de terre crue (Koutous & Hilali 2019).

5.1.2 Eau

La friction est réduite lorsque l'eau tapisse les éléments solides, par effet de *lubrification*. C'est particulièrement le cas pour les colloïdes du sol et notamment les argiles qui adsorbent l'eau à leur surface par capillarité et/ou attraction électronique (Coventry 2004).

5.1.3 Angle

La résistance que l'on attribue à la friction dépend du nombre et de l'intensité des contacts entre les grains du mélange. Or, plus l'effort appliqué est compactant (voir contraintes angle xxx), plus les éléments sont mis en contact entre eux (Figure 39). A l'inverse, dans les contraintes principalement extensives la friction n'est pas une force significative, sauf lorsque des éléments élancés comme des fibres convertissent localement l'extension en forces de cisaillement (voir xxx fibres extension).

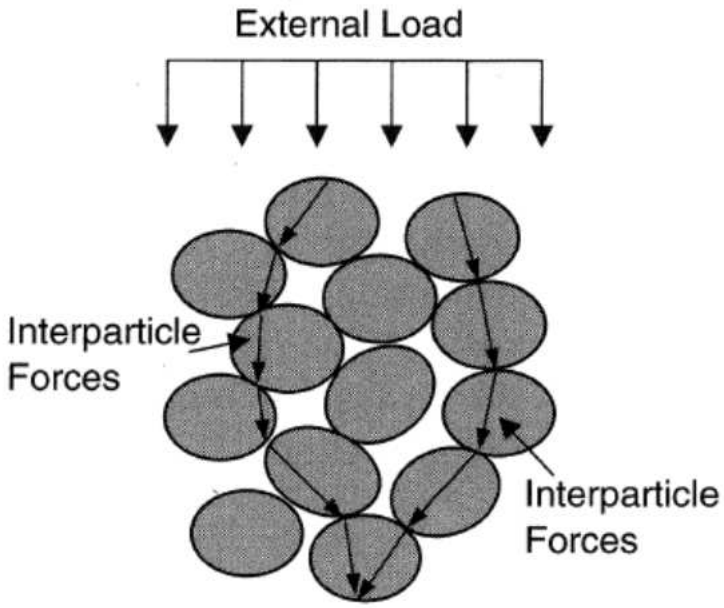


Figure 39: « reprise de charge » par les granulats d'un mélange au cours d'une contrainte compactante (Mitchell & Soga 2005)

5.1.4 Impacts sur les propriétés mécaniques

La friction entre les éléments solides du sol est une composante importante des comportements mécaniques de la terre (Weil & Brady 2016). La résistance à la compression dans les sols dépend fortement de la friction interparticulaire, particulièrement dans les sols pauvres en argiles (Weil & Brady 2016). 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.

5.2 Tension superficielle, capillarité et succion

5.2.1 Mécanismes

5.2.1.1 La tension superficielle

Les forces électroniques interagissant entre les molécules d'eau induisent leur attraction réciproque (voir xxx eau composants). Dès lors que l'eau entre en contact avec une phase avec laquelle les molécules d'eau n'ont pas une affinité électronique aussi forte qu'entre elles, comme l'air, les molécules d'eau en contact avec l'air sont attirées préférentiellement vers les autres molécules. Il en résulte un comportement macroscopique où la phase aqueuse tend à réduire spontanément la surface de contact avec l'air, en se rapprochant de la forme sphérique de la goutte d'eau. Cette impression de « répulsion » entre l'eau et l'air à leur interface est appelée la *tension superficielle*.

5.2.1.2 Capillarité et succion

L’eau a généralement une forte affinité avec la surface des éléments solides du sol, particulièrement lorsque ceux-ci sont chargés électroniquement. Celle-ci est plus forte qu’avec l’air, et parfois supérieure à la phase aqueuse elle-même. Ainsi, une goutte d’eau mise en contact avec un solide s’y *adsorbe* car cela réduit sa surface de contact avec l’air et donc la tension superficielle. Une matrice d’éléments solides, mise en contact avec de l’eau liquide, adsorbe cette eau qui se répartit spontanément sur la surface des solides : c’est le phénomène de capillarité que l’on montre souvent par l’absorption de l’eau d’une coupelle par un morceau de sucre posé à son contact.

La tension superficielle est en équilibre avec d’autres forces qui tendent à retirer ou adsorber l’eau au contact des éléments solides. Cet équilibre global est le *potentiel matriciel*, aussi appelé *succion* ou *pression partielle*. Plus le potentiel matriciel est important, plus l’eau est fermement adsorbée à la surface des grains. Le potentiel matriciel dépend ainsi de plusieurs paramètres :

- la saturation en eau : plus les conditions hydriques sont sèches, plus l’eau est fermement adsorbée à la surface des éléments solides. Le potentiel matriciel d’un sol saturé est nul.

- l’intensité de l’affinité de l’eau avec les solides. Notamment, l’intensité des forces électroniques qui maintiennent les molécules d’eau à leur contact directement ou via la présence d’ions hydratés. La quantité et la forme de surfaces solides impacte la surface de contact potentielle entre l’eau et l’air, donc la tension superficielle et ainsi le potentiel matriciel

- la composition ionique de l’eau, qui attirent les molécules d’eau dans un « manteau d’hydratation » (voir cohésion electronique xxx): de manière générale, plus l’eau est saturée en ions, plus le potentiel matriciel est important

- la gravité, qui draine l’eau vers le bas et limite la quantité adsorbée (voir Erreur : source de la référence non trouvée)

La succion n’est donc pas indépendante des forces de cohésions électroniques, cependant les mécanismes d’attraction qu’elle entraîne entre les solides sont bien distincts.

5.2.1.3 Cohésion capillaire des solides

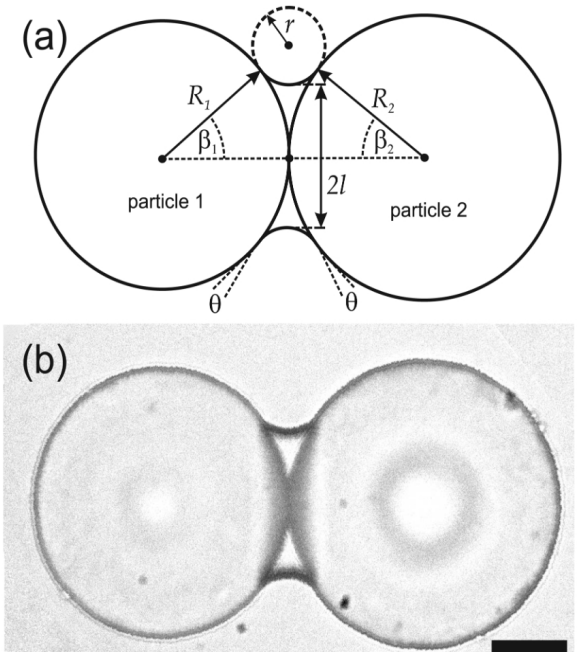


Figure 40 : Représentation théorique (a) et observation (b) de la tension superficielle du ménisque d’eau à l’interface entre deux sphères solides (Gögelein et al. 2010).

La tension superficielle étant proportionnelle à la surface de contact entre l’air et l’eau, elle favorise une organisation du volume d’eau minimisant cette surface de contact. Dans le cas de gouttes d’eau libres, c’est la sphère qui minimise le rapport surface/volume. En présence de solides, l’arrangement le plus stable maximise la surface de contact avec le solide relativement à l’air. Deux grains éloignés forment un pont capillaire avec une grande surface de contact avec l’air, tandis que lorsqu’ils sont rapprochés, la surface air/eau est réduite. L’état le plus stable est donc l’état rapproché, ce qui favorise un rapprochement des grains solides et qui les maintient en contact en présence d’eau et d’air.

La force de cohésion qui s’exerce entre deux particules solides connectées par un ménisque d’eau provient donc directement de la tension superficielle. Celle-ci est plus importante lorsque le rayon du ménisque est réduit car la surface de contact avec l’air augmente (Figure 40). La tension superficielle et donc la cohésion est alors d’autant plus forte que 1) la teneur en eau réduit (ce qui réduit la taille du ménisque) et 2) l’interface entre les particules est étroite, ce qui équivaut à une augmentation du diamètre pour des particules supposées sphériques (Gögelein et al. 2010).

Pour des éléments sphériques, la tension superficielle est supérieure entre de grandes sphères qu'entre petites sphères. Cependant, dans un mélange granulaire plus les sphères sont petites, plus il y a de surfaces de contact par unité de volume ce qui augmente la cohésion générale. En mélange, c'est finalement le nombre de ménisque qui importe plus que la taille des sphères, ce qui fait que plus les sphères sont fines, plus la cohésion est importante dans le mélange. D'autre part, les éléments du sol ne sont pas sphériques : les argiles aux faces plates développent des succions équivalentes à de grandes sphères, donc de fortes cohésions.

Avec la variation de la tension superficielle par réduction de la teneur en eau, les éléments solides du sol auront tendance à s'organiser de manière à réduire la tension dans des arrangements les plus stables possibles. Pour des grains sphériques, cet arrangement idéal varie en fonction de la teneur en eau et doit être considéré en trois dimensions. La Figure 41 est une modélisation de l'arrangement idéal de grains sphériques identiques selon la teneur en eau volumique.

Dans les sols naturels la forme sphérique parfaite n'existe pas, et les grains sont de taille variable. Les arrangements les plus stables seront cependant toujours ceux qui favorisent la réduction de la surface de contact de l'eau avec l'air, par exemple l'arrangement parallèle des feuillets argileux qui ne laisse que les extrémités des feuillets en contact avec l'air (voir par exemple Figure 36).

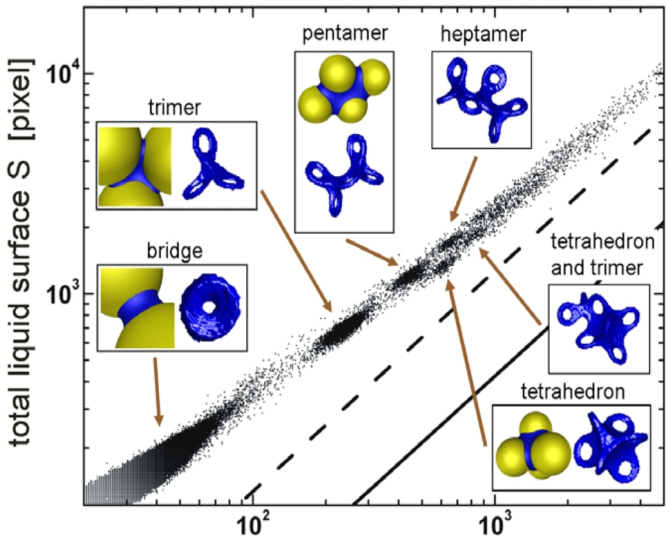


Figure 41 : modélisation de l'arrangement le plus stable de grains sphériques selon la teneur en eau du mélange granulaire. Le « trou » au coeur des ménisques n'existe pas dans la réalité et est dû à la résolution de la modélisation (Gögelein et al. 2010).

Les forces de cohésion liées à la capillarité sont faibles entre deux grains, mais à l'échelle des grains microscopiques du sol, très légers, elles dépassent généralement celles de la gravité (Gögelein et al. 2010). Ainsi, l'assemblage de milliers de grains dans une matrice granulaire permet l'établissement

d’une grande quantité de ponts capillaires et donc d’une cohésion conséquente à échelle macroscopique.

5.2.1.4 influence de la teneur en eau

La force de cohésion macroscopique augmente avec le nombre de ponts capillaires entre grains (Scheel et al. 2008).

Ainsi, à teneur en eau trop faible, les contacts entre grains sont secs et il n’y a pas de cohésion. A teneur en eau trop forte, les grains sont noyés (*coalescence* de la phase aqueuse) et il n’y a pas de succion (Cuccurullo et al. 2021). La cohésion capillaire est donc optimale à une saturation intermédiaire de la porosité.

5.2.1.5 Influence de la compacité

A priori, plus les contacts sont nombreux entre les éléments solides, plus le nombre de ponts capillaires potentiels est important, plus la cohésion potentielle est forte. De même, plus la porosité est fine plus la succion peut être forte avant décohésion des ponts capillaires par séchage. La compacité est corrélée à une augmentation du nombre de contacts entre les éléments solides et une réduction de la taille des porosités. Elle induirait donc de plus fortes succions pour un même état de saturation. Cependant, Xu et al. (2021) observent cependant que pour des saturations moyennes (10-14 % de teneurs en eau *massiques*) [xxx calculer volumiques?] la succion est faiblement dépendante de la compacité, alors que la compacité augmente la succion à des teneurs en eau plus faibles (4.5%). L’augmentation de la succion avec la compacité est donc dépendante de la teneur en eau. On peut suggérer que pour les grains du sol la cohésion capillaire est gouvernée par la fraction fine par cohésion électrostatique et capillaire. Ainsi, à des teneurs en eau conséquentes la cohésion capillaire est négligeable car les porosités fines sont saturées tandis que la cohésion électrostatique est presque constante, ce qui expliquerait qu’une variation de la compacité de la macroporosité ne change pas considérablement leur contribution à la succion, dominée par la cohésion électrostatique.

5.2.1.6 Influence de la granulométrie

Dans les mélanges granulaires étudiés en laboratoire qui sont composés de grains sphériques homogènes, on voit directement la relation entre l'état de cohésion des ponts capillaires individuels et l'état de cohésion du mélange macroscopique, avec cependant un certain aléa lié à l'arrangement aléatoire des grains du mélange et sa compacité (Gögelein et al. 2010). On peut également observer en conditions naturelles l'impact de la saturation en eau sur la cohésion sur les mélanges granulaires triés et très grossiers : un peu d'eau permet de modeler du sable, mais son immersion ou son séchage au soleil induit son effondrement (Figure 42). La porosité entre grains grossiers étant relativement large, les forces de capillarité y sont faibles et l'eau y est faiblement retenue. Dans le cas de mélanges grossiers, la contrainte d'évaporation est plus forte que la rétention capillaire dans des conditions de séchage réelles : l'intégralité de l'eau s'évapore, avec une perte totale de cohésion.



Figure 42 : Variation des forces cohésives dans un sable selon la teneur en eau. Seul l'état intermédiaire, garant de cohésion capillaire par présence d'eau et d'air, permet de maintenir la forme de l'élément. © E. Hamard

En revanche, dans les mélanges granulaires très fins, par exemple en présence de minéraux argileux, la tension superficielle de la porosité fine est suffisante pour maintenir une faible fraction d'eau dans les pores des éléments fins malgré la contrainte de séchage, et notamment dans les espaces interfoliaires des argiles où l'eau est très fortement liée par capillarité et par cohésion électronique (voir xxx cohésion électronique). Ce n'est donc qu'en appliquant des conditions extrêmes de séchage (températures >100°C, humidité relative nulle), jamais rencontrées dans l'atmosphère, que l'on atteint les seuils de décohésion capillaire (Ciancio & Jaquin 2011; Serlet et al. 2016; Cuccurullo et al. 2021).

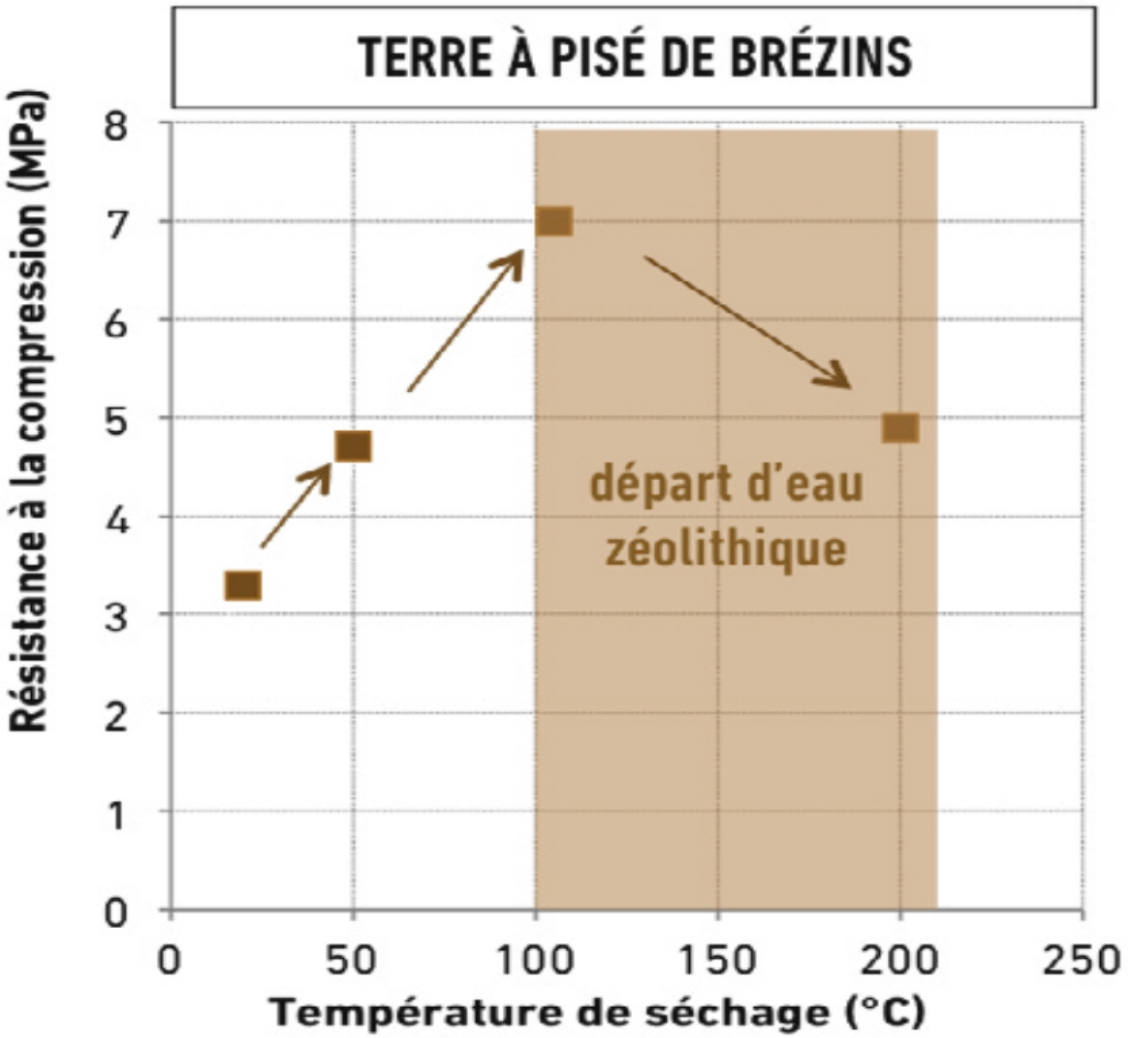


Figure 43 : Résistance à la compression d'un échantillon de terre crue selon sa température de séchage, donc sa teneur en eau résiduelle. Dans des mélanges de terres cohésives, la réduction de la teneur en eau ne fait qu'augmenter les forces de cohésion capillaire donc la résistance mécanique. Le seuil de décohésion le seuil de décohésion capillaire induisant une chute de résistance mécanique n'est atteint que pour des températures de séchage non rencontrées en conditions naturelles. (Serlet et al. 2016)

Au contraire, plus la contrainte de séchage est forte, plus la tension superficielle est forte, et la cohésion continue d'augmenter au cours du séchage jusqu'à stabilisation avec l'humidité relative de l'air ambiant. Pour la plupart des sols fins, on n'atteint donc jamais un état parfaitement sec dans des conditions de séchage réalistes, et la cohésion par capillarité atteint des tensions considérables dans les éléments composé de terre crue à l'état que l'on dit « sec » (état d'équilibre avec l'air ambiant) (Cuccurullo et al. 2021; Xu et al. 2021).

Dans sols naturels, il y a la plupart du temps une variation de la taille des éléments solides. Même pour les sols grossiers il y a généralement présence d'éléments plus fins, sinon ces matériaux entrent dans la catégorie des sables ou granulats triés (voir xxx définition sol). Ainsi, tant qu'il y a une continuité de liens capillaires entre les éléments fins dans la matrice du sol, les conditions de séchage nécessaires à la rupture ne seront pas rencontrées.

5.2.1.7 Influence de l'organisation des solides: homogénéité

Cette continuité entre les éléments fins dépend de l'organisation des éléments solides : la compacité induit leur rapprochement donc l'augmentation globale du nombre de contacts, la distribution des éléments gouverne la continuité des liaisons.

On a vu que l'agrégation des éléments solides du sol est spontanée dans les sols naturels et peut prendre diverses formes (aggrégation xxx). Notamment, l'arrangement des éléments fins comme les argiles peut favoriser le pontage entre les grains plus grossiers (Figure 37, Figure 36).

Des propriétés de cohésion sont donc possibles dès la présence d'une petite quantité d'éléments fins, tant que l'arrangement permet une continuité de la cohésion dans la matrice, et permettent l'augmentation de la cohésion avec le séchage en conditions réalistes.

L'agrégation des argiles est relativement spontanée dans les sols naturels (voir xxx agrégation). La structure agrégée n'est pas la forme développant le plus de cohésion dans la matrice, car si la cohésion intra-agrégats est forte, la cohésion inter-agrégats ne bénéficie pas de la dispersion des feuillet et de la multiplicité des contacts qu'elle permet. Une organisation matricielle de l'ensemble des éléments solides et particulièrement des plus fins est donc favorable à la cohésion d'un mélange de terre crue. Des recherches ont montré l'augmentation de la cohésion de mélanges de terre crue avec la dispersion chimique des argiles (Meimaroglou & Mouzakis 2019).

5.2.1.8 Cohésion capillaire dynamique ?

- les ménisques procurent de l'élasticité : comportement élastique des déformations ; dissipation de l'énergie de compaction dynamique.

- manteaux d'hydratation augmentent le diamètre des éléments, favorise leur « recapture » en cours de cisaillement s'ils sont plus hydratés...

5.2.1.9 Mesures et estimations

5.2.1.9.1 Surface spécifique

Puisque la présence d'éléments fins favorise la cohésion, la mesure de la surface spécifique est une bonne indication du potentiel cohésif des sols par capillarité : plus de surface induit plus de contacts potentiels entre les grains.

5.2.1.10 Minéralogie des argiles

Plus la surface développée est forte, plus grande est la succion. Les argiles à grande surface spécifique sont donc favorables à une plus forte succion (Xu et al. 2021). Dans l'ordre de contribution, on considère généralement les smectites > illites > kaolinites. Meimaroglou et Mouzakis (2024) notent cependant l'importance des argiles amorphes (voir argiles xxx) dans le développement de surfaces de contact.

5.2.1.11 Propriétés impactées

La rupture des agrégats argileux et leur dispersion dans la matrice est recherchée dans les étapes d'homogénéisation des procédés de construction en terre crue afin de bénéficier d'une meilleure cohésion par dispersion des composants cohésifs dans la matrice. Or, les agrégats sont stables pour des teneurs en eau intermédiaires correspondant à un maximum de cohésion capillaire. Pour des sols peu cohésifs, l'homogénéisation peut se faire soit par « broyage » dans des mélanges très secs, soit à de plus fortes teneurs en eau : dans les deux cas la cohésion capillaire est faible. Pour des mélanges argileux, la teneur en eau minimale de décohésion n'est jamais atteinte en conditions naturelles, c'est donc par augmentation de la teneur en eau que l'homogénéisation est facilitée.

Par ailleurs, 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 (Smith & Austin 1989).

5.3 Cohésion électrostatique

La présence de charges électrostatiques dans les structures cristallines des minéraux ou dans les molécules organiques du sol induit des comportements d'attraction ou de répulsion des éléments chargés. On décrit ici les interactions électrostatiques, c'est à dire ioniques, impliquant des éléments électriquement chargés. On négligera les interactions électromagnétiques comme les forces de Van der Waals qui agissent notamment entre les feuillets des argiles 1:1 (voir argiles XXX).

5.3.1 Mécanismes

Les charges électroniques élémentaires de chacun des composants du sol – solides et en solution – interagissent dans des complexes électroniques et entraînent attraction (floculation) ou répulsion (défloculation) des éléments solides du sol.

On parle ici de la cohésion inter-solides apportée principalement par des complexes de liaisons ioniques et électrostatiques, que l'on distinguera de la cohésion apportée par capillarité, malgré que ces deux phénomènes présentent une certaine continuité : la tension superficielle de l'eau liquide provient notamment des liaisons hydrogène (voir XXX cohésion par capillarité). Les liaisons ioniques sont généralement plus fortes que les liaisons hydrogènes qui caractérisent la tension superficielle, et moins fortes que les liaisons covalentes qui caractérisent la cohésion interne des éléments solides (voir XXX solides colloidaux).

Par conséquent, la cohésion électronique pourrait être définie par la cohésion résiduelle entre les solides en milieu saturé d'eau liquide : en absence de gaz, il n'y a pas de cohésion capillaire, donc la floculation est uniquement liée à la cohésion électronique.

La *floculation* peut avoir lieu plus ou moins directement entre deux éléments solides. Premièrement, en solution dans l'eau, les charges électroniques de deux solides aux charges opposées interagissent directement ou à travers les liaisons hydrogène de molécules d'eau. Par exemple, on observe une cohésion entre des bordures de feuillets

argileux chargés positivement et les faces chargées négativement d'autres feuillets (voir Figure 51) (Sridharan et al. 1988; Bolleni 2019).

Deuxièmement, deux solides chargés négativement se repoussent, mais lorsque des cations cations se placent en intermédiaires, ils permettent un « pontage » ionique qui favorise la floculation (Brady & Weil 1984). Par exemple, les argiles dites « gonflantes » de type Smectites se caractérisent par la présence d'ions divalents entre les couches argileuses qui relient les faces parallèles des couches négativement chargées.

Le pontage que permettent les ions dépend de leur charge électronique : des cations di ou trivalents (p. ex. Ca^{2+} ou Al^{3+}) attirent plus fortement les éléments chargés négativement (p. ex. matières organiques, argiles) que des cations monovalents (p. ex. K+, Na+). Cette capacité de liaison dépend également de l'encombrement des ions, c'est à dire du volume qu'ils occupent en solution dans l'eau. Cet encombrement comprend les couches d'eau adsorbées en surface des ions, qui ne dépend pas que de leur valence (nombre de charges) mais également de leur électronégativité (en quelques sorte, leur affinité à l'eau). Ainsi, les ions sodium (Na+) sont plus hydratés donc plus encombrants que les ions K+, leurs propriétés de pontage électronique sont donc moindres. C'est pourquoi les ions sodium sont connus pour leurs proriétés *défloculantes* (Brady & Weil 1984; Husein Malkawi et al. 1999; Schroeder 2016; Meimaroglou & Mouzakis 2024). Ajoutés à la solution du sol, ils prennent la place d'autres ions plus cohésifs (p. ex. Ca^{2+}) et provoquent la défloculation des solides chargés négativement. L'excès d'ions di ou trivalents peut avoir le même effet, en couvrant les colloïdes négatifs par des charges positives ce qui pousse à la défloculation (Zeng et al. 2016).

Finalement, l'impact des cations sur la flocculation-défloculation des argiles est un phénomène complexe qui dépend des paramètres physico-chimiques de la solution (pH, température, etc.) et de la composition des solides (Mitchell & Soga 2005; Zeng et al. 2016). Il est donc difficile à prévoir malgré l'impact conséquent qu'il peut avoir sur les propriétés des mélanges de terre crue.

Les anions peuvent également intervenir dans les phénomènes d'agrégation électronique, mais leur impact semble moins conséquent dans les sols naturels que les cations (Mitchell & Soga 2005). En effet, leur principal impact est lié à la dégradation de la prise des liants hydrauliques (ciment, chaux), et non sur les argiles.

5.3.2 Influence des paramètres du mélange

5.3.2.1 Saturation

La réduction de la teneur en eau volumique entraîne le rapprochement des éléments solides par l'augmentation des forces capillaires. D'autre part, si la teneur en eau réduit par séchage, la concentration des ions présents en solution augmente. Dans les deux cas les interactions électroniques sont favorisées. Notamment, dans certaines argiles de type 2:1, le séchage entraîne une augmentation de la concentration en ions interfoliaire et donc de la cohésion entre les feuillets d'argiles (Coventry 2004).

5.3.2.2 Colloïdes et organisation de la matrice

La superposition parallèle des feuillets argileux – *via* leur interaction électronique directe ou *via* les ions di ou trivalents entre les couches – est très stable, c'est d'ailleurs sous

cette organisation déjà agrégée que se néoforment les argiles par expansion latérale des feuillets (Schaller et al. 2021). Cette agrégation stabilise une grande partie des charges des argiles et réduit de ce fait les possibilités de liaison avec d'autres éléments du sol (minéraux ou organiques). Comme pour la cohésion capillaire, lorsque les agrégats sont désorganisés par une action mécanique de mélange (voir XXX cohésion capillaire), les argiles peuvent développer plus de surface de contact avec d'autres éléments solides et s'agencer dans des organisations favorables à la cohésion générale du mélange.

Les matières organiques (MOs) sont de forme infiniment diverses, et certaines, notamment à l'échelle moléculaire, présentent des charges principalement négatives, mais également positives (voir xxx MOs). Leurs interactions avec les minéraux du sol est fondamentale en science agronomique : les complexes argilo-humiques sont étudiés pour leur intérêt dans la stabilisation des agrégats du sol et la rétention des nutriments (Weil & Brady 2016). Dans certaines configuration, les molécules organiques peuvent occuper les charges électroniques des argiles et les rendre indisponibles, favorisant ainsi la défloculation ou l'absence de cohésion, faisant perdre en cohésion des sols argileux (Weil & Brady 2016).

Dans d'autres cas, de longues molécules organiques (p. ex. polysaccharides) peuvent relier de nombreux éléments solides entre eux, participant ainsi à la cohésion des éléments solides dans de grands complexes argilo-humiques à différentes échelles. Soulignons ici encore la complexité des MOs dans leurs interactions avec le sol : leurs propriétés sont plus variables encore que celles des composants minéraux. C'est donc principalement la qualité des MOs d'un mélange de terre crue qui gouverne leur influence sur la cohésion électronique. Cependant, la quantité joue également, notamment relativement à celle des argiles : par exemple, Arthur et al. (2021) observent que pour des teneurs en matières organiques inférieures à environ 10 fois celles des argiles, l'influence relative des MOs sur les propriétés mécaniques du sol devient peu significative.

5.3.2.3 pH

L'impact du pH sur la cohésion électronique des éléments du sol est complexe, car il implique de nombreux mécanismes contradictoires. Un pH faible 1) réduit l'électronégativité de l'eau qui favorise la défloculation des argiles par la présence de charges négatives dans les espaces interfoliaires (Brady & Weil 1984) et 2) peut favoriser la floculation par la dissolution de cations issus des éléments solides du sol qui peuvent participer à l'agrégation électronique (Torrance & Pirnat 1984).

5.3.3 Mesure et estimation

5.3.3.1 Mesure

La cohésion électronique peut être considérée comme la seule composante de cohésion dans une matrice mélangée (rupture de la *cimentation*, voir xxx cimentation) et saturée en eau (pas de cohésion capillaire, cf cohésion capillaire xxx). On peut donc estimer le potentiel de cohésion électronique d'un sol par une mesure de résistance au cisaillement « non drainé » (voir xxx cisaillement etat loiquide) (Zeng et al. 2016).

5.3.3.2 Estimations

Les mesures de limites de liquidité sont bien corrélées à la résistance au cisaillement dans les terres très argileuses, elles peuvent donc indiquer la présence d'une cohésion électronique conséquente (voir limites atterberg XXX) (Zeng et al. 2016).

Les mesures de Capacité d'Echange Cationique (CEC) permettent d'estimer les charges développées à la surface des solides dans un échantillon de terre (voir xxx CEC). En ce sens, elle indiquent convenablement la cohésion électronique potentielle des solides. Cependant, on a vu que la cohésion dépend également des ions de la solution du sol permettant la liaison entre les solides chargés. Les mesures de CEC peuvent être couplées à la détermination des ions déplacés pour évaluer la composition de la solution du sol.

Les molécules employées dans les mesures de Surface Spécifique ou de CEC peuvent avoir différentes dimensions, ce qui permet d'évaluer ces propriétés pour les surfaces accessibles à ces molécules. Les charges ou les surfaces des éléments solides accessibles à des molécules de différente taille renseignent sur la microstructure des éléments solides du sol, par exemple l'état agrégé ou dispersé des feuillets argileux.

La minéralogie du sol apporte de nombreuses informations sur le potentiel de cohésion des composants solides, notamment :

- des familles de minéraux argileux dont les propriétés cohésives sont très variables

- de la quantité ou la qualité des matières organiques

- de la présence de minéraux carbonatés, dont l'identification indique la potentielle présence d'ions Calcium (Ca^{2+}) dans la solution pouvant influencer la floculation.

5.4 Cimentation

5.4.1 Mécanismes

Dans les sols naturels et les mélanges composés de terre crue, des phénomènes de dissolution/précipitation sont à l'œuvre aux interfaces entre les solides et la solution du sol (voir xxx pH). La dissolution concerne la mise en solution d'ions, et la précipitation leur dépôt dans des complexes à liaisons covalentes, qui caractérise leur définition de « solides » et non d'« agrégats ». Cet équilibre est en jeu pour tous les minéraux du sol : carbonates, oxydes et hydroxydes métalliques, minéraux argileux et autres minéraux siliceux, etc. Certains sont plus stables que d'autres dans les conditions physico-chimiques rencontrées dans les sols naturels (voir xxx pH). Au cours des pédogenèses, selon les conditions physico-chimiques et notamment par l'influence du climat et sont donc amenés à subir majoritairement de la dissolution (carbonates, minéraux primaires) et d'autres pourront voir leur structure cristalline s'étendre par précipitation (oxydes et hydroxydes métalliques, minéraux argileux) (voir Figure 29).

Les phénomènes de dissolution/précipitation des composés ioniques, associés à leur transport dans la solution du sol, engendre en quelques sortes une redistribution des

éléments solides. Ce déplacement peut amener à une réduction ou une augmentation de leurs proportions selon l'intensité des départs et arrivées, et/ou une modification de leur tailles, formes et organisations.

Le dépôt ou la précipitation peuvent donc être vus comme des variations de la composition solide du sol (quantité et qualité). Surtout, la précipitation participe à des mécanismes de liaison entre éléments solides et ainsi à la solidification des agrégations existantes. Ce mécanisme de liaison s'appelle la *cimentation* (Mitchell & Soga 2005; Meimaroglou & Mouzakis 2024).

Au cours d'une perturbation mécanique de la matrice du sol, notamment par mélange, les *liaisons cimentaires* peuvent être rompues. Dès lors, les propriétés du sol apportées par la cimentation sont modifiées. Par exemple, la structure des sols issus de limons éoliens est parfois maintenue par une faible cimentation interparticulaire carbonatée, qui est perdue si le sol est perturbé. La cimentation a donc pour caractéristique de se développer sur le long terme, et d'être perdue par remaniement.

Ce comportement peut également définir la *cimentation* : un sol présente une cimentation si ses propriétés de cohésion sont inférieures aux propriétés initiales après remaniement de la matrice.

Il faut cependant relever la continuité entre ce qu'on définit par les « granulats » du sol et la « cimentation inter-granulats ». En effet, et particulièrement lorsque ces deux composants sont constitués de minéraux semblables (p. ex. des carbonates), la définition de la liaison covalente ne permet pas de différencier ces deux groupes de constituants. La différence est de l'ordre de l'histoire minéralogique: la cohésion « interne » aux granulats est celle de la structure minérale (plus ou moins cristalline) qui est acquise par des processus géologiques, tandis que la cohésion « externe » par cimentation est acquise au cours de la pédogenèse.

Pour les colloïdes du sol (p. ex. molécules organiques ou feuillets argileux), on ne parle pas de dissolution mais de suspension car celle-ci est instable à long terme sous l'effet de la gravité (voir Sédimentation xxx). La suspension concerne des éléments solides et non des ions, et le dépôt entraîne des liaisons faibles comme des liaisons de van der Waals ou des liaisons hydrogène, ou des liaisons plus forte comme des attractions ioniques dans le cas de composés chargés, mais généralement pas de liaisons covalentes.

Une classification stricte des phénomènes cohésifs dans les sols pourrait ne pas intégrer dans la catégorie « cimentation » la cohésion liée aux attractions non covalentes, qui serait plutôt rattachée aux cohésions électroniques ou capillaires. Malgré tout, de nombreux auteur.ices identifient de la cimentation liée à certains colloïdes du sol comme les matières organiques. Si c'est bien l'établissement ou non de liaisons covalentes qui détermine l'appartenance d'une liaison au domaine de la cimentation, nous suggérons que ces classifications peuvent avoir deux origines : 1) l'établissement de liaisons covalentes entre les colloïdes et d'autres solides dans des structures « amorphes », dont nous n'avons pas connaissance de documentation ou 2) l'interprétation de cohésions comme cimentation, par exemple par leur force ou par le caractère irréversible de leur rupture à court terme ou récupération/induration à moyen ou long terme.

5.4.2 Influence des conditions physico-chimiques

Plusieurs paramètres influencent l'équilibre de dissolution/précipitation, notamment : le pH, la concentration ionique de la solution, la température (voir chap xxx pH).

La teneur en eau agit à travers la concentration ionique de la solution. On a vu que le lessivage permanent des ions par renouvellement de la solution du sol favorise la dissolution des éléments (cf. xxx pH). Cependant, lorsque la teneur en eau du sol baisse par évaporation et non par drainage, la teneur en éléments dissous augmente dans la solution du sol (Zeng et al. 2016) et déplace l'équilibre dissolution/précipitation vers une plus forte précipitation (Smith & Austin 1989). La dissolution concerne l'ensemble des surfaces de minéraux dissolubles et les zones où ils sont les plus représentés, tandis que la précipitation est plus aléatoire et peut se faire sur diverses surfaces. Par l'effet de dissolutions-reprécipitations récurrentes, il est probable que les éléments mobilisés soient répartis plus aléatoirement et donc, comme la répartition des feuillets argileux par le mélange (voir xxx organisation argiles cohésion), favorisent la liaison par « pontages » cimentaires entre les granulats du sol. Pour que cette répartition des éléments soient effectives, il est nécessaire que la saturation d'eau atteinte soit suffisante pour permettre la circulation des ions entre les grains dissous (p. ex. morceaux de calcite) et les espaces de précipitation (p. ex. les contacts entre grains), c'est à dire une continuité de la solution du sol.

D'autre part, au cours du séchage la solution du sol a tendance à se concentrer spontanément au contact entre les granulats sous l'effet de la tension superficielle (voir xxx tension superficielle). Ainsi, il est probable que la précipitation se fasse préférentiellement à ces interfaces plutôt qu'aléatoirement sur la surface des solides, ce qui favorise d'autant plus la cohésion intergranulaire.

Cependant, c'est au cours de nombreux procédés d'hydratation-désyhdratation que cette redistribution est possible car l'eau peut contenir des quantités limitées d'ions à chaque phase hydratée. Ainsi, au cours du premier séchage d'un élément mélangé, par exemple dans le cas du séchage d'éléments composés de terre crue mélangée, seule une faible cimentation peut avoir lieu comparée à celle qui pourrait être obtenue après de multiples phases de séchage-réhydratation, comme c'est le cas dans les sols naturels. Cela amène à considérer la cimentation comme indépendante des conditions de saturation à court terme (Weil & Brady 2016).

Un facteur supplémentaire qui favorise la précipitation localement est la présence de « noyaux de condensation », soit des surfaces propices à la précipitation des ions dont l'équilibre physico-chimique est favorable à celle-ci. C'est le cas notamment de la précipitation d'ions par cristallisation sous forme de feuillets argileux, dont l'expansion est plus favorable par précipitation de la silice en périphérie des feuillets (Schaller et al. 2021).

5.4.3 Influence de la composition des solides

Dans les conditions rencontrées dans les sols naturels et plus généralement dans les mélanges composés de terre crue, la cimentation de court et moyen terme est fortement influencée par la présence de minéraux carbonatés, et particulièrement l'hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$ (Meimaroglou & Mouzakis 2024). En effet, ceux-ci ont un équilibre de

dissolution/précipitation proche de conditions fréquemment rencontrées dans les sols (voir xxx pH).

Smith & Austin (1989) indiquent que la présence de calcite en éléments finement fragmentés augmente leur surface de contact avec la solution du sol et donc l'intensité de leur mobilisation dans les phénomènes de dissolution-reprécipitation. C'est le cas dans les sols développés dans des sédiments « récemment déposés » qui n'ont pas encore subi d'intenses phénomènes de dissolution-précipitation et sont bien distribuées dans la matrice du sol. Les calcites de sols semblables mais plus anciens ont subi ces phénomènes pendant plusieurs siècles et l'arrangement des formations calciques est plus stable et plus imperméable, plus *indurée*. La forme et l'organisation des calcite est donc d'une part un facteur de la cohésion issue de la cimentation, d'autre part un facteur de l'intensité du processus d'évolution de la cimentation. Cela suggère que pour favoriser la cohésion par cimentation, des matériaux fins et à structure amorphe sont plus favorables que des formes cristalline organisées et massives.

Les composés carbonatés sont les plus impactants sur la cimentation dans les terres issues de sols développés en climats tempérés comme c'est le cas de l'Hexagone. Cependant, le phénomène de cimentation est très important pour les sols contenant des oxydes et hydroxydes, peu présents en climats tempérés mais très importants en climats tropicaux (Wolfskill et al. 1970; Mitchell & Soga 2005; Meimaroglou & Mouzakis 2024).

Les êtres vivants du sol participent également à la cimentation. Les propriétés de précipitation de carbonates de certains microorganismes sont utilisées en ingénierie dans la stabilisation des sols de pentes (Figure 44) (Sun et al. 2022).

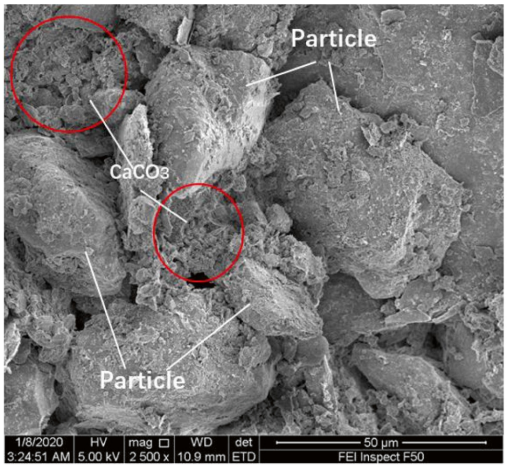


Figure 44 : cimentation intergranulaire par des cristaux carbonatés produits par bio-précipitation microbienne (Sun et al. 2022)

Les molécules organiques telles que des exsudats racinaires (p. ex. les polysaccarides, voir xxx MOs) sont souvent considérées comme favorisant la cimentation interparticulaire (Mitchell & Soga 2005; Huang et al. 2011; Weil & Brady 2016). Certain.es auteur.ices appellent cet effet « maturation » des éléments composés de terre crue, car cette cimentation participerait à l'augmentation de résistance mécanique des matériaux avec le temps (Schroeder 2016). Cette cimentation, rattachée à la présence de matières organiques, pourrait être liée au développement d'êtres vivants les consommant et produisant à leur tour de nouvelles MOs propices à la cohésion. Par exemple, l'effet de « maturation » peut être recherché par la fermentation des fibres végétales ou selles animales dans un mélange de terre crue préalablement à sa mise en œuvre (Vissac et al. 2017), pouvant créer des cimentations qui ne seront pas rompues au cours du façonnage des matériaux. Dans des éléments composés de terre crue comme dans les sols naturels, une fois le matériau au repos, la croissance de végétaux ou de mycelium peut participer à la cohésion inter ou intra-agrégats en créant un réseau fibreux ou en produisant des molécules cohésives comme des polysaccharides (Metzger & Yaron 1987).

C’est donc une forme de « cimentation biologique » qui peut être apportée par le développement d’être vivants dans les matrices de terre crue.

Il est probable que la cohésion apportée par ces processus soit principalement liée à des liaisons non covalentes, et qu’il ne s’agisse donc pas de cimentation si elle est ainsi définie. Cependant, l’intensité de ces liaisons, la temporalité de leur mise en place et donc la lente réversibilité de leur rupture est semblables aux processus de cimentation par précipitation minérale, ce qui explique leur rattachement aux propriétés cimentaires.

5.4.4 Impact sur les autres propriétés

La cohésion liée à la cimentation participe à la résistance mécanique des sols en place et des éléments composés de terre crue. Cette participation peut atteindre plusieurs centaines de kilopascals de résistance mécanique cohésives (Mitchell & Soga 2005) (voir xxx résistance mécniauqe).

Les sols calcaires sont employés avec succès dans la plupart des techniques-types de construction en terre crue : a minima les adobes (Smith & Austin 1989; Aras-Gaudry et al. 2023; Meimaroglou & Mouzakis 2024) et BTC (Smith & Austin 1989) et le pisé y sont favorables (Smith & Austin 1989; Maniatidis & Walker 2003).
En effet, les propriétés de cimentation participeraient à l’augmentation des résistances mécaniques des matériaux au cours du séchage (Smith & Austin 1989; Schroeder 2016; Meimaroglou & Mouzakis 2024), ce qui serait pourrait être décisif pour les matériaux dont la teneur en autres éléments cohésifs (p. ex. argiles) serait basse (Smith & Austin 1989).
Au vu des propriétés discutées précédemment, on peut suggérer que la cohésion apportée par cimentation dans les éléments composés de terre crue serait favorisée :

- par la compacité qui augmente les surfaces de contact, lieux de cimentation privilégiés ;

- par la pulvérisation des éléments carbonatés qui augmente leur surface de contact avec l’eau et ainsi leur dissolution ;

- par de plus fortes teneurs en eau qui permettent de dissoudre plus d’ions par volume de mélange.

En revanche, il est à noter que si la si la présence de composés carbonatés ou autres composés cimentaires favorise la cohésion et permet d’apporter de résistance mécanique au cours du séchage et à plus long terme aux éléments finis, ils n’apportent pas de cohésion au cours des procédés tant que le mélange n’est pas au repos (Maniatidis & Walker 2003). Sur les matériaux non remaniés, la cimentation favoriserait un comportement cassant plutôt que ductile, réduisant de ce fait la plasticité des sols indurés (cimentés) (voir plasticité xxx). Dans les sols remaniés, elle influe peu sur la mécanique de la matière qui redevient dépendante uniquement des autres composants, mais on peut suggérer qu’elle puisse empêcher la rupture des agrégats cimentés, comme des agrégats argileux et ainsi réduire les propriétés de cohésion des mélanges. Par exemple, des argiles indurées peuvent ne présenter leur plasticité qu’après rupture de la cimentation (Barnes 2013b:101).

En l’absence de composés plastifiants dans une terre (p. ex. argiles), on peut se demander si la cimentation serait suffisante pour permettre la mise en œuvre des

techniques modelées, notamment les procédés-types de bauge ou de torchis, car elles nécessitent des résistances mécaniques suffisantes dès les étapes de façonnage (voir xxx façonnage).

Les procédés de cimentations sont favorisés par la rémanence de procédés d'humidification/séchage. On peut se demander si la variation de teneur en eau des matériaux composés de terre crue en conditions d'usage, ou au cours du premier séchage, suffit à permettre ces phénomènes. Si c'est le cas, ils pourraient participer à l'augmentation des résistances mécaniques des éléments au cours de la durée de vie, ou de l'imperméabilité des surfaces par consolidation et cristallisation des carbonates dans la porosité. On peut également se demander si les remontées capillaires issues de sols calcaires favorisent la cimentation de la porosité des éléments en contact avec le sol, comme le salpêtre que l'on observe fréquemment dans les murs subissant des remontées capillaires.

Les sols indurés présentent des propriétés de résistance mécaniques supérieures lorsqu'ils ne sont pas remaniés. Ainsi, pour ces sols le découpage et l'assemblage de blocs non perturbés favorise le maintien de la structure cimentée. C'est le cas des blocs latéritiques cimentés par des oxydes métalliques employés dans certaines zones tropicales (Wolfskill et al. 1970), mais également de certains sous-sols crayeux qui peuvent être, au choix, découpés et maçonnée comme « craie » ou broyés puis compactés comme « pisé » (Maniatidis & Walker 2003).

C'est également le cas de la technique-type du gazon (voir techniques xxx) : le réseau racinaire en place dans le sol engazonné est un type de « cimentation biologique », car c'est son intégrité qui apporte la cohésion à la motte découpée, permettant son transport et sa cohésion interne dans le mur en place (Russell et al. 2022). Si le sol était mélangé, le réseau racinaire et mycélien serait détruit et il ne se reconstruirait pas suffisamment à petite échelle temporelle. En revanche, une fois maçonnée sur le mur les végétaux du gazon poursuivent temporairement leur croissance : les racines interpénètrent les autres mottes et on observe ainsi une « cimentation » entre les éléments appareillés sans mortier (Lin et al. 2023). Ainsi, comme pour les autres processus de cimentation, la cohésion apporté par cimentation biologique se met en place à long terme, sa rupture étant peu réversible à court terme. Également, elle ne se met en place qu'en présence d'eau, favorable au développement des organismes. On peut donc rapprocher ces phénomènes des processus cimentaires autant que des processus d'ajouts de fibres (voir xxx ajout fibres) rencontrés dans d'autres techniques-types (p. ex. bauge, adobes, torchis). Elle est essentielle pour les techniques-type de gazon, car c'est elle qui permet l'emploi de sols peu cohésifs dans ces procédés : horizons peu denses, riches en matières organiques peu cohésives et à granulométrie grossière, que l'on trouve en surface des sols à pédogenèse lente de certains territoires du Nord de l'Europe (Russell et al. 2022) (latitudes-types sur la gauche de la Figure 29).

5.4.5 Mesure

La dissolution des carbonates, du gypse et des oxydes et hydroxydes de fer peut être réalisée par lessivage d'un échantillon à l'EDTA (une molécule capturant les ions). Des

essais de résistances mécaniques réalisés sur des échantillons traités et non traités à l'EDTA permettrait de comparer l'impact de cimentations composées de ces minéraux (Mitchell & Soga 2005). Notons cependant que cette technique pourrait également impacter la distribution granulométrique et probablement la compacité des éléments composés de terre crue riches en granulats carbonatés, et non seulement les liaisons cimentaires carbonatées. Varier l'intensité du lessivage et surveiller ces paramètres pourrait permettre de trouver une intensité permettant une dissolution principalement de la cimentation et peu des granulats non cimentés.

[j'en dit trop ? Ça fait des perspectives de recherche pour la champagne crayeuse :)]

5.4.5.1 Estimations

Au cours d'une perturbation mécanique de la matrice du sol, notamment par mélange, les *liaisons cimentaires* sont rompues. Les forces de cohésion cimentaires peuvent donc être attribuées à la fraction de cohésion qui est perdue après remaniement de la matrice. Cependant, cette estimation suppose que l'organisation des autres constituants du sol est similaire après le remaniement, notamment la compacité et l'agrégation, ce qui est difficile à assurer au cours d'un procédé de mélange. Mitchell & Soga (2005) suggèrent que des essais en compression saturés (voir résistances mécaniques xxx) pourraient indiquer la présence de cimentation par une première rupture brutale avant un comportement ductile de consolidation (voir consolidation xxx) lié à la présence d'argiles.

5.5 Cohésion apparente

Trois mécanismes de cohésion entre éléments solides ont été présentés : la cohésion électrostatique, la succion et la cimentation ; auxquelles s'ajoutent les forces électromagnétiques comme celles dites de Van der Waals (Jury et al. 1991; Coventry 2004; Meimaroglou & Mouzakis 2024). Ce dernier type n'a pas été décrit mais son influence sur la cohésion interfoliaire de certaines argiles est importante (cf. argiles xxx).

Ces trois forces se cumulent entre les solides du sol et par conséquent à l'échelle de la matrice granulaire, sous la forme de la *cohésion apparente*, qui équivaut à la *résistance en traction* de la terre (voir xxx résistance) (Mitchell & Soga 2005; Xu et al. 2021).

5.5.1 influence de la saturation en eau : teneur et variation

On a vu que les forces de succion issues de la capillarité sont fortement influencées par la teneur en eau de la porosité, c'est à dire la *saturation*. Elles sont maximales dans un équilibre situé entre la désaturation des interfaces entre les plus gros grains ou agrégats et le renforcement de la tension aux interfaces les plus fines. Dans les sols fins et un minimum compacts, le séchage en conditions naturelles n'atteint jamais cet optimum et de ce fait les forces croissent continuellement jusqu'à des tensions cohésives considérables.

Les forces électrostatiques sont également dépendantes de la teneur en eau, car plus les éléments cohésifs sont hydratés par un manteau d'hydratation constitué de molécules d'eau, plus ils sont éloignés les uns des autres. La portée des interactions électrostatiques étant faible, de fortes teneurs en eau réduisent de fait la cohésion électronique, et les mélanges secs sont favorables à de plus fortes cohésions, qui peuvent devenir bien plus

conséquentes que les forces capillaires à l'état sec pour les terres argileuses (Van Damme 2012). Cependant ces forces restent actives à saturation, contrairement aux forces capillaires.

La cohésion par cimentation est en première approche indépendante de la teneur en eau. Cependant, c'est par multiples répétitions d'épisodes d'hydratation-séchage que les ciments ioniques se réorganisent en pontages cimentaires (voir cimentation xxx). On peut donc supposer que dans une moindre mesure de fortes teneurs en eau réduisent la cimentation par dissolution ce qui réduit la cohésion cimentaire, en revanche s'il y a séchage alors le cycle de dissolution-reprécipitation sera *in fine* légèrement favorable à la cimentation. Les teneurs en eau nécessaires à ce phénomènes sont celles permettant le développement des être vivants actifs dans la cimentation, ou la circulation des ions entre les grains dissous (p. ex. morceaux de calcite) et les espaces de précipitation (p. ex. les contacts entre grains), donc suffisantes pour permettre une certaine continuité de la solution du sol. Cependant, puisque les fortes teneurs en eau réduisent significativement les autres cohésions, de trop grandes variations de saturation peuvent entraîner leur affaissement/glissement. Ce compromis est remarqué par Sun et al. (2022) dans la bio-précipitation calcique des sols loessiques (constitués de limons fins). On pense également aux éléments composés de terre crue dans un mur en place, qui ne peuvent subir de trop grandes variations de saturation. La saturation en eau permettant l'apport de cimentation, par effet biologique ou d'équilibre de dissolution, est donc limitée par la mécanique de la matière, et pourrait ne pas être effective ou être très lente dans les éléments composés de terre crue en vie de service.

Si l'on parcourt les teneurs en eau d'un état quasi-sec (conditions réalistes) 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.

5.5.2 composition des solides

Dans cette évolution, on peut résumer l'implication de la composition à :

- une participation de tous les éléments fins, y compris non colloïdaux à la cohésion capillaire, proportionnellement à leur surface spécifique ;

- une participation des éléments chargés seulement à la cohésion électrostatique, mais ceux-ci étant généralement fins ils participent également à la cohésion capillaire ;

- une participation uniquement des composés cimentaires (p. ex. carbonates ou matières organiques) aux forces de cimentation

A même compacité et homogénéité, les sols riches en argiles sont donc généralement plus cohésifs à tous les états hydriques que les sols grossiers. En revanche, les sols fins mais non argileux (« limons fins ») présentent de bonnes propriétés de cohésion capillaire aux états humides et secs, mais pas aux états saturés. Enfin, les sols carbonatés et certaines matières organiques n'apportent pas de cohésion tant que le mélange n'est pas au repos mais, dès le séchage, celle-ci peut devenir dominante dans les sols peu cohésifs (Smith & Austin 1989).

Remarquons que les forces de liaison internes des *granulats*, définies *a priori* par leur constitution principalement cristalline donc constituée de liaisons covalentes (voir xxx solides non colloidaux), peuvent également être dominées par des liaisons « faibles », par exemple dans le cas de granulats issus de roches sédimentaires « friables ». Il est d'ailleurs parfois difficile de les différencier des éléments cimentés (cf xxx cimentation). La cohésion interne des granulats peut donc également impacter les propriétés de cohésion d'une matrice composée de terre crue, lorsque son ordre de grandeur approche celle de la cohésion inter-agrégats.

5.5.3 Influence du remaniement, de l'homogénéité et de la compacité

La compacité impacte probablement positivement les trois composantes de la cohésion. Parce que cette variation est peu significative (Xu et al. 2021), il est difficile en revanche de savoir lesquelles sont les plus favorisées par des conditions compactes.

L'homogénéité et notamment la rupture des macroagrégats favorise le développement d'une matrice de contacts granulaires sans espaces de fragilité et avec elle la cohésion globale du mélange de terre par tout type de liaisons. De même, la rupture des microagrégats notamment argileux libère des éléments fins et peut permettre leur organisation en « liant intergranulaire » (voir Figure 36, Figure 37) et favoriser les forces cohésives. Dans le cas des argiles il s'agit uniquement de cohésion électrostatique et capillaire, mais cette structuration pourrait très bien également subir une cimentation.

Dans tous les cas, les phénomènes de compaction ou de remaniement par mélange favorisent la rupture de certaines des *liaisons cimentées* ou des *granulats solides.* Ainsi, dans le premier cas les remaniements ne bénéficient pas aux forces cimentaires comme aux autres forces cohésives immédiatement après remaniement. En revanche, à court ou long terme la cimentation peut être récupérée (voir xxx cimentation) et les remaniements peuvent *in fine* s'avérer positifs sur cette propriété. Dans le cas de la rupture des granulats, la distribution granulométrique est modifiée, ce qui peut avoir différents impacts selon la variation engendrée. Cependant de manière générale, on peut supposer que la rupture de granulats multiplie la surface de contact intergranulaire potentielle et favorise ainsi les mécanismes de cohésion. Une « compaction-broyage » de granulats fragiles favorise la compacité de la matrice (voir xxx compaction).

Dans l'ensemble, augmenter la compacité et l'homogénéité par remaniement semble favorable au développement des forces cohésives, sauf à court terme pour les mélanges dont la cohésion est dominée par la cimentation qui perdent alors toute cohésion et ne la retrouveront qu'après récupération de liaisons cimentaires.

La connaissance de l'abondance relative d'argile granulométriques dans une terre n'est pas suffisante pour représenter sa cohésion car elle ne représente pas la réalité

minéralogique (Meimaroglou & Mouzakis 2019). Par exemple, plus la surface spécifique d'une argile est élevée, moins grande sera la quantité de passant argileux nécessaire pour atteindre un seuil de cohésion donné (Hamard et al. 2018). Alors que Skempton (1984) définit l'activité par le quotient de l'indice de plasticité par le pourcentage massique de la classe 0-2 µm dans la terre fine, selon Vinceslas (2019), et dans le présent mémoire, nous considérerons l'argilosité comme l'action conjuguée de la surface spécifique développée par les argiles ainsi que par leur charge électrique, traduisant à la fois la quantité et le type d'argile dans une terre (Meimaroglou & Mouzakis 2019).

Ces deux types d'interactions électroniques (cohésion élec et succion) varient en fonction du type d'argile, il est donc difficile d'estimer les capacités cohésives d'une terre à l'état sec par la seule classe granulométrique 0-2 µm (Curtin & Smillie 1976; Weil & Brady 2016)

6 Propriétés dynamiques : réponse aux contraintes

6.1 Résistances mécaniques

Les propriété de résistance mécanique des sols sont étudiées avec attention dans toutes les sciences du sol. Leur prédiction ou explication par la composition ou organisation des matrices composées de terre crue est une activité qui mobilise une grande partie de l'effort de recherche consacré à ce matériau. Comme dans les paragraphes précédents de ce chapitre, nous cherchons ici à synthétiser les mécanismes de réponse des mélanges de terre crue aux principales contraintes-type qu'ils peuvent subir dans les procédés de construction selon leurs propriétés de composition solide et de saturation en eau.

6.1.1 Contraintes et réponses-types

La réponse d'un matériau composé de terre crue à une contrainte mécanique dépend :

- de la forme de la contrainte : pression, énergie, angle

- des dimensions de l'élément de matériau et de ses interfaces éventuelles avec d'autres matériaux, c'est-à-dire son *confinement*

- des propriétés de composition et d'organisation du matériau.

6.1.1.1 Réponses types : élastique, ductile, cassant

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. Nous prenons ici l'exemple d'un élément composé de terre crue de taille finie et non confiné, auquel on applique une augmentation d'une contrainte de compression. Dans ce type de contrainte, on observe souvent un enchaînement de plusieurs comportements-types, comme sur la figure xxx : élastique, plastique, cassant.

[figure XXX : extrait de thèse Julia, courbe avec trois comportements délimités?]

Le premier comportement rencontré est généralement un comportement *élastique*. Il est défini par le retour du matériau à sa forme initiale après le retrait de la force.

Le comportement *ductile* plus ou moins conséquent qui s'ensuit 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 fig xxx, 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*.

En pratique, la plupart des matériaux répondent aux contraintes mécaniques par des comportements hybrides entre ces trois types, et/ou successivement selon l'intensité de la force appliquée[29].

Par exemple, les comportements élastiques et ductiles peuvent se superposer, et 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 ». On parle alors de comportement élasto-plastique. Les comportements ductiles et cassants peuvent également se superposer dans des déplacements par « à-coups », qui peuvent être liés à l'hétérogénéité du matériau (fibres, gros éléments, agrégats, etc.).

6.1.1.2 Plans de rupture, dimensions des éléments et confinement

[XXX il faudra faire ou reprendre des schémas, et ajouter des références… Je ne sais pas ou trouver de la doc la dessus. Andry?]

Le comportement plastique est issu du glissement des éléments les uns contre les autres dans la matière. Ce glissement peut être d'échelle élémentaire, grain contre grain, ou d'échelle « matricielle » *via* l'apparition de *plans de rupture* de dimensions variables qui sont des plans le long desquelles les grains de chaque face glissent simultanément et plus ou moins sans contacts avec l'autre face. Ces plans sont également appelés *plans de cisaillement*, car les plans de rupture apparaissent lorsque la contrainte est un minimum *cisaillante*.

Selon les conditions de compression, ces plans peuvent être amenés à se prolonger ou s'ouvrir, ou à se refermer spontanément sous la contrainte ou par l'attraction relative des éléments solides des deux faces. Notamment, si les grains sont très hydratés, leur distance d'attraction capillaire est plus forte (Gögelein et al. 2010) (voir capillarité XXX), ce qui peut expliquer que les mélanges plus hydratés se fissurent moins : les plans se referment plus spontanément.

Un *plan de rupture* ou *fracturation* peut donc être défini par une surface (plus ou moins plane) le long de laquelle il n'y a plus de contacts entre les solides du matériau. Les matériaux granulaire étant composés de tailles et de formes d'éléments variables, la notion de « continuité » du plan de rupture pourrait être soumise aux même

29 Pour un exemple commenté de comportement d'un matériau terre crue sec en résistance en compression, voir Kouakou et Morel, 2009, p. 15,« 6. Deformation properties of adobe and PABs ».

questionnements que pour l'échelle de la *matrice homogène* (voir xxx homogénéité). Le long d'un plan de rupture, il n'y a pas de contacts entre les deux faces, donc pas de frottements : ainsi le matériau se déforme sans effort le long du plan. La résistance au cours de l'état *ductile* peut être comprise comme la résistance en cisaillement le long du plan « le plus fracturé » du matériau, présentant un équilibre entre des plans de rupture et des discontinuités non rompues les séparant, qui ont pour effet de maintenir une cohésion.

L'arrivée du comportement cassant intervient lorsque des plans de rupture sont de plus en plus continus jusqu'à traverser l'élément sous contrainte (Barnes 2013b). La résistance décroît alors car peu de liaisons subsistent et s'opposent à la force appliquée. Au cours de la contrainte, tant que les plans de rupture formés se referment, le comportement ductile continue. Le passage d'un comportement ductile à cassant dépend donc de l'équilibre entre ouverture et fermeture des plans de rupture (Barnes 2013b). On parle de *propagation* des plans de rupture car c'est par extension de zones de ruptures existantes ou par leur agrégation que les plans se prolongent à travers l'échantillon, passant de microfissures en macrofissures.

Par conséquent, le comportement cassant n'est observé que pour des éléments finis *non confinés*. En théorie, pour un milieu continu, les plans de cisaillement pourraient s'étendre de manière infinie sans jamais traverser l'élément. Ainsi, la résistance ne pourrait que croître par augmentation de la compacité, le long d'un état ductile continu. De même, pour des éléments confinés dans des matériaux plus résistants, si les plans de cisaillement venaient à traverser l'élément la rupture dépendrait de leur prolongement de la déformation dans le matériau confinant. Les dimensions des éléments non confinés impacteront donc la dimension que les plans de rupture doivent atteindre pour les traverser, et ainsi l'intensité de la déformation qu'ils subiront avant rupture.

D'autre part, la variation de *compacité* que peut entraîner une contrainte mécanique est également dépendante du confinement de l'échantillon. Cette fois-ci, c'est la porosité du milieu environnant à l'eau et à l'air qui permet la *compaction* ou la *consolidation* (voir changements proportions volumiques xxx). L'eau étant incompressible, un mélange saturé d'eau (voir saturation xxx) ne peut gagner en compacité globale que par évacuation d'une partie de la phase aqueuse (voir consolidation xxx). Un confinement dans une matrice infinie subissant la même contrainte ne permet pas son évacuation : par exemple, compacter de la terre saturée en eau dans un coffrage n'a aucun effet sur la compacité. Seul un confinement poreux à l'eau permet d'augmenter la compacité, ce qu'on appelle *consolidation* (voir xxx consolidation), mais l'évacuation de l'eau dépend alors de la perméabilité du mélange (voir Perméabilité). L'air étant compressible, un milieu continu n'empêche pas toute compaction mais la compaction ne pourra être totale sans évacuation de l'air, avec ainsi les mêmes considérations que pour l'eau quoique bien moindres car l'air est plus fluide que l'eau et s'échappe plus aisément par une porosité fine.

6.1.1.3 Forme de la contrainte : direction

[cette partie manque de références à mon avis. Avez-vous des recommandations?]

Ce qu'on appellera ici la *direction* de la contrainte appliquée à un élément fini composé de terre crue est la direction du déplacement relatif qu'induit cette contrainte entre deux

parties de l'élément. Une contrainte est *compressive* si les deux éléments auxquels on applique la force son rapprochés, ou généralement, que la contrainte a pour tendance la réduction de la taille de élément (CCTC 2018; Pelé-Peltier 2023).

Une contrainte est réalisée en *extension* ou *traction* lorsque deux parties sont écartées, ce qui correspondrait à l'« agrandissement » du volume que l'élément occupe (CCTC 2018).

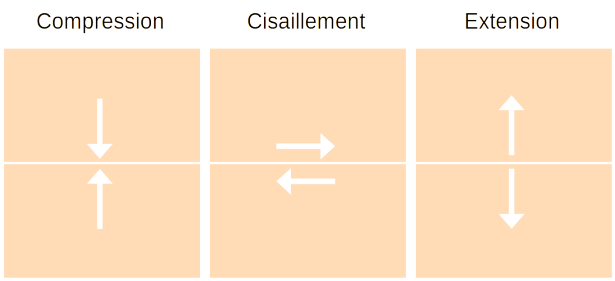


Figure 45 : direction des contraintes appliquées à une matrice composée de terre crue

On parle de cisaillement pur lorsque les deux parties subissent un déplacement relatif en « glissement », sans éloignement ni rapprochement. Plus généralement, on parlera de contrainte cisaillante lorsque les directions ne sont pas uniquement compressives ou extensives mais qu'elles impliquent une composante de déplacement perpendiculaire (orthogonale).

Dans des contraintes s'appliquant localement sur un élément de grande taille, les surfaces cisaillées peuvent prendre des formes plus complexes. Par exemple, le poinçonnement est l'application d'une force sur une petite surface d'un élément plus grand ou infini : à l'application d'une contrainte compressive la matière se déplace d'abord parallèlement à la force, puis perpendiculairement, et peut ensuite remonter le long du poinçon. Il en résulte des plans de cisaillement complexes dont l'étude dépasse le cadre de ce travail, mais dont on pourra observer les effets dans l'application de contraintes poinçonnantes dans les procédés (xxx ouvrabilités/poinçonnement - mélange pied).

Lorsque la contrainte s'applique à un élément fini, les plans de rupture se prolongent spontanément dans la direction libérant le plus d'énergie. Dans les éléments composés de terre crue testés en résistance en compression non confinée, on observe des angles de plans de cisaillement souvent proches des 30 à 45°, en « X », ou plutôt en « sablier » dans une observation en 3D. La contrainte est purement compressive, mais les éléments qui se séparent se déplacent en partie perpendiculairement les uns des autres le long des plans de cisaillement : la contrainte compressive est alors transformée en contrainte cisaillante dans les plans de rupture principaux.

[image rupture échantillon. Thèse Julia ?]

Difficile donc, en pratique de prédire l'implication de la direction des contraintes sur les déformations, qui dépendra des dimensions des éléments contraints, de son intensité, des propriétés du matériau et de son environnement (confinement notamment). Cependant, une compréhension de la typologie des contraintes par leur répartition compression/cisaillement/traction permet de mieux comprendre les forces de résistance et la réponse aux contraintes dans les procédés de mise en œuvre de la terre crue.

6.1.1.4 Forme de la contrainte : pression et énergie

Les contraintes que subissent les mélanges de terre crue sont composées de deux mesures d'intensité de résistance : la pression et l'énergie de déformation.

La *pression*, mesurée en Pascals (Pa = N/m²) est une force (Newtons) par unité de surface (m²). 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/m³).

L'énergie de déformation cumulée est l'ensemble de l'énergie appliquée par 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 en poinçonnant longtemps mais à faible pression, ou en poinçonnant fortement mais moins longtemps.

Sur un graphique contrainte/déformation (*stress/strain*), la force (*stress*) est l'intensité de la contrainte. Une fois la force 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) y augmente rapidement et les éléments se séparent (rupture).

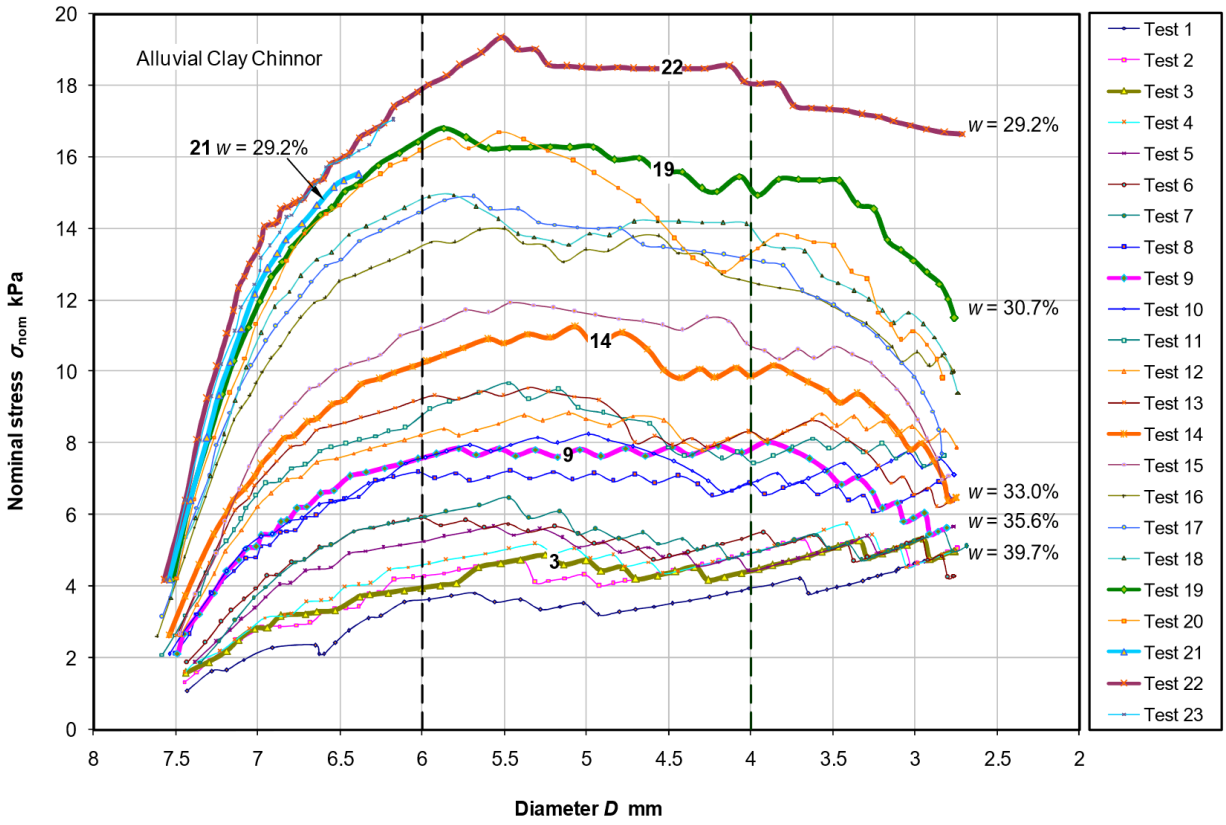


Figure 46: Courbes de réponse contrainte/déformation d'une argile en fonction de la teneur en eau. L'aire sous la courbe correspond à l'énergie cumulée pour la déformation : plus la teneur en eau augmente, plus l'argile est ferme et l'énergie nécessaire par volume déformé est importante (Barnes 2013b:195)

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 d'une la courbe de déformation type « contrainte-déformation » (Figure 46), soit la « surface sous la courbe ».

6.1.1.5 Résistances

Résistance (mécanique): Aptitude d'un matériau ou d'un élément à s'opposer à une contrainte.

Résistance à la rupture : Résistance à la contrainte maximum qu'un matériau ou un élément d'ouvrage est capable de supporter juste avant sa rupture. (CCTC 2018)

La force minimale nécessaire pour dépasser le comportement *élastique* et entamer un comportement *ductile* (ou cassant) est le *seuil de cisaillement* d'un mélange. Dans un milieu saturé en eau comme une barbotine, dès lors que le seuil de cisaillement est atteint, le maintien de la force induit une déformation continue : le

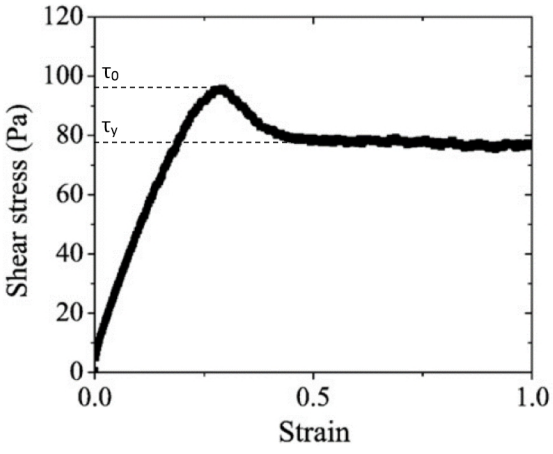


Figure 47: Courbe type contrainte/déformation d'un essai au rhéomètre. t_0 est le seuil de cisaillement, t_y est la résistance en cisaillement une fois le mouvement initié. Celle-ci est inférieure à la résistance au cisaillement mais reste ensuite constante (Mahaut et al. 2008)

comportement est purement *ductile* (Figure 47)[30]. Dans ces cas, le maintien d'une pression de déformation continue implique une transmission d'énergie de déformation constante. L'énergie nécessaire est dépendante de sa dissipation par frottements. Par exemple, un mélange saturé plus compact (p. ex. avec moins d'eau) engendrera plus de frottements qu'un mélange moins compact (plus dilué) donc d'une part, le seuil de cisaillement sera plus élevé (Vinceslas 2019), d'autre part le maintien d'un cisaillement constant sera plus énergivore.

On a vu cependant que dans les échantillons de terre crue ferme testés en compression, la force nécessaire à la prolongation de la déformation dans le comportement plastique implique une augmentation de la pression de contrainte, car la compacité augmente et avec elle, entre autres, la friction, donc la résistance. Dans ces cas, le seuil de cisaillement pourrait être identifié par le au début du comportement ductile. Celui-ci caractériserait le début du mouvement de compaction. En revanche, l'énergie de déformation ne serait pas directement proportionnelle au seuil initial, mais devrait être intégrée sur l'ensemble du mouvement de résistance donc d'énergie nécessaire croissante. Pour que le seuil de cisaillement soit directement proportionnel à l'énergie de déformation, la contrainte doit être un cisaillement pur, comme c'est le cas pour les barbotines.

La *résistance en compression non confinée*, souvent appelée résistance en compression, est observée lors d'une contrainte de compression non confinée sur un élément fini. Lorsque celui-ci montre un comportement cassant, la résistance en compression est la pression atteinte. On l'identifie généralement au maximum de la courbe contrainte-déformation lorsque les comportements ductiles et cassants sont bien séparés. La résistance en compression implique les forces de *cohésion* et de *friction*, ainsi que les conditions de *compaction* ou *consolidation* au cours de la contrainte (voir resp. xxx, xxx, xxx et xxx).

La *résistance en traction* est observée au cours d'une contrainte en traction pure sur un élément fini. C'est également un pic de résistance qui est considéré comme le seuil de résistance. L'essai de résistance en traction est le plus souvent réalisée en flexion, car la flexion implique principalement des mouvements de traction. Elle dépend quasi-exclusivement des forces de cohésion et est souvent appelée *cohésion apparente*.

[schéma?]

Le *module d'élasticité* est la relation entre la force appliquée au matériau et sa déformation purement élastique. Il correspond à la *rigidité* du matériau (Bui 2008). Cette propriété dépend de forces cohésives et de friction (Bui 2008). Elle est importante relativement aux contraintes d'usage final des éléments composés de terre crue, notamment leur résistance au séismes (Fabbri et al. 2022), cependant les propriétés d'élasticité ne seront pas traitées plus en détail dans ce travail.

Enfin, la *fermeté* est l'énergie nécessaire par volume déformé au sein d'un comportement ductile (en J/m³). Elle 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.

30 A l'exception des mélanges dits *thixotropes*, dont le seuil de cisaillement varie selon le temps de repos du mélange (Vinceslas 2019), de la même manière que les phénomènes de cimentation (voir xxx cimentation) mais à plus court terme. Ainsi, la résistance en cisaillement décroît dans un premier temps au cours de la contrainte avant de se stabiliser. Les barbotines peuvent avoir ce comportement.

2023)), mais ce terme étant également celui d'une *consistance* (voir xxx consistances), nous emploierons celui de fermeté. L'inverse de la fermeté est la *fluidité*.

Notons que puisque la fermeté dépend des frottements qui dissipent l'énergie, en théorie l'énergie consommée par unité de volume déformé est plus importante lorsque le mouvement est plus rapide. C'est pourquoi, la fermeté doit être comparée pour des mouvements de vitesse équivalente, ou très lents. C'est le cas dans les essais en compression non confinée, où l'augmentation de la force appliquée est la plus lente possible afin que la réponse du matériau soit stable avant une nouvelle incrémentation de force. C'est également le cas dans la mesure de la résistance au cisaillement des barbotines, car l'objectif est d'observer leur cohésion une fois au repos et non en cours d'écoulement (Vinceslas 2019).

6.1.2 Résistance en cisaillement

Dans cette partie, nous nous concentrerons sur les propriétés des mélanges de terre crue impactant leur *seuil de cisaillement*, en contexte compressif ou extensif.

On considérera dans un premier temps les propriétés des mélanges de terre crue *homogènes*, c'est à dire dont les éléments sont distribués aléatoirement (voir homogénéité xxx), avant de discuter l'impact de l'homogénéité sur les propriétés de résistance. Pour les mélanges saturés particulièrement, il s'agit des propriétés en cours de mélange, avant tout phénomène de sédimentation/ressuyage (voir sédimentation xxx). Par exemple, le seuil de cisaillement des barbotines est généralement mesuré immédiatement après une agitation intense (Vinceslas 2019).

6.1.2.1 Direction de contrainte : friction et cohésion

Les contraintes appliquées à un mélange de terre crue mobilisent différents mécanismes de résistances selon la direction de la contrainte. Les deux mécanismes principaux sont la *friction* (voir xxx friction) et la *cohésion* (voir xxx cohésion) (Weil & Brady 2016; Van Damme & Houben 2018). Lorsque la contrainte est *extensive*, aucune pression ne maintient les granulats du sol en contact. Dans ce cas, en considérant des éléments sphériques, les forces de friction seraient nulles, seules subsisteraient les forces cohésives.

Les forces cohésives sont peu impactées directement par la direction de la contrainte. La réorganisation des composants peut cependant avoir lieu le long des *plans de cisaillement.* Par exemple, il est possible que les argiles s'arrangent parallèlement aux plans de cisaillement (Coventry 2004) ce qui favorise leur cohésion/friction interfoliaire (voir xxx argiles?) et donc la cohésion/friction au niveau du plan de cisaillement.

Les fibres longues ou les éléments minéraux élancés, même non cohésifs, peuvent participer à un maintien des forces de friction en contrainte extensive par leur « intrication » de par et d'autre du plan de fissuration/cisaillement. Dans ce cas, on peut considérer que le plan de cisaillement est déformé et « contourne » la forme de ces éléments : une contrainte initialement extensive se complexifie dans des plans cisaillants voir compressifs, faisant intervenir des forces de friction.

De manière générale, plus la contrainte est compressive, plus les forces de frictions sont conséquentes, tandis que les forces cohésives sont peu impactées par la direction des contraintes.

Cependant, les contraintes compressives s'accompagnant généralement d'une compaction, la friction et la cohésion peuvent être renforcées par l'augmentation de la compacité (voir impact compacité plus loin xxx).

Les seuils de résistance en compression, cisaillement et traction son donc définies par l'intensité des forces de friction et cohésion. Plus la direction sera compressive, plus la friction sera forte, mais la cohésion restera relativement constante. Il en va de même pour les énergies de cisaillement, car plus la direction sera compressive, plus les forces de friction dissiperont l'énergie du mouvement appliquée.

6.1.2.2 L'impact de la teneur en eau à l'état insaturé et fonction de la saturation de la porosité

A l'état insaturé, c'est à dire lorsque la porosité contient de l'eau et de l'air, l'impact de la teneur en eau est fonction de la *saturation* de la porosité par l'eau (voir xxx saturation). Dans des conditions hygrométriques réalistes, et pour les sols un minimum cohésifs et compactés, plus la saturation est faible, plus les forces capillaires sont fortes, ce qui explique la relation décroissante communément observée entre teneur en eau massique

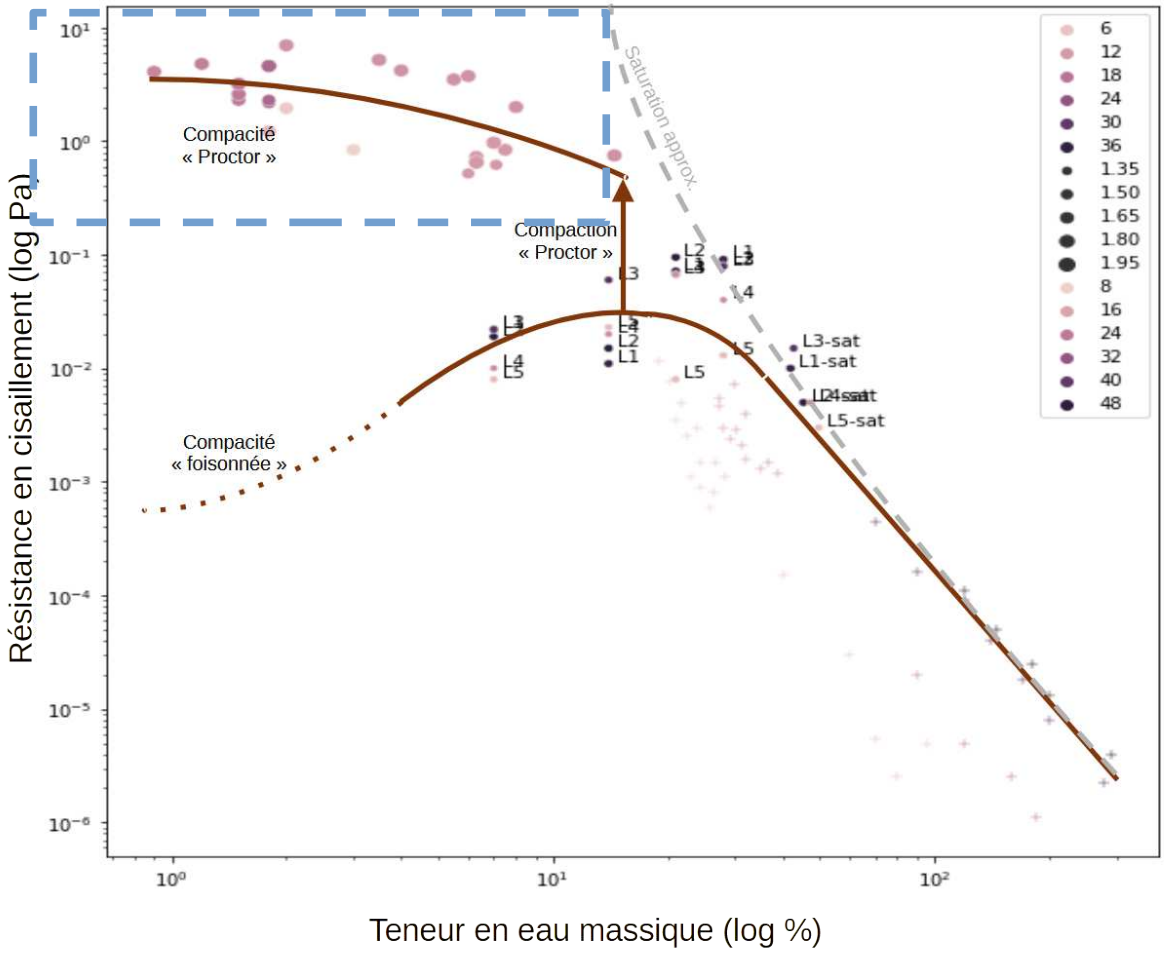


Figure 48 : [XXX Note : je découperai la zone concernée, il faudra revoir cette figure] Evolution de résistance mécanique en compression d'échantillons de pisé selon leur teneur en eau massique. Les données [uniquement celles du cadre XXX] sont agrégées de de plusieurs articles, rassemblées dans (Fabbri et al. 2022). Les deux axes sont en échelles log.

et résistance mécanique (Fabbri et al. 2022; Pelé-Peltier 2023; Meimaroglou & Mouzakis 2024) (voir cohésion capillaire XXX). La cohésion entre les éléments solides en contact augmente donc fortement avec la réduction de la saturation.

Par ailleurs, la baisse de la saturation en eau permet le rapprochement des éléments électrostatiquement chargés par la réduction des manteaux d'hydratation à la surface des solides. Cela entraîne : 1) un renforcement des forces électrostatiques, notamment dans les espaces interfoliaires des argiles ; 2) un renforcement des contacts directs entre solides, favorisant la friction.

Ainsi, la friction et surtout la cohésion augmentent considérablement lorsque la saturation décroît dans les mélanges argileux compacts, résultant en une augmentation des résistances compressives ou extensives (Coventry 2004; Cuccurullo et al. 2021). La relation entre la teneur en eau et la résistance mécanique en compression d'échantillons compactés est identifiée comme augmentant de manière exponentielle avec la baisse de la teneur en eau. Pour une même terre, ayant subi un même procédé (notamment de compaction), la relation est très bonne et l'interpolation entre deux teneurs en eau connues est possible. En revanche, une relation développée pour une terre et un procédé ne peut pas être appliquée en dehors de ces conditions (Fabbri et al. 2022): la variation est forte entre différentes terres et différentes compacités. Sur la Figure 48, les échantillons sont issues de terres différentes, ce qui explique la dispersion des valeurs.

Cependant, si la réduction de teneur en eau se fait à compacité globale identique, par exemple sans variation des dimensions d'un élément, le rapprochement local des solides réduit la microporosité locale mais entraîne par conséquent la création de macroporosité dans les espaces entre les groupes d'éléments solides. Cela favorise l'apparition d'un état agrégé (voir plus loin xxx homogénéité/agrégation, voir xxx fissuration), qui peut finalement réduire la résistance en cisaillement à l'échelle macroscopique entre les agrégats (voir la Figure 65). L'impact de ce *retrait au séchage* varie donc selon la compacité et l'agrégation du mélange.

6.1.2.3 L'impact de la teneur en eau à l'état saturé est fonction de la compacité

Au delà de la saturation en eau, il n'y a plus de forces de cohésion capillaire. Toute augmentation de la teneur en eau a pour conséquence une variation de la compacité. Cette trajectoire est visible le long du côté « saturé » du diagramme volumique (Figure 49). C'est donc à travers cette variation de compacité que se joue la variation de friction et de cohésion.

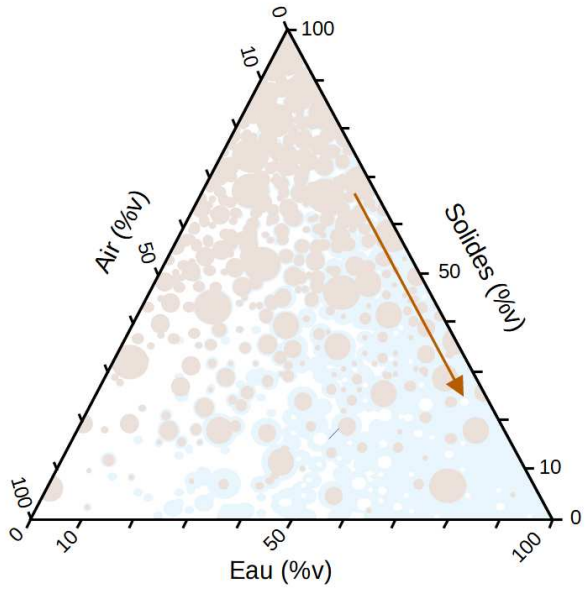


Figure 49 : A saturation, toute augmentation de la teneur en eau équivaut à une réduction de compacité (teneur en solides)

L'augmentation de la teneur en eau éloignant les éléments solides, la résistance en cisaillement

par friction et cohésion électrostatique est généralement considérée comme décroissante de manière logarithmique (Nguyen et al. 2018; Bolleni 2019; Vinceslas 2019). La Figure 50 montre la quasi-linéarité de la relation entre la teneur en eau et la résistance en cisaillement lorsque les données sont projetées sur des axes logarithmiques. Selon la composition des terres, la relation est semblable mais pour une même teneur en eau, les mélanges les plus cohésifs sont plus résistants.

Cependant, les travaux de Barnes (2013a) suggèrent que cette relation est plus complexe et comporte différentes régions successives de réponse à l'augmentation de la teneur en eau, aux comportements bien distincts (voir etats hydriques plasticité toughness, barnes

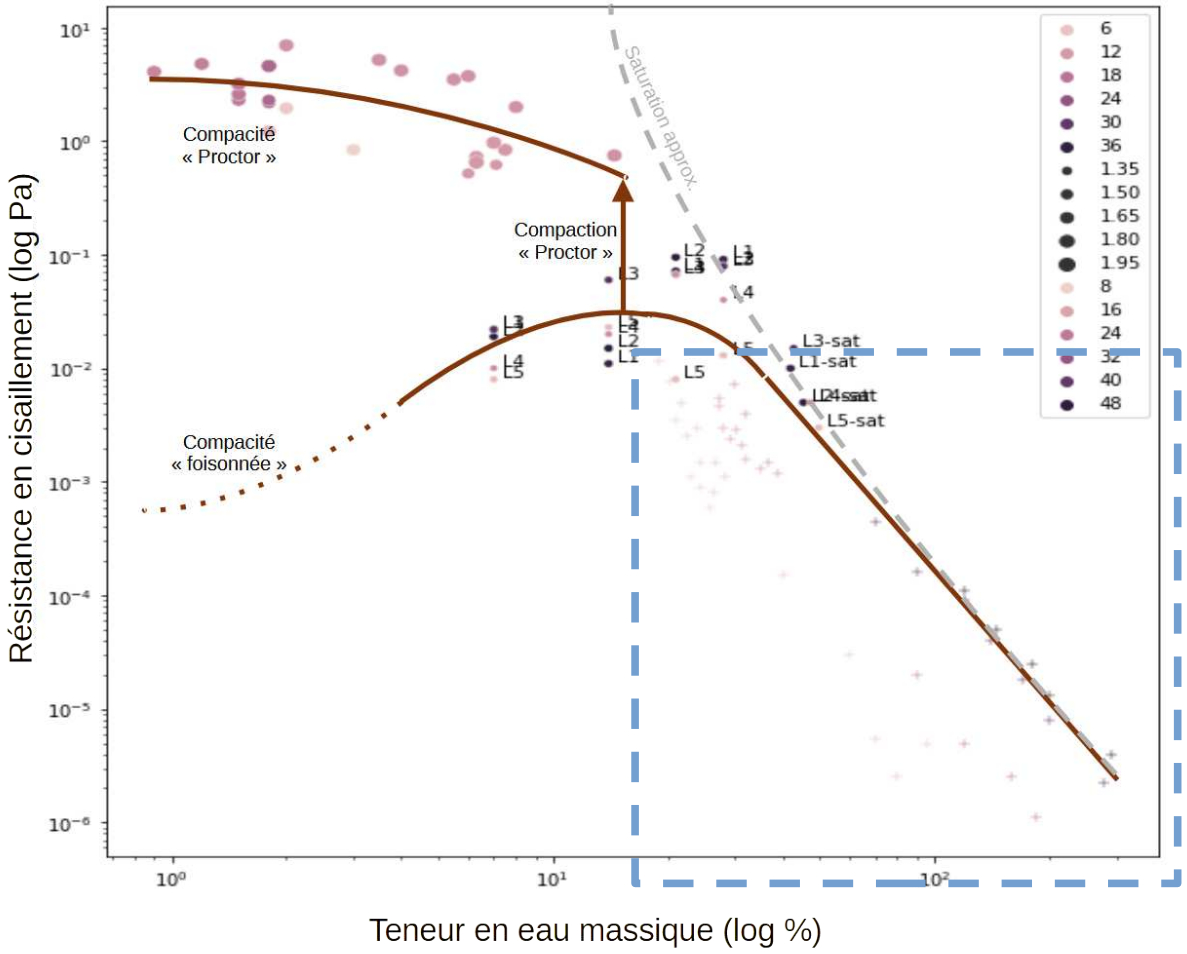


Figure 50 : [XXX Note : je découperai la zone concernée, il faudra revoir cette figure] Evolution du seuil de cisaillement de mélanges composés de terre crue selon leur teneur en eau massique. Les données [uniquement celles du cadre XXX] sont issues de Vinceslas (2019) et Ji et al. (2023). Les deux axes sont en échelles log [log MPa et non log Pa, axe a revoir] .

xxx). Barnes travaille sur la fermeté des mélanges argileux, mais à l'état saturé, le seuil de cisaillement d'un mélange est proportionnel à sa fermeté, ce qui permet des équivalences (voir XXX fermeté un peu plus loin).

6.1.2.4 La transition saturé-insaturé

Lorsque la teneur en eau baisse depuis un état saturé, la compacité des solides n'augmente pas continuellement. Selon les contraintes appliquées, à partir d'une certaine compacité, le comportement devient « frottant » (Vinceslas 2019). Lors d'une contrainte mécanique apparaissent alors des plans de cisaillement qui éloignent les grains. Cet éloignement favorise la pénétration d'air dans la porosité créée. L'air ainsi intégré au mélange apporte progressivement de la cohésion capillaire qui maintient d'autant plus une structure « aérée » et favorise également le développement de l'agrégation/fissuration. A partir du point de désaturation, l'augmentation de la résistance en cisaillement ne suit donc plus la loi exponentielle de l'état saturé (Vinceslas 2019) et dans un procédé de mélange continu, la porosité augmente spontanément avec la baisse de la teneur en eau (Kouakou & Morel 2009). Dans un mélange auquel aucune contrainte de compaction n'est appliquée, dans un premier temps, la compacité augmente de moins en moins, puis décroît avec l'apparition de macroporosités liées à un état agrégé.

La compacité (ou teneur en eau volumique) à laquelle la désaturation a lieu spontanément dépend des contraintes appliquées (voir agrégation/fissuration xxx). Cependant, la teneur en eau d'apparition de ce comportement est d'autant plus grande que les forces de cohésion et de friction sont intenses.

6.1.2.5 Compacité

Lorsque la compacité augmente les contacts entre éléments solides augmentent. En mélange saturé ou insaturé, pour une même saturation en eau, une plus forte compacité participe à l'établissement de forces électrostatiques et surtout de friction. En mélange insaturé, les forces de cohésion capillaires sont également favorisées par une plus grande compacité. Ainsi, la compacité favorise les résistances mécaniques des mélanges composés de terre crue, ce qui explique notamment les fortes corrélations entre la densité des éléments composés de terre crue et leur résistances mécaniques en compression à l'état sec (Erreur : source de la référence non trouvée) (Bui 2008; Morel & Kouakou 2009; Gomes et al. 2014; Fabbri et al. 2022; Pelé-Peltier 2023).

Cependant, en milieu insaturé, lorsque la compacité augmente dans les procédés de compaction, c'est généralement l'air qui est évacué et ainsi la saturation de la porosité par l'eau augmente. Or, la saturation réduit les forces de cohésion, capillaires notamment. On peut se demander si la perte de cohésion par saturation est supérieure au gain de friction par compaction (voir xxx compromis compacité/succion). Nous supposons que si le mélange est proche de la saturation, la perte de résistance entraînée par la perte de cohésion capillaire domine. Si le mélange est peu saturé, la compaction impacte principalement la macroporosité, qui ne participe pas à la cohésion capillaire à de faibles teneurs en eau : c'est l'augmentation de la résistance par augmentation de friction qui domine.

L'impact de la compacité globale est cependant dépendant de son organisation à plus petite échelle, l'agrégation.

6.1.2.6 Homogénéité/agrégation

Les propriétés décrites précédemment considèrent des matrices homogènes, c'est à dire où les composants solides sont distribués aléatoirement (voir xxx homogénéité). Cependant, dans les mélanges composés de terre crue des procédés de réorganisation spontanés sont à l'oeuvre au cours des contraintes physiques ou chimiques.

A l'état insaturé, on parle d'agrégation lorsqu'il existe des zones de plus forte compacité (les agrégats) séparées par des zones ou la porosité est plus importante (les fissures ou macropores). En milieu insaturé, les forces de cohésion augmentent dans les zones de contact entre les éléments solides et augmente la résistance des agrégats les plus denses, tandis que les zones les moins denses perdent fortement en cohésion. C'est pourquoi une terre cohésive sèche mélangée à faibles teneurs en eau s'homogénéise mal : les forces de cisaillement appliquées au mélange provoquent des ruptures dans la porosité inter-agrégats sans rompre les agrégats eux-mêmes, fortement cohésifs. On a donc un mélange de terre dont le comportement mécanique est semblable à un mélange d'éléments grossiers de même taille que les agrégats : c'est la friction/cohésion entre les macro-agrégats qui gouverne le comportement.

La forme des contraintes, et a priori leur direction, en augmentant ou réduisant la compacité, favorise la destruction ou la création des agrégats et de la macroporosité. Les contraintes compressives forcent la déformation ou la rupture des agrégats, ce qui, à travers l'augmentation de la compacité, rétablit le contact entre les solides et favorise la friction et les résistances mécaniques. A l'inverse les contraintes de friction peu compressives peuvent participer à augmenter la compacité interne des agrégats en les « roulant » les uns contre les autres.

A l'état saturé, on parle de floculation. L'effet est de moindre ampleur que l'agrégation car la capillarité ne participe plus à la cohésion, mais la cohésion électrostatique favorise l'apparition spontanée et le maintien de « flocons » d'éléments chargés comme les feuillets argileux. Dans un milieu très peu dense par une forte teneur en eau comme c'est le cas des barbotines, les feuillets argileux peuvent adopter des arrangements variés sous forme d'*agrégats argileux* ou non, qui peuvent floculer ensemble ou rester *dispersés* (Figure 51).

La différence entre l'agrégation et la floculation est peu marquée mais se situe probablement dans une intensité cohésive entre les éléments, ou de la présence d'air dans la porosité.

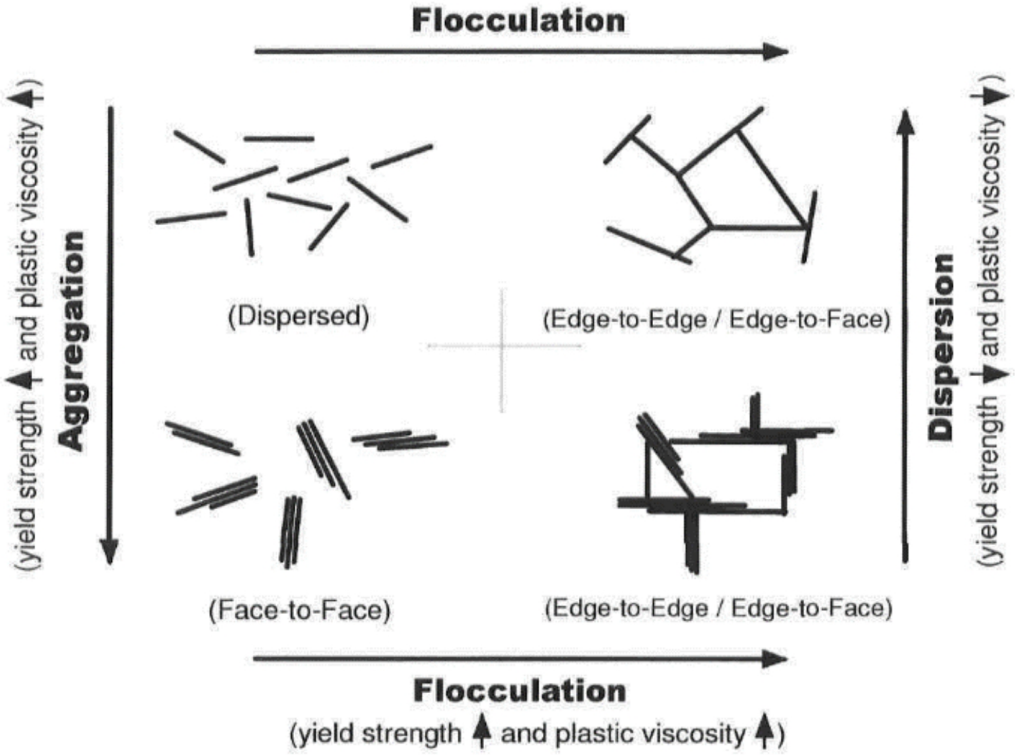


Figure 51: Organisations-types d'une suspension de feuillets argileux et impact sur leurs propriétés mécaniques (Jeong et al. 2006), dans (Bolleni 2019:15)

6.1.2.7 Limite saturation/désaturation et limite de comportement ductile/cassant

Ainsi, les agrégations spontanées des mélanges de terre crue favorisent les résistances mécaniques internes des agrégats via l'augmentation de cohésion, mais peuvent réduire les résistances mécaniques à l'échelle du mélange par réduction de cohésion inter-agrégats : lors des contraintes, c'est *via* la macroporosité que se propagent les plans de rupture (Barnes 2013b).

Un mélange de terre crue non compacté, « brassé » intensément par mélange et après un court repos (les agrégats éventuellement soulevés retombent mais la sédimentation n'est pas significative), peut être appelé *mélange foisonné* (voir xxx stabilité). Dans un tel mélange, si l'on baisse la teneur en eau, on observe d'abord l'apparition du comportement agrégé/fissuré après l'entrée d'air dans le mélange. A partir du point d'entrée d'air, l'augmentation des résistances mécaniques n'est plus exponentielle et ralentie. Puis, dans un second temps, une baisse des résistances est observée : la fissuration et l'agrégation spontanée prennent de l'importance et le prolongement des plans de cisaillement est rapide à travers les matrices. Dans des mélanges peu humides, on peut atteindre des états d'agrégation où les agrégats ne sont plus cohésifs entre eux et frottent simplement comme des éléments solides d'un mélange sableux (voir aussi la Figure 59 et ses commentaires, pour la *fermeté*).

Pour des compacités faibles, « foisonnées », l'augmentation de la cohésion qui rapprochait les grains et favorisait la résistance en cisaillement, désormais réduit cette résistance. Il y a donc un « pic » de résistances mécaniques en cisaillement qui se situe au niveau de la transition saturé-insaturé. C'est également à ce niveau que s'effectue la transition de réponses aux contraintes de réponse *ductile* vers des réponses *cassantes* pour les élément composés de terre crue : on passe d'un mode de glissement grains contre grains dans une matrice homogène à un déplacement par ruptures le long de plans de cisaillement continus. Cette *transition ductile-cassant (Barnes 2013b)* est appelée plus communément *limite de plasticité* par l'emploi de la terminologie d'une de ses méthodes

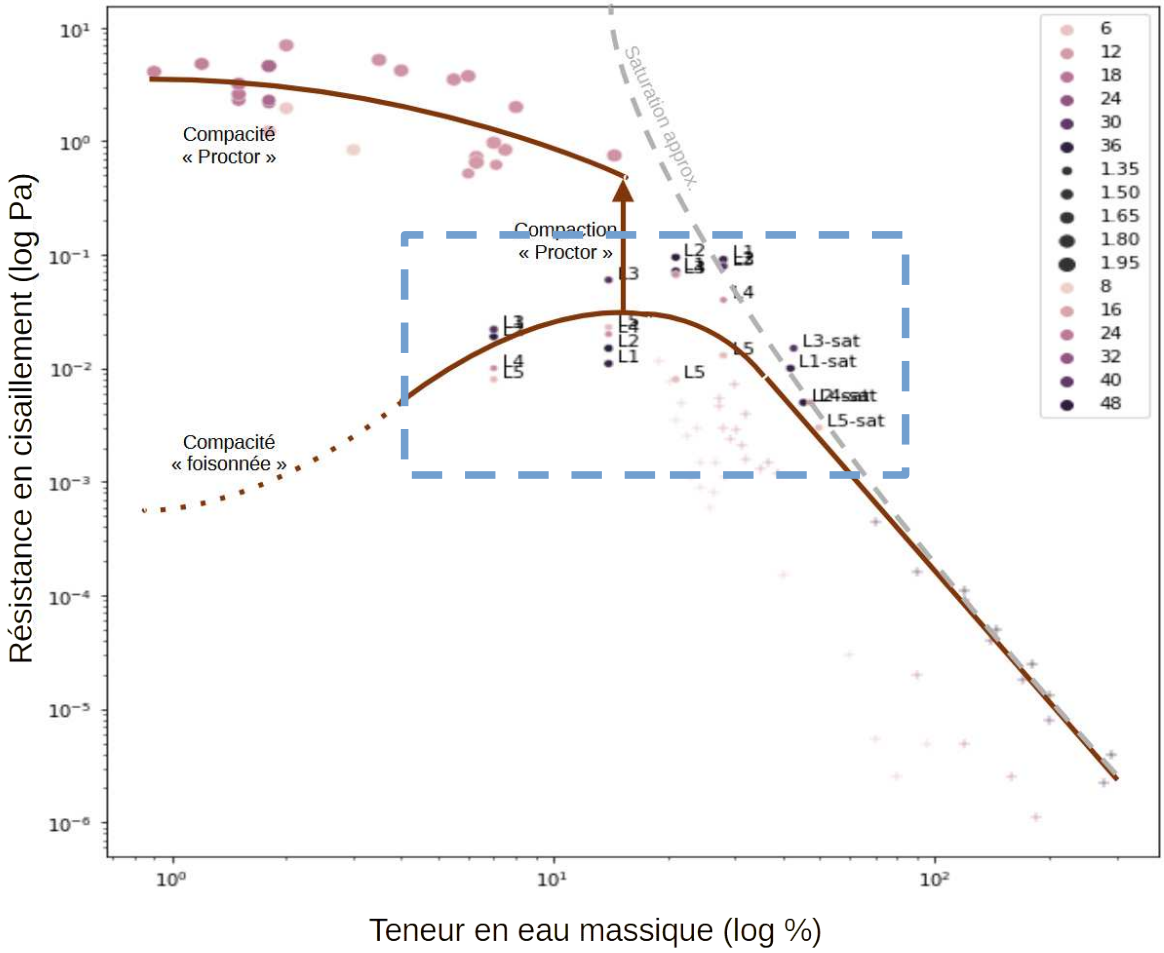


Figure 52 : [XXX Note : je découperai la zone concernée, il faudra revoir cette figure] Evolution du seuil de cisaillement de 5 horizons de sols agricoles non remélangés selon leur teneur en eau massique. Les données [uniquement celles du cadre XXX] sont issues de (Ekwue 1990). Les deux axes sont en échelles log.

de mesure (voir xxx plasticité).

La Figure 52 représente la résistance en cisaillement d'échantillons de sols en place « non remaniés » selon leur teneur en eau, dans la zone de désaturation. Le « pic » est observable pour chacun des horizons testés : avec la baisse de la teneur en eau depuis l'état saturé, la résistance continue de croître jusqu'à un maximum avant de décroître à nouveau. Idéalement, ce serait avec des échantillons « en cours de mélange » que nous pourrions observer ce phénomène ; cependant nous supposons que les échantillons de

sols naturels labourés représentés sur la Figure 52 peuvent être considérés comme « foisonnés ». Le prolongement de l'évolution de la résistance en cisaillement des mélanges très secs foisonnés est plus incertain et dépendra probablement très fortement de l'agrégation obtenue au cours du séchage, donc des contraintes subies par le mélange.

Plus la compacité est forte, moins l'effet de l'agrégation est important et moins cette transition serait visible : la désaturation continuerait à apporter de la cohésion supplémentaire entre les élément solides sans que celle-ci ne crée de zones de porosité propageant les ruptures. Au cours d'une contrainte, un plan de rupture naissant est vite refermé par la pression liée à la compacité du mélange. A fortes compacités donc, les résistances en cisaillement compressives ou extensives continuent de croître avec la réduction de la teneur en eau, même après désaturation.

La Figure 53 rassemble les résistances observées pour des échantillons compactés (2a.), des mélanges saturés (1.), et les sols naturels dans la zone de désaturation (2b.). 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. Pour une même terre, on peut représenter deux chemins-types de désaturation. Dans les deux cas, tant que l'on maintient le mélange saturé (par augmentation de la compacité volontairement, ou par instabilité du mélange désaturé, voir xxx instablité), la teneur en eau ne peut baisser que par augmentation de la compacité et réciproquement (1). Puis, on atteint l'état de désaturation spontanée du mélange. Si aucune compaction n'est appliquée (2b.), la résistance baisse ensuite par agrégation/fissuration : 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 (2a.), les phénomènes d'agrégation/fissuration sont moins impactants. Notons également que les échantillons de pisé ont bénéficié d'un retrait libre, permettant d'éviter la fissuration (voir xxx retrait libre).

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. En revanche, dans le cas « foisonné », si l'on prend en compte l'agrégation/fissuration alors la résistance en cisaillement est moindre *entre les agrégats* et donc à l'échelle du mélange.

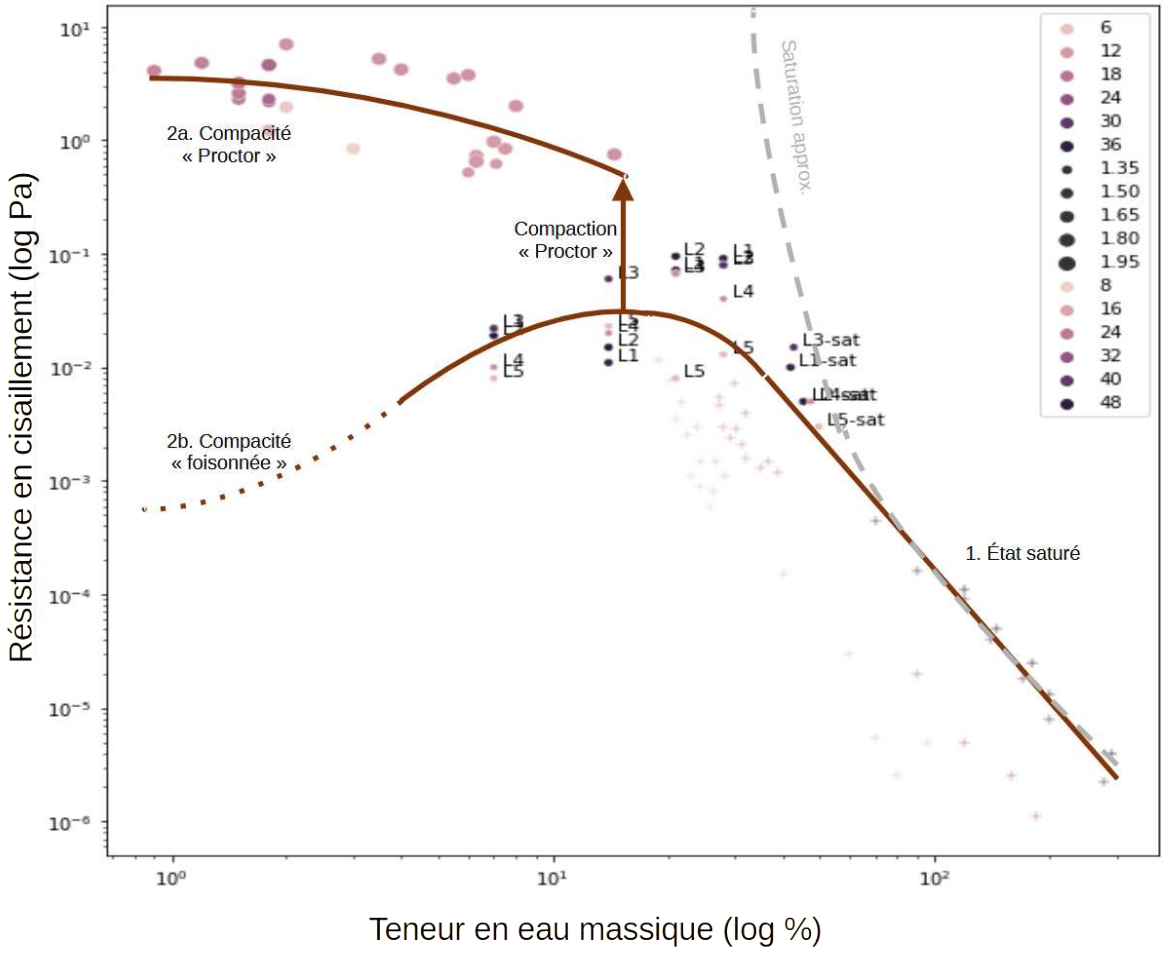


Figure 53 : Evolution des résistances mécaniques en compression et cisaillement d'échantillons de sols naturels selon leur teneur en eau massique. Les données sont issues de (Ekwue 1990; Vinceslas 2019; Fabbri et al. 2022; Ji et al. 2023). Les deux axes sont en échelles log [log MPa et non log Pa, changer unités axe passer en Pa xxx]. A saturation, la résistance en cisaillement est logarithmiquement proportionnelle à la teneur en eau massique (1.). Deux tendances sont observées à partir de la désaturation : les mélanges foisonnés voient leur résistance en cisaillement baisser (2b.), tandis que les mélanges compactés voient leur résistance augmenter avec la baisse de la teneur en eau (2a.).

Le passage de l'état saturé à l'état insaturé voit donc apparaître 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 compaction du mélange gouverne sa résistance.

6.1.2.8 Composition

La compacité augmente l'ensemble des forces composant les résistances mécaniques des éléments de terre crue. Or, la compacité atteinte au cours d'une contrainte de compaction d'un mélange de terre crue dépend de sa *compactabilité*, elle-même fortement augmentée par un *empilement granulaire* adéquat (voir compaction xxx). D'autre part, la compacité amplifie l'impact de la cohésion apportée par des éléments fins comme les minéraux argileux en évitant l'agrégation/fissuration et en favorisant les contacts intergranulaires.

[xxx → tracer la participation de chaque force à la résistance en cisaillement, pour chaque courbe ?]

6.1.2.8.1 Teneur en éléments fins et cohésifs : minéraux argileux

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 sont en général plus conséquentes pour les mélanges présentant des surfaces spécifiques ou des Capacités d'Echange 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). C'est pourquoi ce sont les techniques impliquant la compaction des éléments qui sont souvent 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 (xxx échantillon Julia trop argileux qui fissure?). [ref]

Cependant, la fissuration liée au retrait est dépendante de la liberté de retrait des éléments dans les trois dimensions (voir retrait xxx). 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) (voir aussi Erreur : source de la référence non trouvée). Meimaroglou et Mouzakis (2024) obtiennent également 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.

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 (voir

xxx retrait). Peu d'essais sur des éléments composés de terre crue sont réalisés sur des échantillons de ces échelles, il est donc difficile de conclure quand 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 50µm (P50µm xxx) (Coventry 2004; Vinceslas 2019).

Afin d'illustrer l'influence de la composition des mélanges sur leurs comportements mécaniques, comparons deux mélanges théoriques : le mélange A est « argileux » : il est composé de minéraux argileux électrostatiquement actifs et à forte surface spécifique, permettant une forte cohésion. Le mélange B est limono-argileux : plus faiblement cohésif, car moins argileux, mais présentant un peu de cohésion capillaire par les limons et la fraction argileuse. Deux courbes de variations de la résistance selon la teneur en eau massique sont proposées pour ces deux mélanges-types (Figure 54).

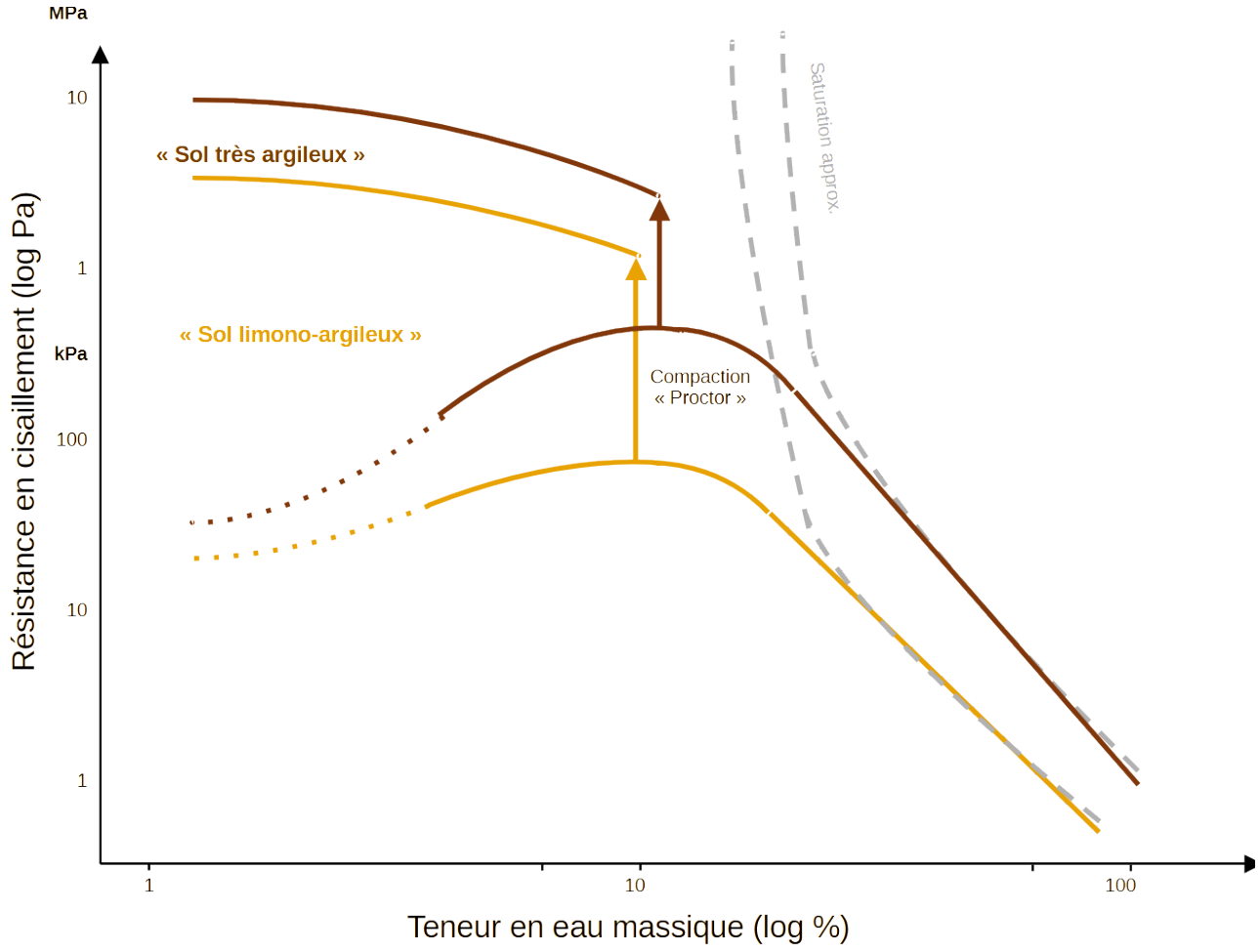


Figure 54 : Evolution des résistances mécaniques en compression et cisaillement théoriques de deux sols-types, selon leur teneur en eau massique et deux types de conditionnement : « foisonné » et « compacté Proctor ».

Le point de désaturation arrivera à des teneurs en eau beaucoup plus faibles pour le mélange limoneux que pour le mélange argileux (rappelons que l'échelle de la figure est logarithmique), car les argiles permettront l'émergence d'une structure cohésive stable piégeant l'air malgré de fortes teneurs en eau, tandis que le mélange limoneux s'affaissera car la porosité est saturée.

La résistance mécanique en cisaillement sera plus forte à l'état saturé pour le mélange cohésif par sa capacité à créer des liaisons électrostatique. La différence sera particulièrement conséquente au point d'entrée d'air du mélange argileux, alors déjà dans des résistances en cisaillement de plusieurs dizaines de kPa, tandis que le mélange limoneux sera encore liquide et dispersé.

A partir du point d'entrée d'air, on a vu que s'il n'y a pas d'apport de compacité (état « foisonné »), il y a agrégation/fissuration pour le mélange argileux, dont la résistance en cisaillement décroît. Le mélange limoneux en revanche présente peu de dynamique d'agrégation : la résistance est moyenne à désaturation, et elle ne décroît que faiblement ensuite.

S'il y a un apport de compacité, les deux mélanges présentent de plus fortes résistances pour toutes les teneurs en eau insaturées. Sans impact de l'agrégation/fissuration, dans le sol grossier se développent des forces de cohésion capillaire, et dans le sol argileux également avec en plus des forces de cohésion électrostatiques (Bui 2008; Meimaroglou & Mouzakis 2024).

En revanche, a même compacité le mélange argileux présentera de plus grandes résistances que le mélange grossier dans tous les cas, puisqu'il a de meilleurs propriétés cohésives, mais qu'il n'y a pas ou peu de décroissance due à l'agrégation/fissuration.

Enfin, lorsque le mélange est complètement sec, il y a décohésion dans les deux cas. Cependant, plus la compacité est forte et le mélange est fin, plus cet état sec perdant en cohérence est atteint à de faibles teneurs en eau. Cette décohésion n'ayant pas lieu dans des conditions réalistes pour tout sol un minimum cohésif et compacté, elle n'est pas représentée.

6.1.2.8.2 Taille et forme des granulats

L'*empilement granulaire* favorise l'atteinte d'une compacité permettant de plus fortes résistances mécaniques (voir xxx compaction). A l'inverse, trop de fraction grossière, un fort élancement ou une rugosité des granulats peut rendre difficile l'atteinte de fortes compacités et ainsi défavoriser les résistances mécaniques.

Par exemple, la présence de fibres élancées et rigides en quantité importantes favorise le maintien d'une forte porosité donc une réduction des résistances mécaniques sèches (Wolfskill et al. 1970; Serlet et al. 2016; Fabbri et al. 2022). La teneur en chènevotte a un effet négatif sur les résistances en compression sèche des éléments de terre allégée (Figure 55). Cependant, à même compacité, on a vu que la rugosité et l'élancement pouvaient avoir un effet bénéfique sur la friction (voir xxx friction) et la résistance en cisaillement ou traction (voir xxx direction de contraintes). La présence de fibre peut être traitée comme d'autres granulats du spectre de tailles et formes du mélange, participant à l'amélioration de la compacité potentielle ou à sa réduction. On peut dès lors supposer

qu'un optimum de teneur en un type de fibre relativement à une résistance mécanique peut être trouvé pour une terre, lorsque celles-ci n'impactent pas voir améliorent la compacité obtenue tout en apportant des propriétés de friction (Fabbri et al. 2022).

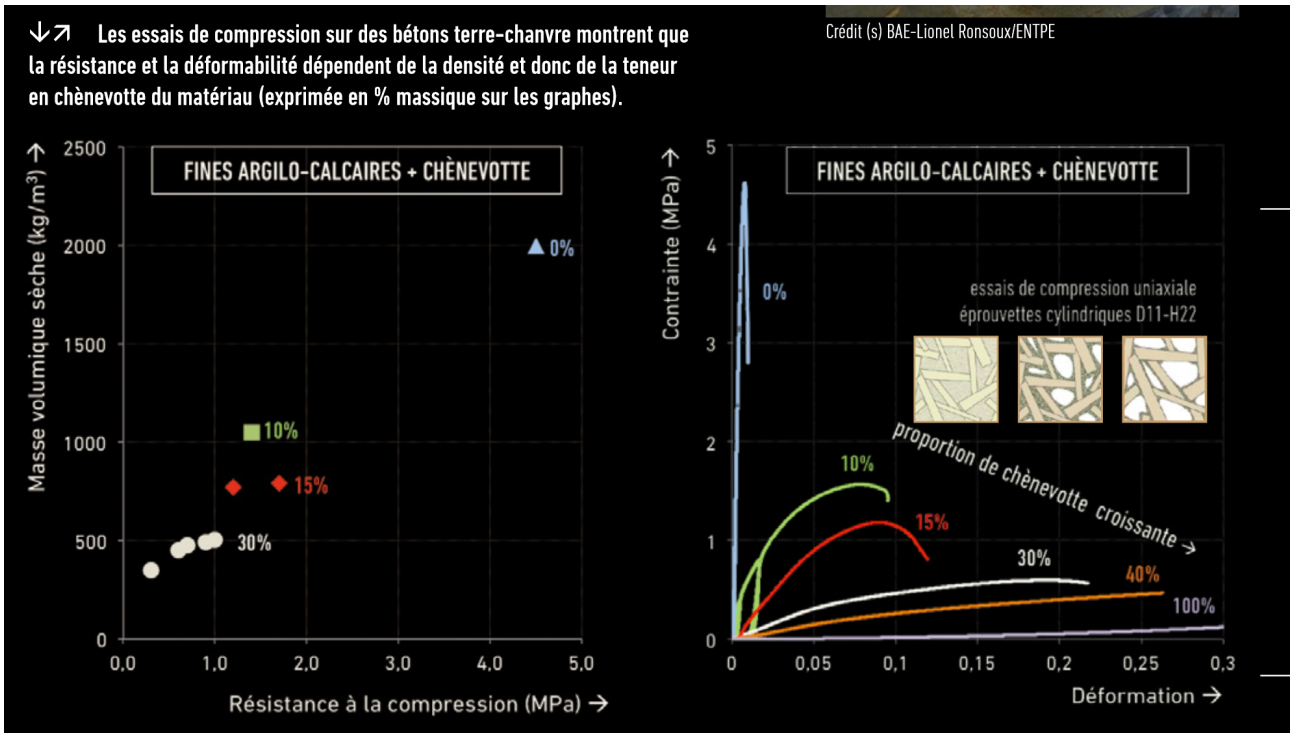


Figure 55 : [XXX inverser les couleurs] (a) Résistance à la compression maximale d'échantillons de terre crue fibrée à la chènevotte selon leur masse volumique sèche. (b) Courbe contrainte-déformation de ces échantillons représentée selon leurs proportion volumique (?) de chènevotte (b). L'ajout de fibres en grandes quantités réduit la contrainte maximale avant rupture, et prolonge le comportement ductile *par l'apport de* tenacité. *(Serlet et al., 2016, p. 27)*

Plusieurs auteurs indiquent également que les éléments grossiers rugueux apportent plus de résistance mécanique par friction aux mélanges (Schroeder 2016; Koutous & Hilali 2019), impliquant de plus grandes résistances en cisaillement et en compression.

Les fibres apportent de la résistance mécanique pour des mélanges à forte teneur en eau, par exemple des briques fraîchement moulées, ce qui facilite leur manipulation (Wolfskill et al. 1970). La résistance qu'elles apportent n'est pas impactée par la teneur en eau : elle est décisive à l'état frais puisque la résistance du reste du mélange est faible, et elle devient négligeable à l'état sec, où des résistances d'ordre de grandeur supérieurs sont permises par les autres éléments du sol.

6.1.2.8.3 Cimentation

Nous n'avons pas discuté jusqu'ici de l'impact de la cimentation sur les résistances mécaniques dans les mélanges composés de terre crue, considérant des matrices mélangées où les cimentations sont soit rompues soit intégrées à la granulométrie. Elle ne sera donc à considérer que pour les éléments « secs » ou la terre fraîchement extraite et peu remaniée, car dans les procédés de terre crue toutes les étapes de remaniement empêchent l'établissement de liaisons cimentaires (voir cimentation XXX). Comme les autres forces cohésives, contrairement aux forces de friction, elles seront peu variables

selon l'orientation des contraintes. Leur impact peut être conséquent sur les *seuils de cisaillement* des mélanges, c'est à dire le début du comportement *ductile* (ou cassant, en l'absence de ductilité). Mais la participation des liaisons cimentaires est nulle au sein du comportement ductile lui-même : une fois la liaison cimentaire rompue, elle ne se reconstruit pas. La cimentation favorise donc des comportements *cassants*, et ne participe pas à l'élaboration de la résistance en cisaillement des matrices *mélangées*.

6.1.2.9 Importance dans les procédés de terre crue

La résistance mécanique des éléments de terre crue est un paramètre d'importance pour les procédés employant la terre crue à des teneurs en eau variées. La résistance mécanique des éléments façonnés, dans leur emplacement final, qu'ils soient humide ou secs, est probablement le paramètre le plus étudié des techniques de terre crue. On pense à cette résistance notamment pour assurer la résistance des ouvrages dans leur état final, mais également au cours de l'élévation des murs afin d'assurer une résistance des éléments sous-jacents suffisante malgré leur séchage incomplet (voir xxx procédés?). Mais certain.es auteur.ices ont identifié d'autres étapes des procédés où des résistances au cisaillement impactent leur faisabilité. Vinceslas (2019) et Bolleni (2019) montrent l'importance du seuil de cisaillement des barbotines sur la tenue au mur des mélanges de terre allégée projetés ou coffrés; (Perrot et al. 2018) étudient l'impact du cisaillement sur la faisabilité de la pose par imprimante 3D de mortiers de terre crue, [xxx autres?]. Les seuils d'initiation des déformations sur des éléments composés de terre crue sont donc des propriétés centrales également au coeur des procédés de mise en oeuvre, notamment par rapport aux maintien des éléments dans leur position finale, qu'elle soit fraîchement posée ou sèche et en cours d'usage.

6.1.2.10 Résistance en cisaillement : conclusions

Sur la Figure 54 qui représente l'évolution de la résistance en cisaillement selon la teneur en eau pour deux terres-types, très cohésives ou peu cohésives, on observe que la finesse du matériau et sa teneur en argile entraînent un « changement d'échelle » de la courbe de résistance selon la teneur en eau. Ce type de représentation montre l'importance de l' « état hydrique » plutôt que la teneur en eau volumique ou massique directement sur les propriétés d'une terre : les propriétés de la terre évoluent selon le même schéma de réponse à l'hydratation pour la plupart des terres, mais à des échelles de teneurs en eau volumiques différentes. Comparer les propriétés des terres relativement à leur *état de saturation* plutôt que par leur *teneur en eau* est en effet communément admis comme permettant une meilleure compréhension des comportements des terres dans la pratique de la maçonnerie terre crue, mais les représentations couramment utilisées dans la littérature académique sont généralement proposées en teneurs en eau massiques (plus rarement, volumiques). La comparaison des propriétés de deux terre serait facilitée si l'on identifie un seuil de teneur en eau permettant de normaliser la teneur en eau volumique : les courbes se superposeraient alors selon la teneur en eau, seules les résistances varieraient. Ce seuil de teneur en eau pourrait correspondre à une consistance commune à tous les mélanges, comme par exemple une limite d'état hydrique (voir xxx états hydriques).

Si cette teneur en eau est la saturation, le diagramme volumique pourrait se révéler adéquat, car il permet de positionner des mélanges de différentes terres à état de saturation égale. Il pourrait être utilisé pour l'étude des mélanges de terre crue par l'observation de la variation des propriétés des terres selon leur compacité et leur état de saturation. Par exemple, des représentations type « courbes de niveau » pourraient être utilisées pour représenter les propriétés mécaniques d'une terre selon son état de compacité et de saturation. Nous proposons une telle représentation, décrivant l'évolution théorique des résistances en cisaillement selon la composition des phases des mélanges de terre crue sur la Figure 56. Les valeurs de seuils de cisaillement (en Pa) ne sont proposée qu'à titre indicatif, puisqu'aucune vérification n'a été réalisée. En effet, les valeurs obtenues dans la littérature pour la Figure 54 sont généralement données en teneurs en eau massiques, et la *densité propre* des éléments solides est rarement précisée. La conversion n'est donc pas possible. Une bibliographie approfondie permettrait probablement d'obtenir des échantillons adéquats.

Les valeurs sont représentées sous forme de courbes d'équi-résistance, comme le seraient les lignes de niveau sur une carte géographique. La lecteur.ice doit imaginer leur projection dans une troisième dimension (en attendant de proposer cette figure en 3D…). Quelques exemples pour guider la lecture : en haut du triangle, la compacité induit de très fortes résistances, ce qui dans une troisième dimension représentant la résistance serait un « point haut ». Passer chaque ligne d'équi-résistance revient à descendre depuis ce point haut vers de faibles résistances. Traverser le diagramme à compacité égale fait « monter » puis « descendre » la résistance.

Les tendances dessinées peuvent être vues comme une synthèse de ce qui a été discuté dans ce chapitre. En maintenant l'état saturé, les forces de résistance augmentent de manière exponentielle à mesure de l'augmentation de la compacité (= réduction de la teneur en eau). On passe donc régulièrement des seuils d'ordre de grandeur croissants (ici, puissances de 10 de la résistance en Pascals). C'est l'équivalent de l'étape 1. sur la Figure 53.

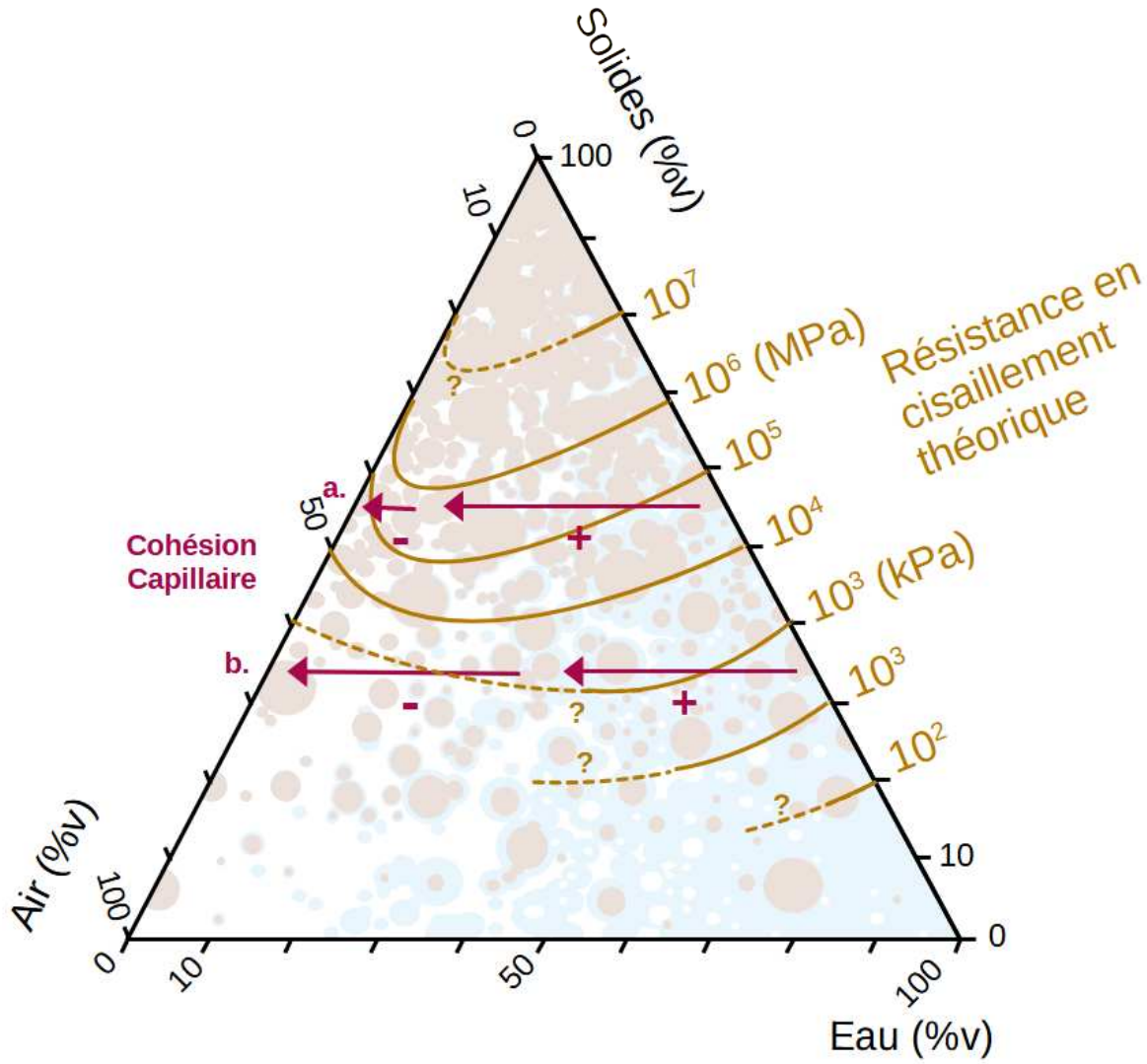


Figure 56: Représentation théorique de l'évolution de la résistance en cisaillement d'éléments composés de terre crue sur le diagramme volumique. Les forces en Pascal sont données à titre indicatif et n'ont pas fait l'objet de mesures. A compacité égale, lorsque la saturation décroît, la cohésion capillaire croît par augmentation de la succion puis décroît.

Lors de la désaturation, si celle-ci se fait *à compacité égale*, la résistance augmente par apparition de cohésion capillaire. Pour des sols argileux compactés (a.), on a vu que cette augmentation est continue jusqu'à de très faibles saturations (inférieures à 1%), non rencontrées dans la nature. En revanche, pour ces mêmes sols peu compacts (b.), l'agrégation spontanée rend le sol « grumeleux » et son comportement se rapproche d'un sol sableux : la résistance chute avec la baisse de la teneur en eau.

C'est pourquoi les courbes proposées ne sont pas de même forme : on suppose que pour des compacités fortes ce n'est que très proche de la désaturation que la résistance chute, tandis que pour des compacités faibles l'optimum de résistance est atteint à plus forte saturation. Ces deux chemins sont sensiblement les mêmes que ceux représentés sur la Figure 53 (2a. Et 2b.). Pour cela, il faut admettre que le chemin « compact » de la Figure 53 est à compacité égale, mais on verra qu'il bénéficie en réalité de retrait au séchage (voir retrait xxx) donc la compacité augmente avec le séchage. Pour le chemin « foisonné », il est peu probable que la compacité soit égale mais plutôt proche d'une

courbe d’équi-résistance que quelques centaines de kPa, ce qui est finalement relativement proche d’une compacité constante.

Une telle représentation de la résistance sur le diagramme volumique n’est effective que pour une terre : l’influence de la composition du sol est multiple sur la répartition des courbes d’équi-résistance. D’une part, la résistance à saturation décroît bien plus rapidement pour les sols peu cohésifs que pour les sols les plus argileux. D’autre part, moins les sols contiendront d’élément fins, mois la cohésion sera importante relativement aux autres forces du sol, donc moins le pic de cohésion à des saturations intermédiaires sera élevé. On approchera plus d’une évolution de la résistance directement dépendante de la compacité (lignes de résistance horizontales).

[supprimer? xxx] Enfin, on peut supposer que des sols ayant un empilement granulaire potentiel peu compact montreront des résistances plus fortes pour une même compacité, car pour une même unité de vides les grains seront plus en contact. Ce qui ne veut pas dire qu’il sera plus facile de produire des éléments résistants à partir de sols a l’empilement peu compact, car leur résistance à la compaction fera qu’il sera plus difficile de leur apporter de la compacité (voir xxx compaction, et xxx compromis compacité/homogénéité ?).

[XXX faire un autre schéma?]

Nous avons représenté uniquement la zone de résistances qui concerne les procédés de terre crue : en deçà du kilopascal (kPa), il s’agit de « barbotines très liquides » et nous ne maîtrisons pas bien l’évolution selon la teneur en eau, particulièrement en milieu insaturé car ces mélanges sont instables (voir instabilité xxx). Au delà de la dizaine de mégapascal (10 MPa), les compacités/teneurs en eau nécessaires à l’atteinte de telles résistances ne sont plus rencontrées dans les éléments de terre crue en conditions réalistes. D’autre part, on peut supposer que dans cette zone la résistance des éléments solides devient centrale dans la résistance du matériau aux contraintes, car les granulats ne peuvent plus bouger les un par rapport aux autres sans rompre (voir xxx compaction).

6.1.3 Fermeté

Là où le seuil de cisaillement indique la force nécessaire pour entamer le comportement ductile, la fermeté est l’énergie nécessaire pour chaque unité de volume déformé. Dans les comportements des matériaux composés de terre crue, le seuil de cisaillement indique la puissance nécessaire pour initier le mouvement et la fermeté peut être considérée comme l’énergie nécessaire pour réaliser une unité de déformation *ou* l’ensemble de la déformation souhaitée. On pourra considérer en première approche qu’en contexte de cisaillement pur, les propriétés de fermeté sont relativement proportionnelles au *seuil* de cisaillement. En contexte compressif, elles augmentent avec l’augmentation de la compacité, comme la *résistance* en cisaillement.

6.1.3.1 Etat saturé

A l’état saturé, les mélanges sont généralement considérés « infinis » : ils sont soit spontanément relativement liquides donc maintenus dans des contenants, soit obtenus par compaction confinée. Les propriétés de résistance au cisaillement sont donc évaluées

soit à leur surface soit au sein du mélange. Dans ces contextes, il n'y a pas de comportement de rupture. L'eau étant incompressible, il n'y a pas non plus d'augmentation de la compacité significative au cours de l'application d'une contrainte. Sur un diagramme volumique, une telle contrainte est à composition de phases constante (Figure 58b.). Ainsi, les courbes type contrainte-déformation ne présentent souvent qu'un seuil marqué, le seuil de cisaillement (voir Figure 47). Au delà, le comportement est infiniment ductile et la « fermeté » est constante au cours du mouvement. La fermeté des mélanges saturés est donc fortement corrélée à leur seuil de cisaillement (Barnes 2013b).

Aux états saturés ou proches de la saturation, la fermeté présente donc un comportement similaire au seuil de cisaillement relativement à la variation de saturation et aux propriétés de composition et d'organisation des mélanges. La dissipation de l'énergie appliquée se fait par friction entre les éléments solides ou par frottements des fluides. Elle est donc également dépendante des propriétés de cohésion et de friction définies précédemment.

Un appareil développé par Barnes (2013b) permet une évaluation de la fermeté (*toughness*) d'un mélange argileux. Il s'agit d'une version « mécanisée » du test de la limite de plasticité d'Atterberg (voir xxx atterberg) où un boudin de terre est roulé par un dispositif normalisé, en faisant varier la teneur en eau. Pour chaque teneur en eau, la contrainte en compression du dispositif est constante, donc l'énergie appliquée est constante. La déformation associée à l'affinement du boudin correspond, après estimation théorique du déplacement réalisé par la matière, au déplacement d'un volume de matière. On obtient une mesure d'énergie par volume déformé, donc une fermeté, en kJ/m^3. Le test peut mesurer la fermeté d'un mélange à partir de la limite du comportement ductile-cassant (*plastic-brittle*), et jusqu'à ce qu'il devienne trop « collant » (*sticky*) au dispositif, et la fermeté peut être représentée selon la teneur en eau pour une terre étudiée (Figure 57).

Sur une vingtaine d'argiles de briqueteries et de céramistes testées, les mesures de fermeté montrent des comportements similaires en fonction de la teneur en eau. Dès lors que les échantillons sont suffisamment peu cassants pour être roulés, la fermeté devient mesurable. Pour une même terre argileuse, la fermeté décroît avec l'augmentation de la teneur en eau, comme suggéré précédemment pour la résistance en cisaillement. Cependant, la décroissance de fermeté n'est pas exactement logarithmique comme observé par Vinceslas pour la résistance en cisaillement (2019). Les courbes de fermeté présentent pour certaines argiles une décroissance linéaire décomposée en deux pentes différentes, avant d'atteindre le stade « collant » arrêtant le test (Figure 57). La rupture de pente définit donc deux zones, la première que l'on traduira « plastique ferme » (*stiff-plastic*) et la seconde « plastique mou » (*soft*-plastic).

Ce qui différencie ces deux comportements est une évolution différente de la fermeté selon la teneur en eau. La fermeté d'un mélange plastique-ferme évoluera très vite si la teneur en eau change, tandis que dans un mélange plastique-mou une augmentation de teneur en eau impactera moins fortement la fermeté.

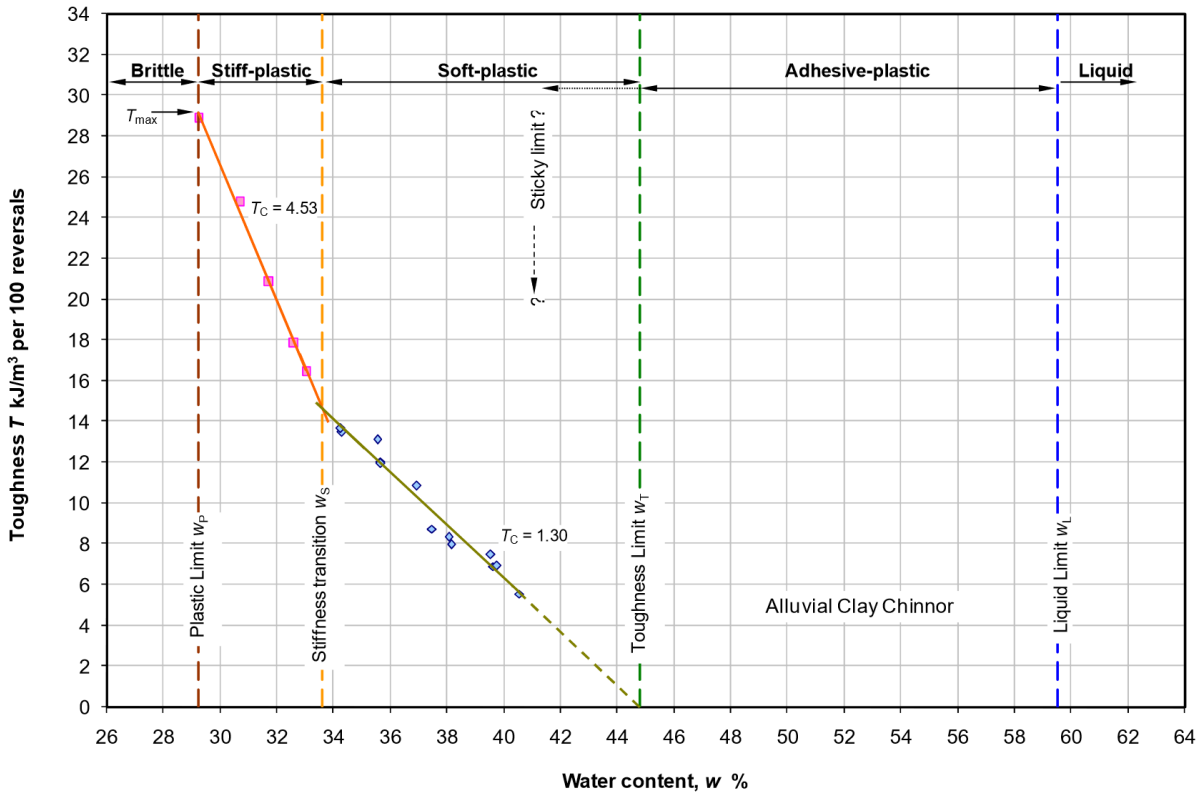


Figure 57 : Evolution de la fermeté pour une argile-type présentant une « transition de fermeté » (stifness transition), et délimitation des comportements relativement aux propriétés de fermeté mesurées. (Barnes 2013b:196)

L'apparition du comportement collant correspondant à la teneur en eau la plus élevée pouvant être mesurée par le dispositif pourrait être définie comme le début d'un « état collant » avec une « limite collante » (*sticky limit*).

Enfin, Barnes propose une extrapolation de la fermeté « nulle » par prolongement de la droite « plastique-mou ». L'atteinte d'une fermeté nulle est questionnable dans le sens ou tant qu'il existe une résistance au mouvement et un seuil de cisaillement, il existe une énergie nécessaire pour la déformation, et à moins d'atteindre des teneurs en eau proches de 100 %, on suppose qu'un seuil de cisaillement est toujours décelable. La « limite de fermeté » (*toughness limit*) ainsi définie est donc difficile à interpréter.

Cependant, il suggère que cette limite pourrait être identifiée comme la limite inférieure d'une zone « plastique-adhésive » (*adhesive-plastic)* se prolongeant jusqu'à la limite de liquidité. Nous reviendrons sur cette proposition dans une discussion sur les *états hydriques* (xxx limite de liquidité état hydriques.).

6.1.3.2 Etat insaturé

A partir de la désaturation, avec l'apparition de la possibilité de compacter les mélanges et du comportement cassant pour des éléments finis, la fermeté ne varie plus proportionnellement au seuil de cisaillement mais plutôt à la variation de force nécessaire

pour continuer la déformation. On a vu que cette force dépend notamment de la direction de la contrainte appliquée et de son avancement : à mesure qu'une contrainte compressive est appliquée, la compacité augmente, donc la friction et ainsi la résistance en cisaillement et la fermeté (Barnes 2013b). Sur un diagramme volumique, on peut représenter le chemin parcouru au cours d'une contrainte compressive (Figure 58a.). Celui-ci traverse des « courbes d'équi-résistances » ce qui montre que la résistance augmente au cours du mouvement. A chaque incrémentation de compacité, la fermeté augmente. L'énergie cumulée dans la déformation dépend à la fois de la compacité finale atteinte et de la quantité de déformation. Cependant, toute composante non compressive de la déformation (cisaillante) est invisible sur le diagramme volumique car le cisaillement se fait à teneur en eau, en air et en solides constants (Figure 58b.).

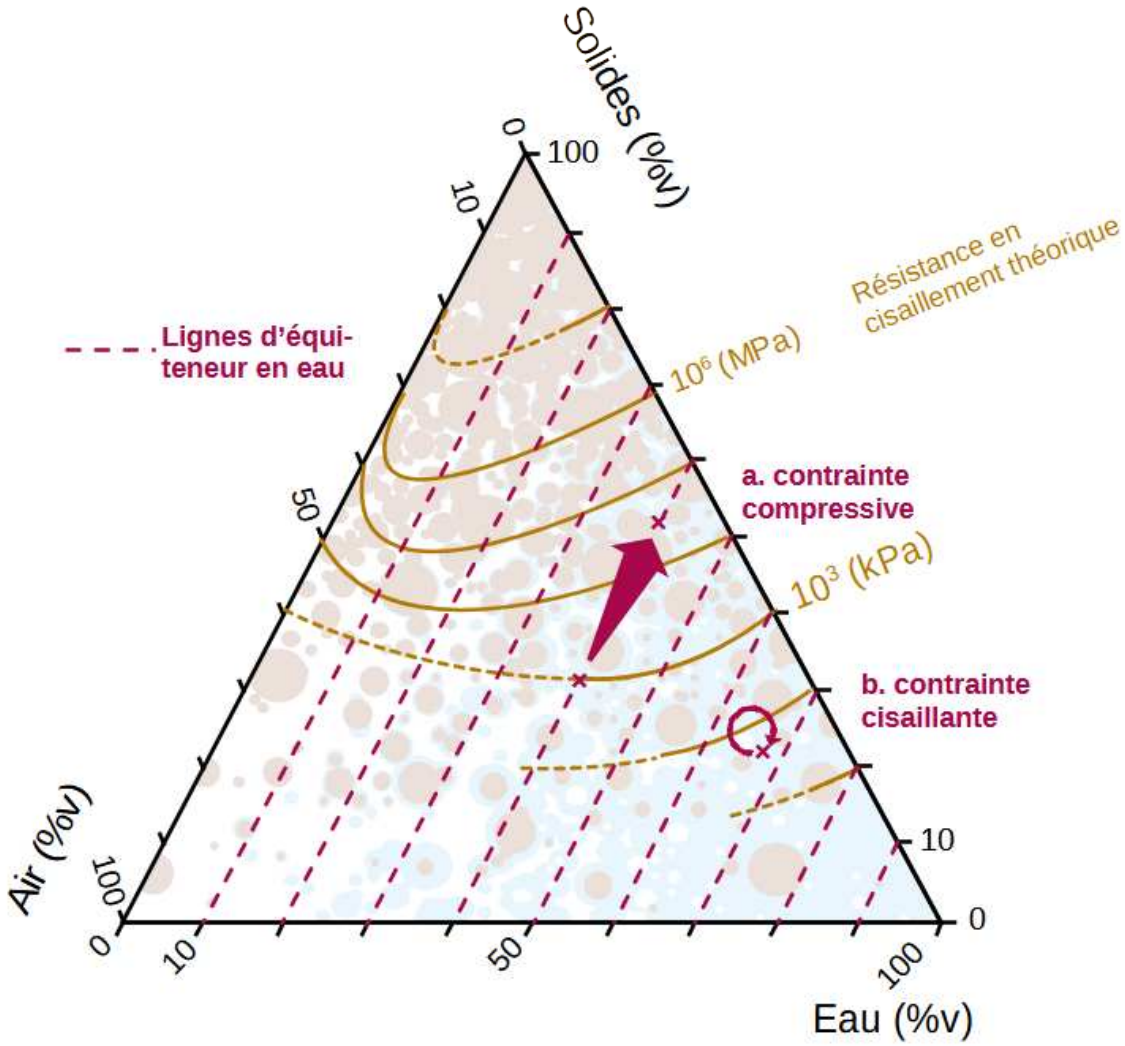


Figure 58: Impact du type de contrainte sur la composition volumique. La largeur des flèches indique la résistance en cisaillement au cours de la variation de composition volumique. Pour une contrainte compressive l'augmentation de la compacité induit une augmentation progressive de la fermeté, tandis qu'une contrainte purement cisaillante n'induit pas de variation de composition volumique et la fermeté est constante au cours de la contrainte. Notons qu'une contrainte compressive rapproche le mélange de la saturation (voir xxx compromis compacité/saturation).

L'inverse est plus difficile à observer car une contrainte extensive simple induit généralement un comportement de rupture locale plutôt que de décompaction globale.

C’est plutôt une répétition de contraintes extensives et cisaillantes variées qui permet l’ « aération » d’un mélange cohésif (voir ouvrabilités:mélange), pouvant réduire *in fine* la fermeté.

De manière générale, la fermeté semble donc être gouvernée par les mêmes propriétés que la résistance en cisaillement, mais il est difficile de conclure sur les liens entre ces deux propriétés car peu d’études les relient sur l’ensemble du spectre de teneurs en eau rencontrées dans les procédés de terre crue.

6.1.3.3 Composition

Comme pour la résistance en cisaillement, la cohésion apportée par les minéraux argileux augmente la fermeté des mélanges. Pour une même teneur en eau, un mélange plus argileux ou aux argiles plus actives aura une fermeté plus importante. Les autres paramètres de la cohésion et de la friction sont également en jeu : composition ionique de la solution du sol, élancement des éléments, etc.

Barnes montre qu’à l’approche de la limite de comportement ductile-cassant, la fermeté atteinte varie selon la composition minéralogique des argiles : les terres contenant des kaolinites, moins susceptibles de participer à la cohésion, sont moins fermes que celles composés de montmorillonites, plus « actives » (Barnes 2013b).

Il suggère également que la fermeté peut être apportée par certains résidus organiques qui « maintiennent la forme » du mélange. On peut suggérer que c’est la propriété qu’ont des molécules ou les fibres *élancées* (voir élancement xxx) composant ces résidus à participer à une cohésion ou friction de plus grande échelle qui est alors à l’œuvre. Ce lien relie différents groupes de solides entre eux et procure plus de fermeté à teneur en eau équivalente. Ces fibres participeraient à la *tenacité* d’un mélange, c’est à dire sa capacité à ne pas casser ou fissurer (Barnes 2013b) (voir xxx tenacité). En ce sens, elles permettent par exemple la réalisation d’éléments sans observer de comportement cassant à des teneurs en eau plus basses. Puisque la fermeté augmente fortement à l’approche de la limite ductile-cassant, maintenir un peu plus longtemps le comportement ductile augmente fortement la fermeté maximale atteinte. Cet effet de « maintien » rappelle celui que les fibres permettent au cours du séchage et qui évite la fissuration (voir xxx retrait). Plus qu’un gain de fermeté direct à même teneur en eau volumique, c’est donc un maintien du comportement ductile à des états plus secs qui serait permis par la présence de fibres, induisant indirectement une fermeté/résistance maximale atteinte plus forte. Cela est également constaté dans les essais en compression d’éléments secs et humides : les fibres prolongent le comportement ductile (déformation avant rupture) [ref? Essais julia ?].

Comme pour le retrait au séchage (xxx fissuration), Le maillage créé par les fibres dépend de l’échelle des fibres ajoutées. Des fibres macroscopiques comme de la paille ou du foin prolongent la tenacité macroscopique : elles n’empêchent pas une microfissuration, mais permettent une ductilité macroscopique. Des fibres microscopiques comme dans les selles animales (crottins de cheval, bouse de vache) prolongeraient plutôt une tenacité de plus petite échelle.

C’est une explication semblable qui peut expliquer les fortes fermetés atteintes par des mélanges argileux foisonnés : les feuillets argileux glissent et s’arrangent parallèlement dans les plans de rupture, rompant la continuité des fissures. A l’éloignement de deux grains couverts d’un manteau argileux, les feuillets permettent une séparation progressive des deux grains tout en maintenant un lien entre eux. C’est donc ici aussi la forme, et a priori l’élancement, des minéraux argileux qui favorise le maintien d’un comportement ductile et non cassant. La teneur en éléments élancés n’apporte donc pas directement de fermeté, mais elle empêche le passage à un état agrégé/fissuré qui réduirait la fermeté.

Enfin, la fermeté, comme la résistance en cisaillement, dépend de propriétés plus complexes d’arrangement des éléments solides entre eux : empilement, agrégation, etc. Par exemple, dans une matrice argileuse, l’ajout de granulats non argileux (limons ou sables) réduit la teneur en eau d’apparition de la limite ductile-cassant. Le sol est donc plus vite ductile à même teneur en eau, mais la fermeté globale (donc probablement RC globale) est réduite (Barnes 2013a): c’est un effet de « dilution », que l’on pouvait également constater sur la Figure 54 avec l’évolution de la résistance en cisaillement théorique de deux sols types.
Dans les expériences de Barnes (2013a), plus les grains ajoutés sont grossiers, moins l’impact est conséquent, ce qui est surprenant car on aurait pu imaginer que des grains plus fins apporteraient plus de cohésion par unité de masse via la création de plus de liaisons capillaires. Dans un sol sableux, l’ajout de limons devrait donc permettre d’apporter plus de propriétés de cohésion que l’ajout de sable, mais dans une matrice argileuse, l’inverse est observé. On peut faire l’hypothèse que dans une matrice très argileuse comme étudiée par Barnes, les grains plus grossiers sont « noyés » dans la matrice d’argile, tandis que les grains fins sont moins bien « mélangés » et une mésoporosité apparaît entre les grains. Cette porosité fragilise la structure tout en apportant peu de cohésion relativement à la matrice argileuse pure. Ainsi, dans une matrice argileuse, la surface spécifique des éléments non argileux serait peu impactante, c’est plutôt leur arrangement granulaire spontané qui gouvernerait leur apport aux résistances.

6.1.3.4 La fermeté dans les procédés de terre crue

Là ou le seuil de cisaillement est le seuil où l’initiation d’une déformation irréversible est permise, la fermeté est l’énergie employé pour prolonger ou terminer une déformation. On pense aux étapes de mélange ou de modelage pour lesquelles plus le mélange est ferme, plus l’effort demandé pour la déformation est conséquent. La propriété de fermeté ajoute un paramètre qui impacte les propriétés d’efficacité « économique », dans le sens d’une « économie de moyens », des procédés de travail de la terre. Cette importance semble acquise pour les procédés de l’industrie céramique (Andrade et al. 2011; Barnes 2013a). A notre connaissance, cette propriété reste un angle mort de la recherche académique sur la construction en terre crue.

[alors que c’est elle qui gouverne les étapes de mélange et de compaction… voir plus loin xxx. A détailler plus tard ?]

6.1.3.5 Mesure de la fermeté

Le fonctionnement de l’appareil de Barnes, permettant de mesurer la fermeté de mélanges de terre crue entre la limite ductile-plastique et une limite de viscosité, a été décrit précédemment. A l’état

saturé, on a vu que les mesures de résistances en cisaillement permettent l'estimation de la fermeté par la bonne corrélation entre entre ces deux propriétés.
Sur l'ensemble du spectre des teneurs en eau naturelles des matériaux composés de terre crue, la fermeté des mélanges *foisonnés* peut être mesurée par le test du rhéomètre de Torque. Des hélices tournent dans un mélange composé de terre, auquel on ajout progressivement de l'eau, et l'énergie consommée par le moteur pour maintenir une rotation constante est mesurée (Figure 59). S'agissant d'une énergie par unité de volume déformé, il s'agit bien d'une fermeté. Mais il est difficile de savoir si celle-ci est proportionnelle à celle mesurée dans l'appareil de Barnes. Le comportement côté « sec » serait à observer plus en détails pour observer les dynamiques de cisaillement dans des mélanges présentant de l'agrégation, qui pourraient peut être inclure des composantes compactantes.

[XXX Enfin, pour les mélanges non foisonnés, plus ou moins compactés, mesures de poinçonnement?]

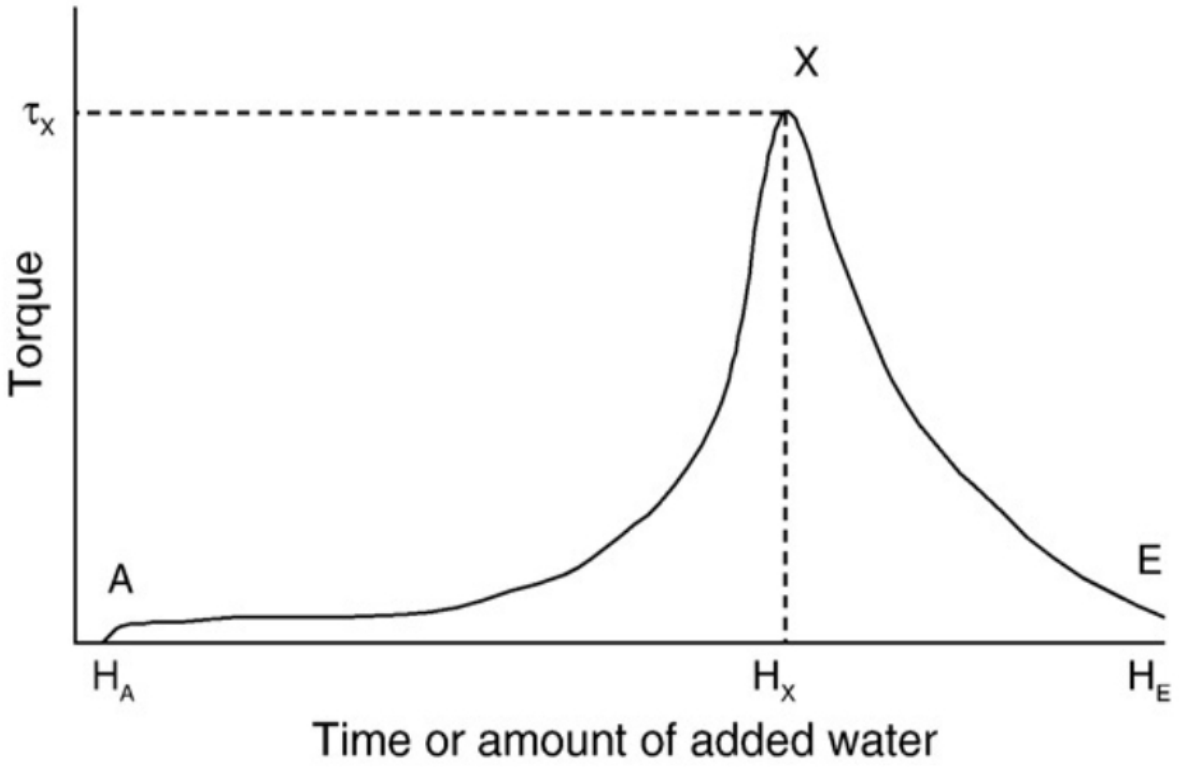


Figure 59 : Résultat type d'une mesure de cisaillement par le rhéomètre de Torque. A droite du pic, la résistance au cisaillement décroît par éloignement des éléments solides dans un mélange saturé. A gauche, elle décroît par agrégation/fissuration. Le point H_A correspond à une teneur en eau à partir de laquelle le mélange ne s'effondre plus autour des hélices et celles-ci ne rencontrent plus de résistance.

6.1.4 Résistances mécaniques : conclusions

Du fait de la diversité des comportements rencontrés selon la teneur en eau pour une terre donnée, et la variabilité des comportements entre différentes terres, on a vu qu'il n'existe pas de méthode de mesure ou de variable qui soit couramment mesurée pour caractériser les comportements des mélanges de terre crue sur l'ensemble du spectre des teneurs en eau et des compacités rencontrées dans les procédés de construction en terre crue. Cela est d'autant plus vrai lorsque l'on considère la diversité des contraintes qui peuvent leur

être imposées. La résistance en cisaillement semble être une des seules variables qui puisse être comparée le long de l'ensemble des teneurs en eau, et pour toutes les terres.

Par ailleurs, la teneur en eau massique n'est pas le paramètre le plus représentatif de la variation des comportements lorsque l'on compare des terres différentes, car l'impact des minéraux argileux ou des matières organiques absorbant l'eau est de déplacer les seuils comportementaux à des teneurs en eau plus fortes, dans un « changement d'échelle » des comportements. Il est un peu plus représentatif de comparer des teneurs en eau volumiques, indépendantes de la densité propre des solides. Mais surtout, la teneur en eau peut être normalisée par rapport à l'occurrence des seuils de comportement des terres, par exemple la limite ductile-cassant, ou la saturation. En effet, en pratique, les artisan.es terre crue préfèrent l'emploi de termes relatifs à l'*état hydrique* des mélanges composés de terre crue, renseignant sur la distance relative aux changements de comportement plutôt que sur la quantité d'eau contenue dans le matériau, rarement mesurée sur le terrain.

6.2 Variations-type des propriétés selon les contraintes mécaniques et de séchage: volumes, compositions, homogénéité

La description des phénomènes gouvernant les résistances mécaniques et l'interaction entre les composés solide des mélanges de terre crue et l'eau a été explorée et nous permet désormais de décrire les comportements qu'ont ces mélanges face aux contraintes mécaniques et de séchage qui leur sont appliquées. La description et l'influence des propriétés de composition sur ces comportements permettra de comprendre leur impact au coeur des procédés de mise en œuvre des techniques de terre crue, par leur décomposition dans ces contraintes-types.

6.2.1 Ressuyage et séchage, avec et sans retrait

6.2.1.1 Généralités sur le séchage d'éléments composés de terre crue

[XXX cette partie manque de références]

6.2.1.1.1 Mécanismes

Comme le ressuyage, le séchage est un équilibre entre la succion et la saturation hygroscopique de l'atmosphère environnante. La vitesse du séchage est gouvernée par des équilibres dynamiques complexes entre par exemple l'évaporation de surface du matériau ; la température, l'hygrométrie et le renouvellement de l'air ; l'échange gazeux à travers la porosité du matériau ; le déplacement de l'eau depuis le cœur vers la surface par capillarité.

Notons l'importance de la taille et de la forme des éléments composés de terre crue : plus les dimensions des éléments sont élancées et étroites, plus la surface d'évaporation développée est conséquente et plus le séchage est rapide. Ainsi, des petites briques de

terre crue disposées séparément sèchent bien plus rapidement que des éléments massifs mis en œuvre in situ, comme des murs de pisé ou de bauge.

6.2.1.1.2 Composition

De toute évidence, plus la teneur en eau est forte, plus le séchage est long. Également, plus la teneur en eau est forte, plus la perte de teneur en eau au cours du temps est rapide : la teneur en eau varie plus rapidement au début du séchage. [figure séchage éléments julia?]

L'influence de la composition des éléments de terre crue sur la vitesse de séchage est, à notre connaissance, peu explorée [thèse julia?]. En raison de leur forte rétention d'eau, les terres les plus fines, argileuses ou à fortes teneurs en matières organiques contiennent plus d'eau à la mise en œuvre (voir xxx ajout d'eau), ce qui augmente leur temps de séchage, mais on ne peut dire ici que les argiles ralentissent le séchage *directement*.

6.2.1.1.3 Impact sur les propriétés terre crue

Les propriétés de séchage des éléments composés de terre crue sont importantes pour l'ensemble des procédés-types. En effet, on a vu que la teneur en eau est le paramètre central de toutes les propriétés mécaniques des éléments composés de terre crue. Les éléments de terre crue durcissent par l'évaporation de l'eau. La résistance acquise par séchage peut ainsi devenir limitante pour la définition de la taille des éléments modelés (levées ou blocs) (voir xxx élévation fraiche), ou pour la superposition de nouveaux éléments posés sur des éléments frais.

La teneur en eau impacte également la décomposition des éléments organiques des mélanges (xxx séchage) et leurs propriétés hygrothermiques (xxx thermique usage ?).

De fait, le séchage peut ainsi devenir limitant dans l'organisation du travail et dans les techniques choisies sur les chantiers de construction en terre crue (xxx séchage). C'est ainsi une des propriétés souvent identifiée au coeur des compromis des choix techniques (xxx conclusions compromis sur la teneur en eau).

6.2.1.2 Retrait-gonflement

6.2.1.2.1 Du retrait élémentaire au retrait matriciel et macroscopique

Au cours du séchage, l'eau retenue sur l'ensemble des surfaces des éléments solides baisse en quantité. Le manteau d'hydratation des éléments solides peut alors disparaître, mais dans un premier temps sont épaisseur décroît. Séparant les composants solides parfois seulement de quelques nanomètres (voir xxx argiles), la réduction de ce manteau entraîne leur rapprochement. Notamment, au cours de la réduction de la teneur en eau à l'interface entre deux solides, le rayon des ménisques capillaires décroît et l'attraction entre eux augmente (voir xxx capillarité), ainsi deux solides éloignés peuvent être significativement rapprochés au cours du séchage (Gögelein et al. 2010). A l'échelle macroscopique, au cours du séchage, le rapprochement élémentaire induit une réduction volumique globale des matrices de terre crue, que l'on nomme *retrait au séchage* (Meimaroglou & Mouzakis 2024).

C’est ainsi que, comme pour la cohésion capillaire, plus la surface développée est importante par unité de volume de solides, plus le volume d’eau maintenu dans les manteaux d’hydratation est important, plus il y aura de rapprochement élémentaire et plus le retrait au séchage macroscopique sera significatif. L’exemple des feuillets argileux est remarquable, puisque la surface développée est considérable relativement à la masse solide. Mais d’autres groupes d’éléments du sol présentent des propriétés de retrait élémentaire, comme les Matières Organiques (MOs) (voir xxx matières organiques).

6.2.1.2.2 Liberté du retrait dans les trois dimensions, taille et forme des éléments

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 de se répercuter directement sur les dimensions de l’élément par la traction réalisée par succion capillaire. 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* 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 dite « massive » (voir xxx techniques intro) présentera un retrait longitudinal contraint : 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 (Vinceslas 2019).

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 développant aux interfaces les moins cohésives : c’est la *fissuration*.

Il est rare que des éléments puissent présenter un retrait libre dans toutes les dimensions, ou qu’ils soient parfaitement contraints. 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 (cas de certains torchis, voir xxx séchage-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 (voir xxx séchage-retrait).

6.2.1.2.3 Teneur en eau

La teneur en eau gouvernant le retrait élémentaire en surface des éléments solides, elle est également centrale dans l'intensité de retrait macroscopique. Le retrait augmente avec la teneur en eau, mais il est possible que cette relation soit exponentielle, en tout cas pour les états saturés (Ji et al. 2023).

En effet, l'augmentation de la teneur en eau réduit forcément la compacité des mélanges à partir de l'état saturé. Pour les mélanges cohésifs, le retrait par évaporation de l'eau permet une certaine réversibilité de cette décompaction. Cependant en pratique cette récupération n'est jamais totale, probablement parce que le retrait n'est jamais complètement libre : une barbotine étalée sur un support large, même antiadhésif, présentera une certaine adhésion et fissurera au séchage au lieu de se rétracter totalement.

Cette observation nous amène à suggérer que plus la teneur en eau est forte, plus la cohésion interparticulaire est faible et plus les forces contraignant la compaction seront impactantes. Le mélange sera comme « moins *tenace* » (voir tenacité xxx), il fissurera au lieu de se rétracter.

Nous avons remarqué que les propriétés relatives à la teneur en eau du sol sont plus aisées à comparer entre différentes terres relativement à des états hydriques plutôt qu'à des teneurs en eau massiques. Il en va de même pour le retrait : généralement, lorsqu'une terre est considérée comme « plus sensible au retrait au séchage » qu'une autre, c'est à *consistance égale* et non à teneur en eau égale. Cette préférence d'unité de comparaison peut être illustrée par la description des propriétés de retrait par Smith & Austin (nous traduisons) :
« Les « colloïdes », qui incluent toutes les particules d'argiles et de limons, sont une seconde cause de retrait au séchage. Ces particules ont une plus grande surface spécifique que les particules de sable pour une même unité de masse. Ainsi, *il faut plus d'eau pour que le sol soit semi-plastique* pour une compaction adéquate [dans une technique-type de pisé], *ce qui induit plus de séchage et un retrait plus important*. » (Smith et Austin, 1989, p. 45)

On peut suggérer que si la *consistance* correspond à *l'état d'hydratation des argiles* (voir xxx états hydriques), alors à consistance égale, plus d'éléments argileux induisent plus d'absorption d'eau donc plus de retrait potentiel.

6.2.1.2.4 Composition

Le retrait des matériaux argileux est le résultat d'interactions complexes entre la matrice d'éléments fins ou argileux et le *squelette solide* et les fluides de la porosité (Meimaroglou et Mouzakis 2024).
Comme suggéré par Smith & Austin (1989), les colloïdes, par leur petite taille et/ou leurs propriétés de charges électroniques, adsorbent de grandes quantité d'eau à leur surface, parfois plusieurs fois leurs masse sèche. De ce fait, ces composants sont ceux présentant le plus grand retrait élémentaire potentiel, et leur présence en quantités significatives favorise le retrait dimensionnel.

Les argiles sont les éléments dont le retrait au séchage est le plus considéré dans la littérature relative à la construction en terre crue. La baisse de la teneur en eau au cours du séchage mène à une augmentation de la succion et des forces capillaires et au resserrage des espaces interfoliaires des agrégats argileux. La quantité finale de retrait-

gonflement dépend ainsi largement de la quantité et du type de minéraux argileux (Meimaroglou & Mouzakis 2024). En général, plus la plasticité des minéraux argileux est grande, plus le retrait au séchage est important.

Les éléments élancés comme les argiles ont également des propriétés de liaison entre granulats ou agrégats de plus grande échelle. Ces liaisons maintiennent les éléments entre eux et favorisent un retrait continu ou macrofissuré plutôt qu'une microfissuration. De plus, l'augmentation de la teneur en eau favorise la dispersion des argiles dans la matrice par la décohésion des agrégats argileux au cours des étapes de mélange (Meimaroglou & Mouzakis 2024), ce qui peut encore amplifier l'effet de la teneur en eau sur le retrait au séchage par un maillage fort du mélange. Selon les conditions de liberté du retrait, ce peut être un atout pour le gain de compacité ou un problème par l'apparition de macrofissures, souvent plus problématiques esthétiquement et peut-être mécaniquement.

Nous avons également remarqué l'impact de la composition ionique de la solution du sol sur le développement du manteau d'hydratation des argiles. Par cet effet, le retrait-gonflement peut être amplifié par la présence d'ions fortement hydratés (Brady & Weil 1984).

Les matières organiques (MOs) sont souvent indiquées comme favorisant le retrait-gonflement par leurs capacités d'absorption d'eau (Husein Malkawi et al. 1999; Maniatidis & Walker 2003; Meimaroglou & Mouzakis 2019).

Comme pour la cohésion, cet impact est variable en présence de minéraux argileux par le développement des complexes argilo-humiques (Brady & Weil 1984; Maniatidis & Walker 2003). On suppose que ces complexes ne réduisent pas l'adsorption d'eau de ces composants, mais qu'en réduisant les propriétés cohésives des argiles (voir complexes argilo humiques cohésion xxx), les matières organiques peuvent augmenter les teneurs en eau nécessaires à l'obtention de la consistance souhaitée et donc, indirectement, le retrait au séchage.

Nous devons cependant souligner, encore une fois, la diversité des MOs et de leurs propriétés. Les présentes considérations pour les MOs doivent probablement concerner la fraction humifère peu cohésive naturellement présente dans les sols ; mais des fibres, comme des racines ou d'autres éléments organiques pourraient au contraire participer à structurer le mélange et réduire le retrait au séchage.

Il ne faut pas négliger l'apport des minéraux fins non argileux dans le retrait gonflement (Ji et al. 2023). Les éléments des classes granulométriques des argiles (F2µm) et des limons (F50µm) sont suffisamment fins pour développer des surfaces considérables et présenter des retraits au séchage significatifs dans des éléments d'échelle métrique, et se cumulent aux propriétés des autres éléments. Seulement, à la différence des éléments argileux, ils sont peu cohésifs, et on suppose que la succion du retrait pourrait ne pas être suffisante pour entraîner un retrait dimensionnel et pourrait plutôt favoriser une micro-fissuration locale.

Enfin, si les éléments les plus fins et actifs ont pour effet de favoriser le retrait potentiel d'une matrice argileuse, les éléments grossiers d'une part, n'y participent que très peu par la faible surface d'hydratation qu'ils développent, et d'autre part favorisent l'apparition d'une continuité du *squelette granulaire* qui entraîne une résistance au retrait spontané

des matrices. Cet effet est assez communément observé : l'ajout de sable ou de graviers à des mélanges de terre crue réduit le retrait au séchage (Klein 2011; CCTC 2018; Ji et al. 2023) et par conséquent l'éventuelle fissuration associée.

Les éléments grossiers réduisent le retrait au séchage par structuration du squelette granulométrique : une microporosité apparaît localement entre entre le squelette par le retrait élémentaire des composants du sol, mais ne se cumule pas en macroporosité. Cependant, les éléments grossiers réduisent aussi la cohésion du mélange. Ainsi, au cours du retrait, on peut se demander si la cohésion perdue ne peut pas *in fine* favoriser la fissuration d'un élément par perte de résistance en traction, réduisant sa capacité à faire du retrait dimensionnel. On peut également se demander dans quelle mesure cette perte de cohésion potentielle se répercuterait sur la résistance finale des éléments. Ces impacts du retrait sur les résistances sont incertains, en interaction avec l'empilement granulaire et la compacité.

La teneur en fibres est généralement identifiée comme réduisant le retrait au séchage (Wolfskill et al. 1970; Norton 1986:38; Harries et al. 1996; Klein 2011; Fabbri et al. 2022; Ji et al. 2023). Leur élancement (voir xxx élancement) assure un effet de maillage, qui :

- force une distribution plus homogène de la porosité dans la matière en cours de séchage : le retrait local lié aux retraits élémentaires existe, mais il est distribué dans une microporosité plutôt que rassemblé en macrofissures. Cet effet semble important dans les éléments au retrait contraint.

- augmentent la résistance en traction des éléments frais (voir résistance fibres xxx), ce qui favorise un retrait dimensionnel plutôt que par fissuration

[xxx vérifier et ajouter les dimensions dans echanges transdis]

Klein (2011) décrit la teneur en fibres d'adobes de différentes dimensions observées en Midi-Pyrennées. Les plus étroits, les adobes « fins », sont le plus souvent « dénués d'apports végétaux ». Les adobes « compacts », plus épais, « peuvent inclure » des fibres, et dans les adobes « épais » les plus massifs, il est indiqué qu'il y a présence de fibres dans « la moitié des briques examinées ». Cette corrélation dans la description entre teneur en fibres et dimensions des briques n'est pas quantitative, mais elle laisse entrevoir une relation de causalité: plus la brique est épaisse, plus l'ajout de fibre permet de protéger contre le retrait non-dimensionnel.

Des essais ont montré que l'influence des fibres sur le retrait dépend de leur longueur: dans l'essai réalisé par Ji et al. (2023), des fibres coupées très finement (1cm et moins) n'influencent pas le retrait, tandis que celui-ci est réduit pour des fibres plus longues (2cm).

On peut suggérer deux explications à la moindre influence des fibres coupées plus courtes. La première possibilité est liée à *l'élancement* réduit des fibres courtes. Leur forme se rapproche d'un « granulat » et ne permet plus le maillage de la matière, par l'« enchevêtrement » des fibres entre elles et avec les granulats. Par exemple, la paille de blé ou le foin sont plus élancées que la chènevotte, elle-même plus élancée que la sciure de bois (source : formation objectif terre. Comment citer ça? Xxx je pourrai citer «Dugelay Samuel 2020, présentation formation objectif terre, Lyon »)

Une autre hypothèse est que la longueur des fibres influence le retrait à l'échelle concernée dans la matrice: des fibres centimétriques permettent la distribution du retrait d'ordre centimétrique (taille des échantillons de l'étude), tandis que des fibres millimétriques réduisent les retraits de l'ordre du millimètre (micro-fissuration), qui ne sont pas évalués dans l'étude de Ji et al. .

Avec cette hypothèse, on pourrait suggérer que comme le « squelette granulaire », le «maillage fibré » d'un mélange de terre crue gagne à se prolonger sur plusieurs échelles de dimensions. Les artisan.es enduiseur.euses connaissent la différence entre l'ajout de paille de blé, de foin, de crottin de cheval ou de bouse de vache : les « fibres » qui composent ces matières sont de plus en plus petite échelle, et l'impact sur le matériau joue à l'échelle de chacune. Dans les deux premiers cas, c'est l'épaisseur de la tige et la taille de hachage qui gouverne son élancement et son échelle d'impact. Dans les deux derniers cas, c'est l'intensité de la digestion des matières cellulosiques par les chevaux et les vaches qui affine la matière à des échelles microscopiques.

Dans le cas des éléments organiques peu élancés, comme la chènevotte broyée, la fissuration est plus probable que pour des fibres élancées comme la paille car la tenacité est moins importante. En revanche, l'augmentation de la fraction volumique de ces fibres est tout de même corrélée à une réduction du retrait au séchage (CCTC 2018), comme pour tout ajout de fibres ou de granulat, probablement par réduction de la teneur en argiles globale.

L'effet bénéfique dépend du retrait des argiles relativement au retrait des granulats organiques ajoutés. Les mélanges très fibrés de terre allégée sont ainsi considérés comme ayant de faibles retraits (Vinceslas 2019).

6.2.1.2.5 Impact sur les propriétés terre crue

L'apparition de fissuration au séchage est donc gouvernée par :
- le retrait élémentaire des solides du sol selon la quantité d'eau retirée (assez symétriquement au gonflement), qui donne le volume total de retrait réparti dans la structure
- la répartition de ce retrait dans la structure, dépendante notamment de la taille et la distribution granulométrique des plus gros éléments qui vont forcer la répartition du retrait dans la microporosité plutôt que par des macrofissures, par un effet structurant. Les gros éléments minéraux, mais aussi les fibres ajoutées au mélange, participent à cette structuration. Pour les éléments finis, la répartition concerne également le rapport entre le retrait dimensionnel de l'élément et la fissuration interne, qui dépend de la liberté de retrait.

Le retrait au séchage est le plus souvent indiqué comme « indésirable » dans les procédés composés de terre crue (Smith & Austin 1989; Gomes et al. 2014; Collectif des Terreux Armoricains 2022; Fabbri et al. 2022; Ji et al. 2023). Parfois, la raison n'est pas précisée. Lorsqu'elle l'est, c'est souvent l'impact négatif sur la résistance mécanique qui est indiqué (Gomes et al. 2014; Fabbri et al. 2022; Ji et al. 2023). La fissuration, ou le retrait impliquant des fissurations pourrait en effet favoriser la prolongation des plans de rupture le long des fissures et de ce fait fragiliser un matériau.

Cependant, d'autres auteur.ices suggèrent que l'apport de compacité permis par le retrait au séchage des éléments composés de terre crue permettrait une amélioration de leurs

résistances mécaniques (Smith & Austin 1989; Kouakou & Morel 2009; Meimaroglou & Mouzakis 2024).

Meimaroglou & Mouzakis (2024) réalisent des essais en compression et en flexion sur des échantillons de mortier de terre crue secs issus de différentes terres aux teneurs et compositions argileuses variables (Figure 60). Pour l'ensemble des échantillons, plus le retrait au séchage est conséquent, et jusqu'à des retraits volumiques de 15 %, plus la résistance mécanique en compression augmente. En revanche, la résistance en flexion augmente puis décroît à partir de 10 % de retrait à cause de la fissuration - ce qui est déjà conséquent.

On apprend premièrement par cette expérience que de très forts retraits au séchage peuvent être bénéfiques pour la résistance en compression, et ce malgré leur fissuration. Les auteur.ices indiquent cependant que la faible influence du retrait sur les résistances mécaniques est probablement due a la petite taille des échantillons. En effet, on suppose que d'une part, ces échantillons de petite taille ont subi un retrait relativement libre favorisant une meilleure compaction par retrait et une faible fissuration, et d'autre part, l'élancement de 1 des essais en compression n'est pas suffisant pour représenter la résistance en compression d'échantillons de terre crue (Pelé-Peltier 2023) (un élancement de 2 est suggéré).

Deuxièmement, l'apport du retrait au séchage n'est pas le même selon le type de contrainte : les contraintes compressives bénéficieront du gain de compacité et seront peu impactées par la fissuration qu'il engendre, tandis que les contraintes extensives seront plus fortement impactées par la fissuration.

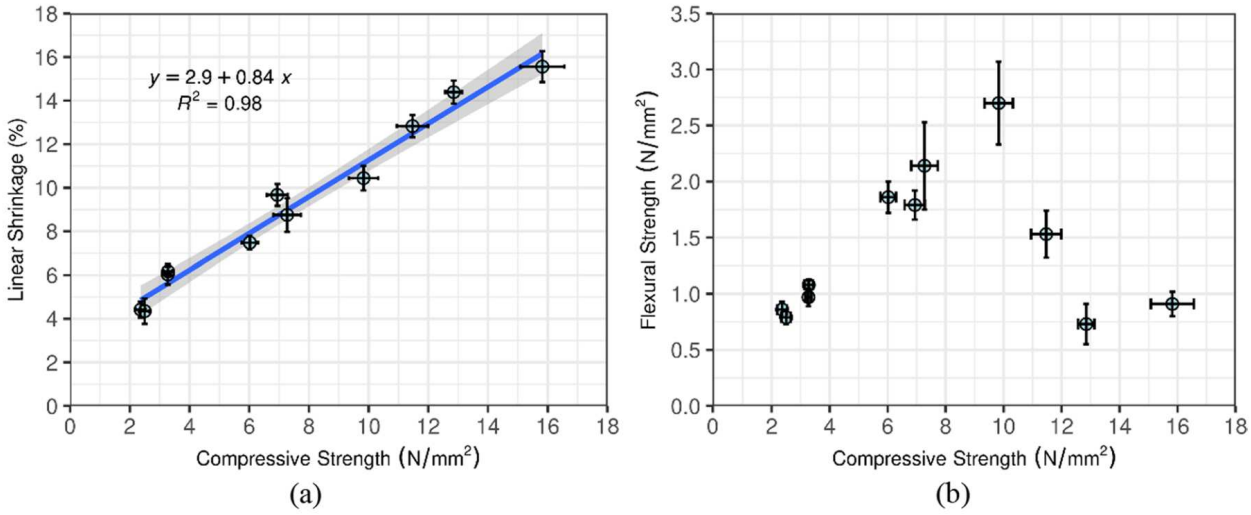


Figure 60 : Relations entre la résistance en compression et a. le retrait dimensionnel et b. la résistance en flexion (Meimaroglou & Mouzakis 2024).

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).

En effet, la transmission du retrait contraint dans une ou plusieurs dimensions à d'autres dimensions est incertaine. Notamment, certaines techniques d'appareillage d'éléments frais (pattons de bauge, gazon) permettent une transmission du retrait longitudinal dans la

hauteur (voir xxx séchage-retrait). De ce fait, l'impact du retrait dépend également de propriétés d'organisation macroscopique des matériaux.

Ces conclusions sont en accords avec les observations de Smith & Austin qui indiquent que les briquetiers interrogés au Mexique obtiennent de meilleures résistances en compression pour des adobes riches en argiles gonflantes. Ils indiquent cependant que de trop grandes quantités d'argiles gonflante donne de « mauvais » adobes par l'apparition de fissures, mais ne précisent pas la variable de « performance » diagnostiquée, qui pourrait être la résistance mécanique en compression, ou la résistance en cisaillement, importante pour le transport des briques, ou encore la qualité esthétique des adobes, probablement importante dans ce cas pour la commercialisation des briques.

Les propriétés des matériaux composés de terre crue sont souvent bien plus résistantes en compression qu'en extension, leur usage en tant que matériau porteur est donc généralement réservé aux contraintes compressives. Au vu de l'impact du retrait au séchage sur les propriétés compressives, on peut suggérer que l'apparition de fissures dans des éléments porteurs n'est pas forcément problématique. Ainsi, si le retrait et/ou la fissuration sont souvent indiqués comme problématiques d'un point de vue résistance mécanique, à notre connaissance aucune étude ne le démontre.

Certain.es artisan.es suggèrent que l'impact du retrait ne soit pas significatif sur la mécanique et soit plutôt de l'ordre de l'esthétique (Rinino 2021).

L'impact sur le rendu esthétique est évident, mais sa « valeur » est en revanche une question d'interprétation relativement subjective. Pour autant, ce n'est pas une raison pour ne pas la prendre en compte, d'autant plus dans un contexte où les freins à l'adoption du matériau terre sont principalement « culturels » (Pelé-Peltier 2023) (voir xxx intro freins). La question de l'esthétique sera traitée au chapitre xxx (xxx liberté plastique, esthétique… etc.)

Enfin, des témoignages d'artisan.es nous font également suggérer que l'impact du retrait au séchage pourrait réduire des performances isolantes, acoustiques ou thermiques. Ici aussi, une bonne conception architecturale peut permettre de résoudre les désordres potentiels liés au retrait au séchage (voir xxx séchage-retrait).

Plusieurs normes et guides suggèrent des retraits maximum pour les techniques de terre crue, par exemple 2.5 % pour les mortiers (DIN 18946, dans (Meimaroglou & Mouzakis 2024)) et 5 % pour le pisé [ref a voir, dans (Meimaroglou & Mouzakis 2024)). Pourtant, l'augmentation des résistances en compression des éléments étudiés par Meimarloglou et Mouzakis continuait malgré des retraits au séchage de l'ordre de 15 %. Appliquer des limites maximales de retrait acceptable pour des éléments de terre crue, indépendamment de précisions sur les conditions de retrait (taille, forme et liberté de retrait) et les performances objectif (mécanique compressive ou extensive, esthétique) paraît donc hasardeux.

Pour des adobes pressés, Kouakou & Morel (2009) ont montré que l'optimum mécanique n'était pas l'optimum de densité obtenu au cours d'un essai Proctor (voir compaction xxx), mais légèrement décalé vers de plus fortes teneurs en eau, montrant l'impact du retrait sur la densification. Les essais étant comme souvent réalisés à des intensités de mélange presque « parfaites », on peut penser qu'en pratique, l'optimum pourrait être encore plus

décalé vers de fortes teneurs en eau, facilitant la mobilisation des argiles (voir xxx compromis mélange-compaction-retrait).

Dans les procédés de construction en terre crue, on se préoccupe généralement du retrait et peu du gonflement, car le gonflement advient principalement à l'étape de mélange (ou avant) et la réorganisation qu'il apporte est destructurée au cours de cette étape, le rendant « invisible ». A l'opposé, le retrait s'effectue sur un élément « final », la fissuration est visible et non remaniée. En revanche, il peut être intéressant de considérer le gonflement dans l'exposition d'éléments composés de terre crue à l'eau (remontées capillaires, précipitations), car la répétition de retrait-gonflements pourrait favoriser l'apparition de fissuration (Collectif des Terreux Armoricains 2022). Cependant, ici encore, l'apparition de ces fissurations et leur impact sur les propriétés mécaniques des éléments sont incertain.es.

On peut considérer que le gonflement à l'hydratation est gouverné par :
- le potentiel de gonflement élémentaire des solides du sol à la quantité d'eau ajoutée, liée comme le retrait à leur rétention d'eau ;
- la porosité du mélange : si le mélange contient une porosité, celle-ci peut faire « tampon » et absorber une partie de la déformation liée à l'hydratation des colloïdes.

[a supprimer? xxx]
La dynamique d'hydratation et de séchage des mélanges composés de terre crue et des sols naturels n'est pas symétrique, entraînant un phénomène d'hystérésis (voir xxx ressuyage). Au cours de la pénétration de l'eau dans le sol des bulles d'air peuvent être piégées dans la porosité. Elles occupent alors un volume qui réduit la teneur en eau pour un même « état d'hydratation » des surfaces. Ce phénomène participerait au gonflement des sols, notamment les moins perméables comme les sols argileux (Brady & Weil 1984)

« The swelling is due in part to water moving between crustal layers, resulting in intracrystal expansion. But most of the swelling is accounted for by water attracted to ions adsorbed by the clays and by tiny air bubbles entrapped as water moves into the extremely small pores of these soils. » (Brady & Weil 1984)

La modification de la structure du mélange à l'hydratation n'est pas entièrement réversible : les éléments se réarrangent au cours des mouvements. Notamment, le retrait peut se faire par agrégation locale des éléments du sol et notamment des argiles (Nimmo & Park 2004). Cette agrégation peut être de différentes échelles selon la composition du mélange, mais souvent, la porosité fine remplie d'eau du mélange hydraté initial se rétracte au profit d'une macroporosité : des fissures apparaissent entre des zones de plus grande densité. C'est ce qu'on observe sur de la boue de sols argileux, qui craquelle lors des sécheresses (Brady & Weil 1984). A l'échelle d'un élément de terre crue, une fissuration peut alors apparaître après un épisode de gonflement, et la répétition de ce phénomènes, connue pour structurer les sols naturels, est probablement peu désirable dans les murs composés de terre crue.
« After a prollonged dry spell, soils high in montmorrillonite often are criss-crossed by wide, deep cracks which, at first, allow rain to penetrate rapidly (Figure 5.18). But later, because of swelling, such a soil is likely to close up and become much more impervious than one dominated by kaolinite. » (Brady & Weil 1984)

6.2.1.2.6 Mesure

Le retrait d'un mélange composé de terre crue est réalisé via des procédures relativement simples : un échantillon de mélange remplit un moule de dimensions standard et est placé sur une surface antiadhésive. Après séchage, la variation de l'ensemble des dimensions est mesurée et comparée en pourcentage des valeurs initiales. Malgré que la propriété de retrait soit souvent indiquée comme importante, celui-ci est rarement mesuré, et les procédés d'évaluation sont nombreux et varient sur de nombreux paramètres : taille des éléments, teneur en eau, compaction appliquée (Meimaroglou & Mouzakis 2024).

Certaines auteur.ices (par exemple, (Silva et al. 2013)) définissent la *limite de retrait-gonflement* (LR) comme la teneur en eau à partir de laquelle toute incrémentation supplémentaire de teneur en eau fait varier le volume d'un élément de terre crue. Par la suite d'autres indicateurs peuvent être proposés en comparaison aux indicateurs de plasticité, par exemple l'index de retrait IR = LL – LR.

En effet, on a vu l'impact de la présence d'un squelette granulaire ou de l'apparition d'une structure agrégée sur la limitation du retrait à partir d'une certaine teneur en eau, ce qui peut être interprété comme une « limite de retrait » (Ji et al. 2023).

Cependant, au vu des mécanismes identifiés impactant le retrait, cette limite semble dépendre de la densité du mélange, de son homogénéité, et de la liberté de retrait des éléments au cours du séchage. Une telle valeur obtenue par un test non standard n'a donc ni de valeur comparative entre deux terres, ni de valeur absolue relativement aux propriétés du mélange. En revanche, comme pour la limite de plasticité, l'intérêt d'une telle mesure peut se trouver dans une comparaison relative entre des « potentiels de retrait » de différents sols, mais n'est pas une mesure absolue d'un état « sans retrait ».

6.2.2 Compaction

6.2.2.1 Compaction, consolidation : description et définitions

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.

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 (fig. xxx a.). 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, 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)

Puisque la compaction en milieu insaturé rapproche systématiquement le mélange de la saturation et que l'eau est incompressible, une compaction est soit limitée par la saturation, soit prolongée dans la consolidation. Dans une étude de Kouakou & Morel (2009), la compression forte de blocs d'adobes à l'aide d'une presse permet de densifier le matériau, mais uniquement jusqu'à une certaine teneur en eau, proche de la saturation, car leur presse n'est pas suffisamment perméable à l'eau pour permettre son évacuation.

Une fois les éléments séchés, les résultats de compacité et de résistance mécanique sont équivalents que pour les adobes moulés à faible compression (Figure 63). Ainsi, sans possibilité de consolidation, à partir de l'atteinte de la saturation peu importe la force appliquée : la compaction est impossible sans consolidation.

La consolidation est peu rencontrée dans les procédés de mise en œuvre de terre crue et on considérera désormais, sauf précision, que les contraintes de compaction sont limitées par la saturation.

L'augmentation de la compacité augmente les forces de cohésion et de friction, et de ce fait la résistance du mélange. Au cours d'une contrainte compactante, si la résistance devient supérieure à la force appliquée, la déformation s'arrête. Il existe ainsi une *compacité d'équilibre* du mélange relativement à une force de compression donnée. Si le mélange atteint la saturation, et en l'absence de consolidation, il n'y a pas de compacité d'équilibre : si la force est maintenue la déformation se poursuit à compacité égale, c'est une *déformation* (voir xxx déformation). Ainsi, de manière générale, plus un mélange est compacté proche de la saturation, plus le ratio compaction/déformation sera bas, en d'autre termes, plus l'énergie ira vers de l'homogénéisation par brassage de la matière plutôt que vers sa compaction. Dans les techniques-types de pisé, lorsque le mélange est mis en oeuvre trop proche de la saturation, l'effort compressif entraîne un « déplacement latéral de la terre » (PHUNG 2018).

Encore plus proche de la saturation, c'est également au niveau de cette transition compaction-déformation que se situent les techniques de mélange par poinçonnement des procédés type bauge (voir xxx mélange). Le mélange est à la fois l'occasion de gain de compacité que d'homogénéisation par déformation.

La compacité d'équilibre est approchée de manière asymptotique lorsqu'une la force est maintenue. L'état d'avancement de la compaction, c'est à dire l'approche de l'état d'équilibre n'est pas gouverné par la force mais par l'*énergie appliquée* au mélange. Si la compacité d'équilibre dépend d'un seuil de cisaillement, l'énergie appliquée pour s'en approcher dépend de la fermeté du mélange. Cette progression asymptoyique est valable pour les éléments de terre crue comme pour les sols naturels, où il a été observé que 90 % du tassement d'un sol subissant plusieurs passage d'engins forestiers survient dès le premier passage, dans un progression logarythmique (Girard et al. 2017).

[cit a vérifier]

6.2.2.2 Compaction statique, compaction dynamique

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, 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 vibrations dans l'élément compacté ou dans l'outil. Lorsque le mélange approche de la compacité d'équilibre, la plupart de l'énergie de compaction est dissipée dans les vibrations induites par le comportement élastique, 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 : plus le son est puissant et stable, plus on approche de la compacité d'équilibre.

Si la *consolidation* est peu rencontrée dans les procédés de construction en terre crue, c'est parce que l'énergie nécessaire à l'évacuation de l'eau est bien plus conséquente que pour l'évacuation de l'air : la rapidité d'évacuation de l'eau est gouvernée par les lois de porosité hydraulique (Mitchell & Soga 2005), qui indiquent que plus les pores sont fins, plus la vitesse d'écoulement est lente. Cette vitesse d'évacuation est donc assez faible dans les mélanges argileux et la consolidation nécessite de maintenir la force plus longtemps en place, donc plus d'énergie consommée.

Enfin, pour des éléments finis non confinés, la compaction résultant de la contrainte compressive dépend de l'extension latérale plastique, ou de l'occurrence d'un comportement de rupture, qui peut advenir avant la *compacité d'équilibre* de la force appliquée.

6.2.2.3 Impact de la teneur en eau : optimums de compaction

La compacité d'équilibre est atteinte lorsque les forces de friction et de cohésion entre les éléments solides et la pression de l'air compacté dans la porosité équilibrent les forces compressives. On a vu que lorsque la teneur en eau augmente depuis l'état sec, les forces de friction et de cohésion sont réduites. Les seuils de cisaillement, ainsi que les fermetés des mélanges baissent, et avec eux la compacité d'équilibre et la compacité atteinte pour une même énergie appliquée. Pour une force donnée, on assiste donc dans un premier temps à une augmentation de la compacité avec la teneur en eau. Dans un second temps à l'approche de la saturation, l'air initialement présent dans la porosité est en moindres proportions, et pour une même augmentation de compacité la pression de l'air augmente plus rapidement. La compacité d'équilibre, et l'énergie nécessaire baisse progressivement avec l'augmentation de la teneur en eau (Kouakou & Morel 2009).

Lorsque l'on applique une force et énergie identique à un mélange de terre crue en variant la teneur en eau, apparaît alors un optimum de gain de compacité lorsque la résistance en cisaillement est suffisamment basse et la teneur en eau n'est pas trop forte. La teneur en eau de cet optimum est appelée *optimum de compaction*.

Dans l'étude des propriétés de compaction des sols insaturés, on emploie généralement un outil permettant une compaction dynamique standardisée : la dame *Proctor*. La force appliquée est normalisée car la hauteur de chute de la dame est constante. L'énergie est également constante lorsque le nombre de coups appliqués est constant par unité de surface.

[xxx une ref pour le nb de coup a envoyer?]

Lorsque l'on emploie cet outil pour compacter des éléments de terre crue, l'optimum de compaction est appelé *optimum Proctor*. Il est obtenu par interpolation du maximum de compacité obtenu entre plusieurs échantillons testés à différentes teneurs en eau, sur un diagramme de *densité* en fonction de la *teneur en eau massique*.

Plusieurs études montrent que la teneur en eau de l'optimum Proctor est souvent linéairement corrélée à la teneur en eau de la limite de plasticité (LP). Il apparaîtrait à environ 0.9*LP (Barnes 2013b). La présence de l'optimum proctor juste avant la limite de plasticité s'explique par une plus faible teneur en eau permettant la compaction par évacuation de l'air, tout en maintenant une résistance suffisamment faible pour permettre le glissement des éléments les uns par rapport aux autres.

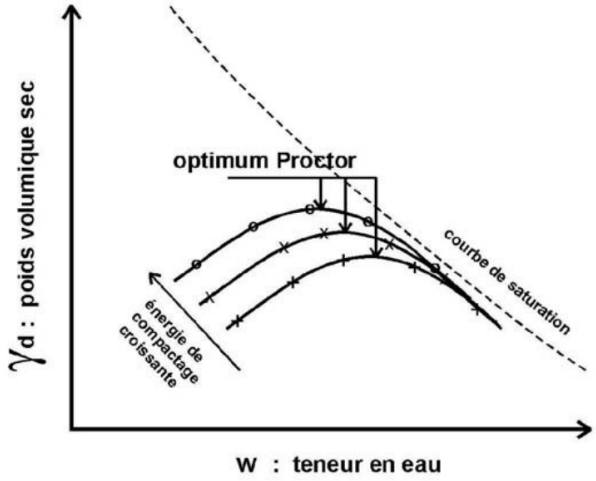


Figure 61: Optimum de compacité type Proctor en fonction de l'énergie appliquée au mélange (Bui et al. 2009). A droite, la compaction est limitée par la saturation et l'incompressibilité de l'eau. A gauche, elle est limitée par la fermeté du mélange, mais un ajout d'énergie permet d'augmenter la compacité atteinte.

Si le nombre de coups appliqués par la dame Proctor augmente, l'énergie appliquée augmente. A l'augmentation de l'énergie appliquée, l'augmentation de compacité est faible côté « humide » puisque limitée par la saturation de la teneur en eau qui dissipe l'énergie appliquée de manière élastique. En revanche, côté « sec », elle augmente plus fortement. C'est ainsi que la teneur en eau de l'optimum de compaction décroît avec l'augmentation de l'énergie appliquée (Figure 61). Dans un mélange de même composition solide, pour une contrainte de force et d'énergie importante, la teneur en eau optimale de compaction est plus faible que pour une contrainte faible (Bui 2008; Bruno et al. 2016; Xu et al. 2021).

L'énergie nécessaire par unité de compacité gagnée est croissante à mesure que la compacité augmente (voir xxx fermeté). Le recul de l'optimum de compaction et l'augmentation de compacité maximale associée augmente donc de manière logarithmique : il faut décupler la force et l'énergie de compaction pour doubler la compacité (Bruno et al. 2016).

Xu et al. (2021) montrent que pour une terre donnée, l'optimum de compaction pour des essais statiques ou dynamiques est toujours situé à un même pourcentage de saturation. L'énergie de compaction (*Compaction Energy Level*) ou la force appliquée peut varier, mais le pic sera toujours sur la même ligne d'équi-saturation. Cette observation est valable pour une même terre et uniquement si les courbes d'optimum sont chacune réalisées à

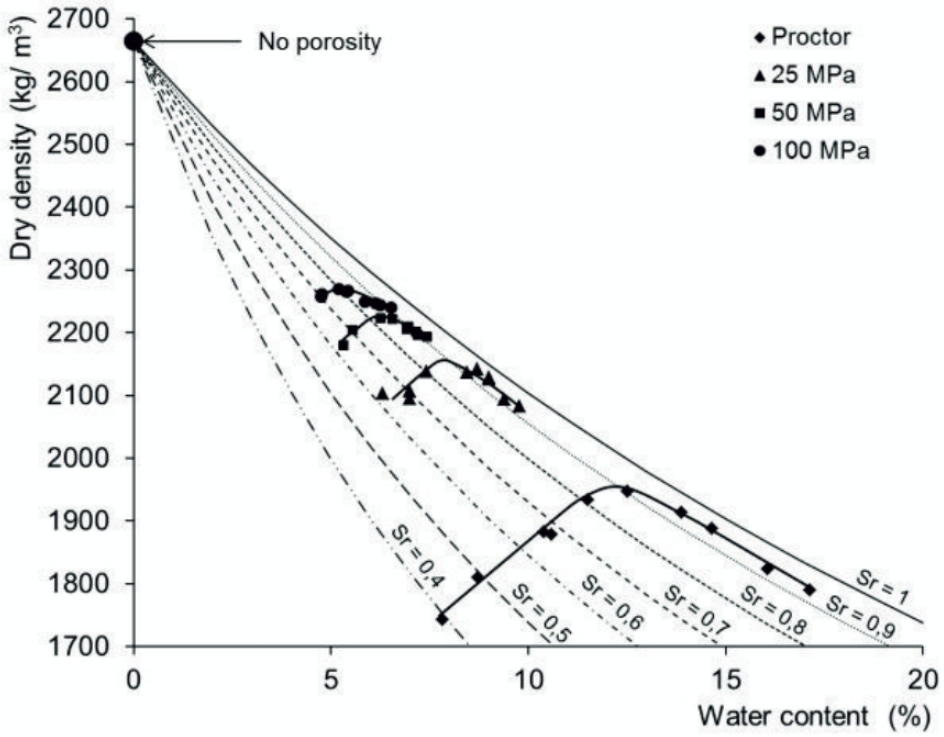


Figure 62 : courbes d'optimums de compaction obtenues pour un essai proctor et des essais de compaction statique à 25, 50 et 100 MPa (Bruno et al. 2016). Pour les compactions statiques, l'énergie de compaction n'est pas précisée, mais il est indiqué que l'essai est arrêté après un temps de consolidation (compaction par évacuation de l'eau). On peut supposer que l'énergie est donc très importante, au moins proportionnelle a l'augmentation de force.

énergie constante.

Sur la Figure 62 par exemple, la compaction donne un optimum Proctor légèrement inférieur à 90 % de saturation. Cependant, l'optimum de compaction des éléments « hypercompactés » se déplace vers de moins fortes saturations, et atteint environ 80 % à 100 MPa. En effet, Bruno et al. (2016) ne compactent pas à énergie constante, mais à l'atteinte d'un équilibre de force, comme fréquemment dans les compactions statiques (Zhemchuzhnikov et al. 2015; Xu et al. 2021). C'est peut-être la raison du déplacement de l'optimum vers de plus faibles teneurs en eau.

Le point correspondant à la densité propre des solides, comme densité théorique maximale, est le point où se rencontrent les lignes d'équi-saturation (Figure 62). Il correspond à l'angle supérieur, de compacité maximale, du diagramme volumique. D'autre

part, la saturation est représentée selon la teneur en eau massique. Dans les deux cas, ces indications ne seraient pas valables pour comparer deux mélanges différents : la densité propre serait différente, comme la distribution de la saturation. La normalisation de la densité par la densité propre de mélanges de terre crue différents donne leur compacité, permettant leur représentation dans un diagramme de phases volumiques commun. Sa représentation et son utilisation pourraient également être plus aisée, par la représentation de lignes d'équi-saturation droites (voir Figure 38).

6.2.2.4 Compacité maximale, compactabilité

La compacité maximale théorique d'un sol peut être définie de deux manières. Si l'on considère qu'il n'y a pas de rupture des granulats du sol, il s'agit de la compacité atteinte par l'empilement granulaire le plus adéquat du sol, qui ne peut être qu'approché en pratique car les grains sont distribués aléatoirement (voir xxx empilement granulaire). Si l'on considère que la compaction peut rompre les solides, alors la compacité maximale serait égale à la densité propre des solides (Bruno et al. 2016). Pour atteindre la densité propre par compaction, il faudrait rompre l'ensemble des solides et évacuer l'ensemble de l'eau ce qui demanderait des forces et énergies impossibles à atteindre en conditions réalistes (Bruno et al. 2016). En pratique, en atteignant de fortes compacités il est probable qu'il y ait rupture d'une partie des éléments, notamment lorsque leur résistance propre est faible, comme par exemple les éléments calcaires et les roches dont la dégradation est entamée (voir xxx rupture des solides). La progression de la compaction vers de fortes compacités pourrait n'être qu'une suite de transitions entre arrangement et rupture des agrégats et progressivement des éléments solides.

La compactabilité est un terme qui peut recouvrir plusieurs sens. Il peut être utilisé pour définir la compacité maximale atteignable au cours d'une contrainte donnée atteinte à la teneur en eau d'*optimum de compaction*; la compacité maximale atteignable théoriquement pour l'empilement granulaire parfait théorique des solides du mélange ; ou encore une « facilité de compaction » qui représenterait finalement une ouvrabilité à la compaction pour un procédé donné (voir ouvrabilités xxx). On parlera par la suite de *compactabilité* comme la compacité à l'équilibre pour une force donnée, c'est à dire la compacité atteinte sous une contrainte de force donnée mais à énergie infinie (incluant la consolidation). C'est l'« arrangement granulaire » compact spontané.

6.2.2.5 Compromis compaction mécanique – compaction par retrait au séchage

Nous avons décrit deux processus au cours desquels les éléments finis composés de terre crue peuvent gagner en compacité. La compaction est le plus évident. 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 (voir retrait xxx). Cet effet est peu considéré dans les études relatives à la mécanique des matériaux composés de terre crue, mais il n'est pourtant pas négligeable. Les essais réalisés par Kouakou & Morel sur des éléments composés de terre crue mis en œuvre à des teneurs en eau variées, correspondant à des teneurs en eau types de trois techniques de construction en terre crue (adobes, adobes compressés, BTC), permettent de le visibiliser.

Les éléments sont mis en œuvre à différentes intensités de compression, et l'optimum de compaction humide est obtenu pour chacune des trois techniques. Puis, la densité sèche est mesurée. Les briques présentant de fortes teneurs en eau gagnent plus de densité au cours du séchage que les briques les plus sèches. Ainsi, le « pic » de densité correspondant à l'optimum de teneur en eau sec est décalé vers les teneurs en eau humides, relativement au pic de densité sèche (Figure 63). C'est également la raison pour laquelle les échantillons les plus hydratés ont des densités supérieures à la courbe de saturation théorique de la terre pour ces teneurs en eau, et que l'éloignement des

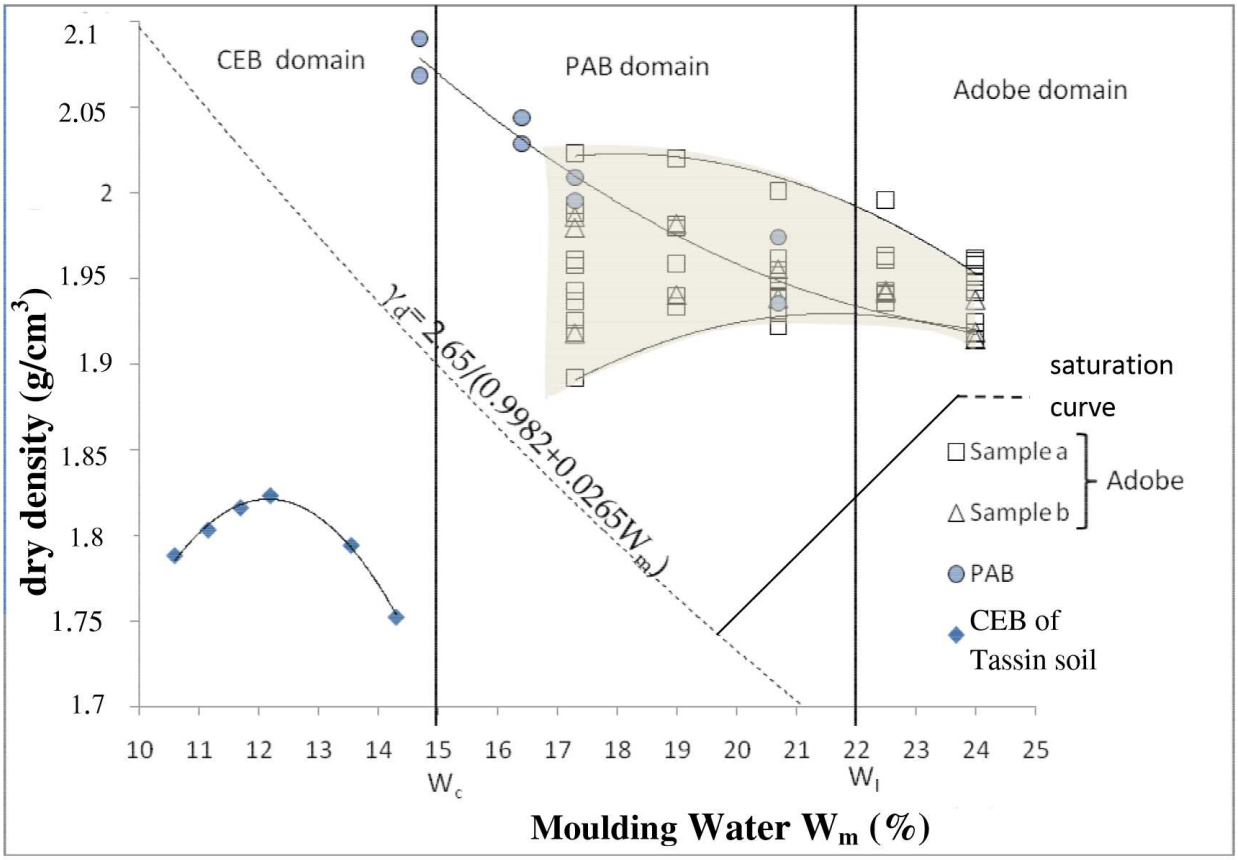


Figure 63 : Densité sèche d'éléments de terre crue mis en œuvre selon trois techniques-types différentes, selon leur teneur en eau de modelage (Kouakou & Morel 2009). Les carrés et triangles sont mis en œuvre selon la technique des adobes, les ronds selon une technique d'« adobes compressés », les losanges selon une technique de BTC (voir techniques xxx intro). Les BTCs sont issues d'une terre différente.

échantillons à cette courbe augmente avec la teneur en eau de mise en œuvre (Kouakou & Morel 2009).

La même observation peut être réalisée sur les échantillons testés par Bruno et al. (2016). Les échantillons compactés à forte teneur en eau semblent presque aussi denses, voir plus denses, que les échantillons à l'optimum de compaction (Figure 64). On regrette cependant de ne pas pouvoir identifier précisément les échantillons, 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.

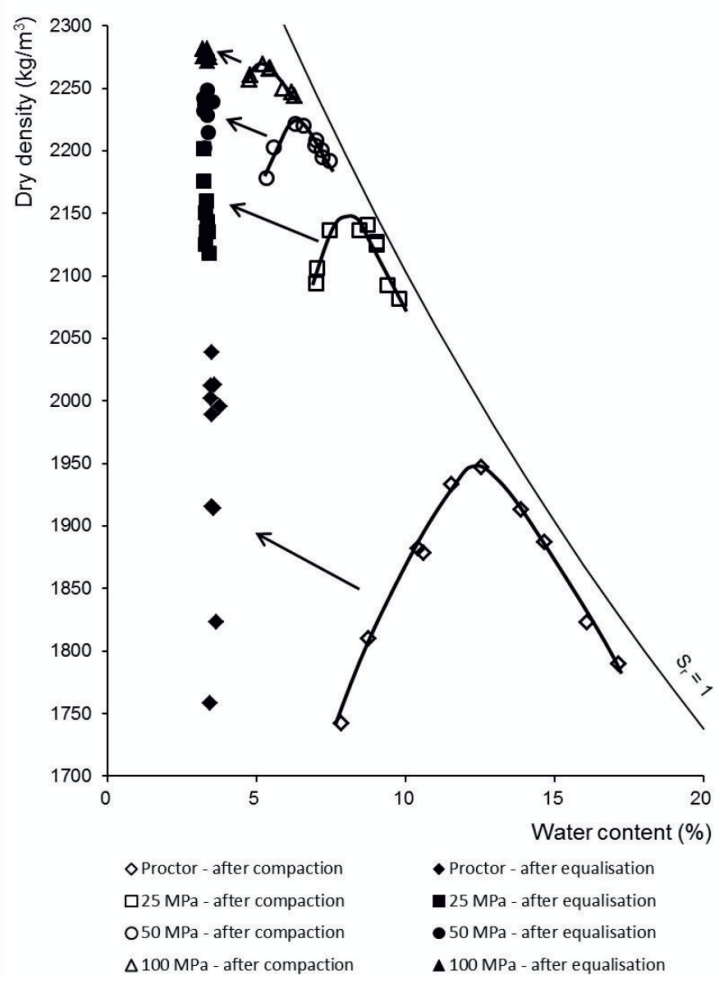


Figure 64 : densité et teneur en eau fraîche et sèche d'échantillons de terre crue compactés à différentes forces en variant les teneurs en eau de modelage (Bruno et al. 2016). Plus la teneur en eau initiale est forte, plus le gain de compacité des échantillons semble conséquent.

Kouakou & Morel concluent que l'optimum Proctor mesuré à l'état humide, issu des essais géotechniques, n'est pas adapté aux matériaux de construction en terre crue : si pour les travaux de terrassement, les matériaux restent relativement humides en profondeur tout au long de l'année, ce n'est pas le cas des éléments de terre crue, qui plus est sont parfois plus argileux et donc présentent plus de retrait. L'optimum proctor classique est donc un optimum de compacité et donc probablement de résistance mécanique *fraîche*, mais pas exactement celui de compacité et donc de résistance *sèche*.

C'est pourquoi c'est la densité sèche qui est aujourd'hui mesurée pour estimer l'optimum de compaction dans la recherche académique relative à la terre crue.

[c'est ç l'optiùmum proctor modifié?]

Les auteur.ices proposent une illustration de l'effet du retrait au séchage sur une matrice composée de grains et de plaquettes d'argile (Figure 65), à forte teneur en eau (a) et

faible teneur en eau (c). Le retrait au séchage est plus important dans le premier cas (b) que dans le second (d), mais la porosité finale reste plus importante dans le premier cas car l'ensemble du retrait ne se fait pas que par gain de compacité mais également par gain de macroporosité au profit de la microporosité de la matrice remplie d'eau (b). On a vu que la *liberté* de retrait ainsi que l'organisation des éléments du « squelette granulaire » influait sur la répartition entre la fissuration et le retrait dimensionnel des éléments. Les éléments de taille réduite que représentent les adobes de Kouakou & Morel permettent d'obtenir du retrait dimensionnel, mais dans les deux procédés testés, lorsque la teneur en eau réduit, c'est le procédé compacté qui obtient la plus grande densité finale. L'arrangement granulaire permis par la compaction dynamique permet peut-être une organisation compacte que ne permet pas le retrait au séchage, même libre.

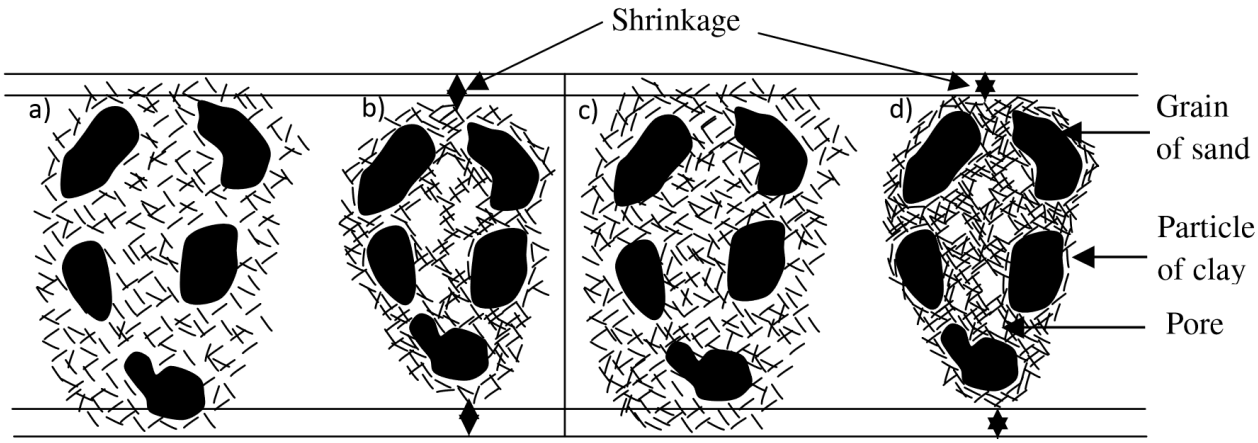


Figure 7

Figure 65: Effet du retrait au séchage sur une matrice composée de grains et de plaquettes d'argile, à forte teneur en eau (a) et faible teneur en eau (c). Le retrait au séchage est plus important dans le premier cas (b) que dans le second (d), mais la porosité finale reste plus importante dans le premier cas car l'ensemble du retrait ne se fait pas que par gain de compacité mais également par gain de macroporosité (b).

En revanche, en l'absence de liberté de retrait, dans un matériau supposé continu, la compacité globale ne peut augmenter avec le retrait au séchage, et c'est seulement un gain de macroporosité qui est observé.

Le gain de compacité permis par le retrait au séchage ne doit pas être négligé. Il apparaît comme central pour les techniques d'éléments préfabriqués aux teneurs en eau proches de la saturation, comme les adobes.

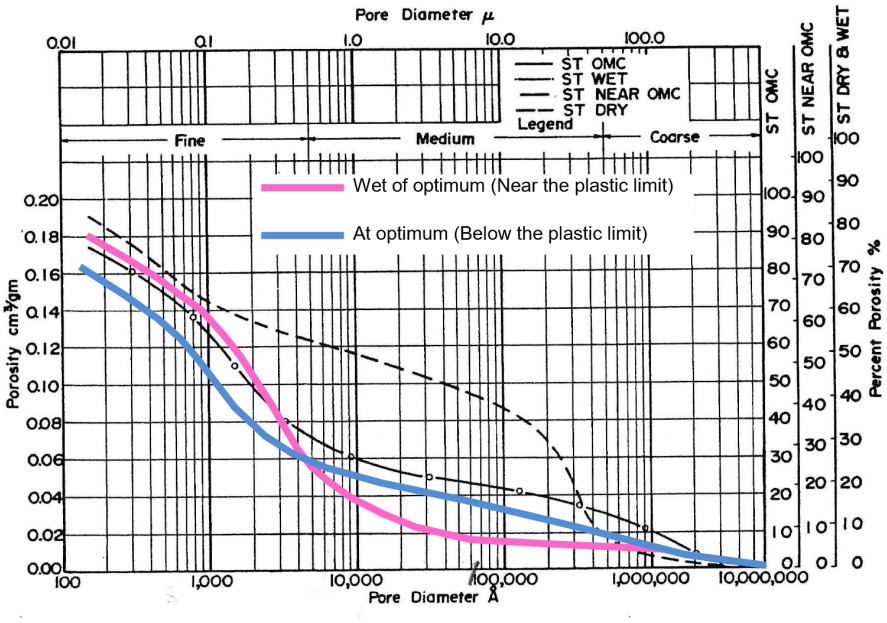


Figure 3.16 *Pore size distributions of statically compacted (ST) samples of illite* (From Ahmed *et al*, 1974)

Figure 66: Courbe de distribution cumulée des tailles des pores d'échantillons d'argile (illite) compactés statiquement à différentes teneurs en eau.

Identification des courbes : ambigu. S'est-il trompé ?

Non : figure ici https://archive.org/details/poresizesstrengt00ahme/page/n69/mode/2up?view=theater

- la courbe ------ correspondrait à dry

- la bleue serait l'Optimum

- la rose la LP

- la courbe -o-o-o correspondrait à wet

→ j'aurais inversé rose et bleu, ça serait plus logique : plus la terre est sèche, plus la porosité atteinte est grossière. Sèc : très à droite, proctor (rose) : milieu-bas, LP (bleu) : plus à gauche porosité plus fine compactée, et mouillé, même chose mais un peu moins partout.

6.2.2.6 Compromis compacité/succion de l'élément frais

Le gain de compacité au cours de la compaction se faisant par réduction de la teneur en air, il y a augmentation de la saturation. Or, on a vu que la cohésion des mélanges de terre crue baissait à l'approche de la saturation par perte de cohésion capillaire. Ainsi, on observe dans certaines conditions, pour des milieux mis en œuvre proche de la saturation (p. ex. bauge) que lorsque le mélange est vibré il se compacte sous son propre poids et peut temporairement perdre en cohésion et s'affaisser. Cet affaissement communément

appelé « ventre » arrive par exemple lors de la compaction dynamique d'éléments frais sur une autre levée fraîche ou plus loin sur la même levée : les vibrations induites par l'absorption élastique de l'énergie de compaction de la mise en œuvre en cours se propagent et entraînent une « vibrocompaction » et l'affaissement, appelé « rhéofluidification » (CCTC 2018)

Le phénomène inverse est observé dans un mouvement cisaillant décompactant un mélange de terre crue. On peut l'observer sur une plage de sable fin lorsque le sable humide « sèche » sous le poinçonnement des pieds : sa désorganisation fait entrer l'air et apporte ainsi de la cohésion capillaire, qui le raffermit.

Si le mélange est loin de la saturation, la compaction impacte principalement la macroporosité [xxx a vérifier], qui ne participe pas à la cohésion capillaire pour de faibles teneurs en eau (voir cohésion capillaire xxx). Il n'y a donc pas de perte conséquente de cohésion, voir même, création de liens capillaires dans la microporosité créée. En revanche, il y a bien augmentation de la friction. La résistance est ainsi favorisée.

[XXX → sur le triangle, peut être rempontée forte de la courbe force le long de saturation ? En U exagéré.]

6.2.2.7 Compaction spontanée : tassement

Comme pour les déformations spontanées à compacité égale, la gravité peut faire varier la compacité d'un mélange. Cet effet est évident lorsque le mélange consiste à soulever de la terre dans l'air : celle-ci retombe au sol, ce qui maintient une compacité minimale. A l'ajout de matière sus-jacente, un mélange de terre se compacte sous la masse des éléments supérieurs. On peut supposer que l'initiation du mouvement de tassement est ici encore un équilibre entre la résistance mécanique du mélange et la contrainte appliquée par la gravité. Comme pour les déformations spontanées, la gravité est une force constante à énergie infinie : tant que la compacité n'atteint pas la compacité d'équilibre, le tassement continue.

Le tassement est observé sur les mélanges foisonnés, mais également les éléments finis en cours de séchage : sous contrainte de gravité, le retrait au séchage est favorisé dans la dimension de la hauteur de l'élément (CCTC 2018).

Finalement, le tassement diffère de la compaction par son caractère spontané. Lorsque la compacité est recherchée et obtenue activement, on parle de compaction.

6.2.2.8 Impact de la composition sur la compaction et la compactabilité

6.2.2.8.1 Granulométrie et empilement granulaire

La compacité atteinte au cours d'une contrainte de compaction d'un mélange de terre crue dépend de sa *compactabilité*. La compactabilité est favorisée par un *empilement granulaire* adéquat (PHUNG 2018; Dialmy et al. 2023) (voir empilement des solides xxx).

Cucurullo et al. (2021) suggèrent que la résistance mécanique en compression est mieux corrélée à la *distribution granulométrique* qu'à la *taille moyenne* des éléments du sol pour les sols compactés, quelque soit l'intensité de la compression.

L’étude de Cucurrullo et al. clarifie un débat sur l’influence de la granulométrie sur le potentiel de résistance mécanique des éléments de terre crue : les fractions granulométriques isolées ne sont pas des bons indicateurs quand aux potentiels de résistance mécanique, car c’est en relation les unes par rapport aux autres qu’elles interagissent pour donner la compactabilité, donc la compacité, qui elle apporte de la résistance mécanique. Cela explique l’échec de l’amélioration des propriétés de la terre par reformulation de la granulométrie (ajout ou tamisage) quand elle a pour objectif de faire rentrer une classe granulaire dans les standards : l’effet n’est pas forcément celui attendu. Au contraire, ajouter une fraction granulaire étroite risque de rompre la continuité de l’empilement (voir figure xxx chapitre 1).

Cependant, cette étude manque d’échantillons et mériterait d’être complétée afin de conclure sur un rapport plus clair entre la distribution granulométrique et les potentiels mécaniques. Notamment, cette étude n’invalide pas le fait que l’augmentation de la taille moyenne des solides du sol serait positivement corrélée à une facilitation de la compaction par une réduction de la résistance mécanique fraîche du sol, qui pourrait expliquer la préférence des techniques compactées pour les sols grossiers.

En effet, en pédologie agronome, les sols à fortes teneurs en limons ou en sables fins sont considérés comme les plus sensibles à la compaction (Girard et al. 2017), combinant à la fois une bonne compactabilité par un empilement granulaire potentiel adéquat, et une faible résistance en cisaillement à l’état humide.

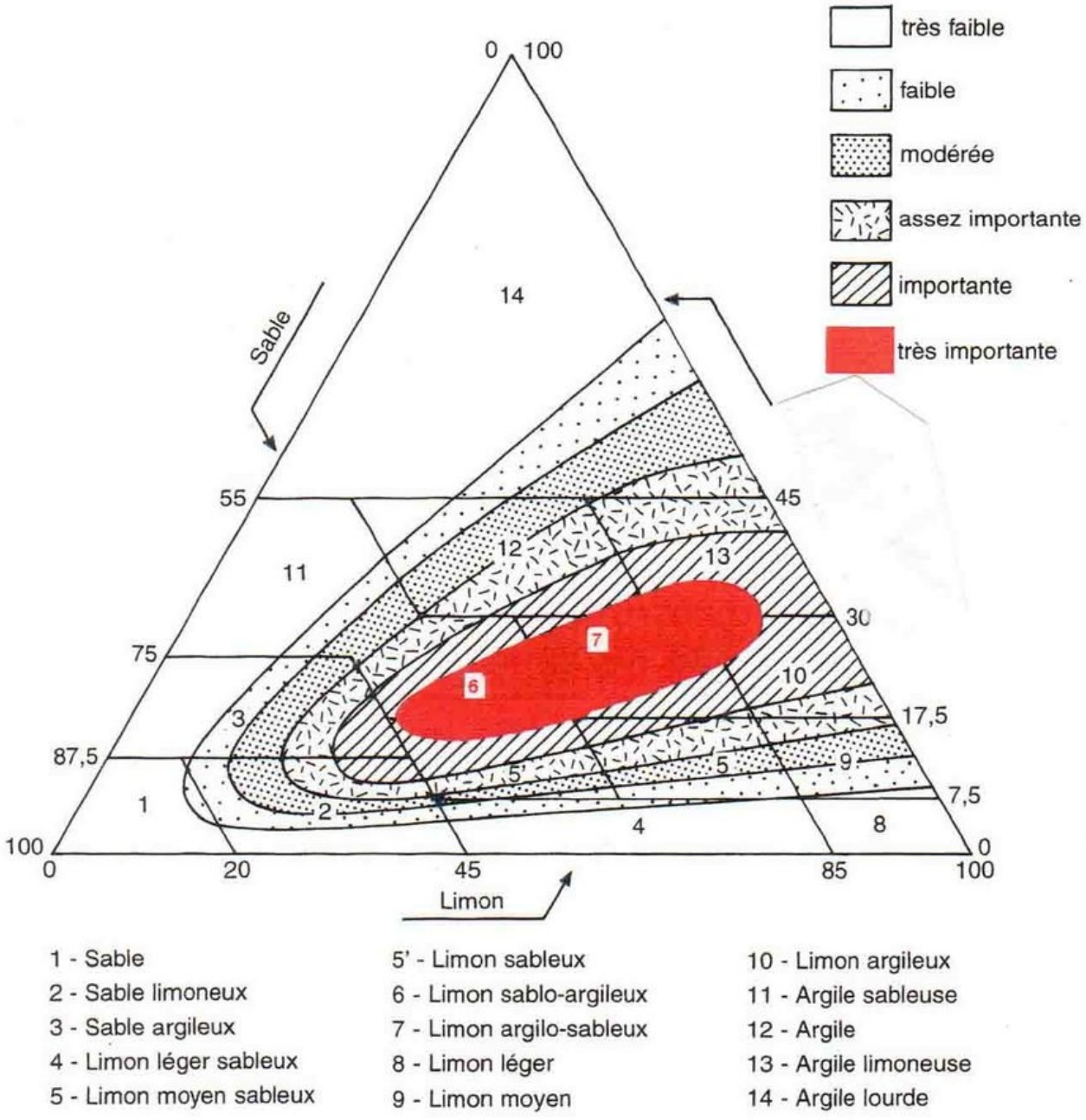


Figure 67 : Aptitude au tassement selon les classes texturales (Rémy & Mathieu 1972, dans (Baize 2024))

La pédologie agronome se préoccupe depuis longtemps de la question de l' « aptitude au tassement des sols », non pour la favoriser, mais pour l'éviter afin de maintenir une structure aérée favorable à la respiration de la faune et de la flore du sol. Les classes texturales sont souvent utilisées pour la classification des sols en pédologie (voir classification texture xxx), et des diagrammes représentant ce risque de tassement ont été proposés (Figure 67). Il est intéressant de constater que ce sont les classes texturales « bien distribuées », c'est à dire dont la granulométrie couvre plusieurs classes granulométriques, qui sont les plus sensibles au tassement, particulièrement les sols « limoneux » et « limono-argileux ».

6.2.2.8.2 Matières organiques

Les matières organiques limitent la compaction par leur capacité d'absorption d'eau, qui est plus conséquente encore que celle des argiles. Elles sont généralement indiquées comme peu favorables aux techniques compactées (Wolfskill et al. 1970; Weil & Brady 2016; Meimaroglou & Mouzakis 2019; Fabbri et al. 2022).

En pédologie agronome également, la présence de matières organiques est indiquée comme réduisant la compaction des sols au passage d'engins agricoles sur des sols naturels par sa tendance à la création d'agrégats stables (Ferreira et al. 2019). Notons cependant qu'il s'agit probablement d'une forme de cimentation (*complexe argilo-humique*), et que les forces appliquées aux sols naturels ne sont pas du même ordre de grandeur que celles recherchées dans les éléments composés de terre crue.

Les matières organiques et les argiles favorisant la rétention d'eau, elles favorisent le déplacement de l'optimum Proctor vers de plus fortes teneurs en eau. Wagner et al. (1994) proposent un modèle issu de corrélation statistiques permettant l'estimation de l'optimum Proctor à partir de composants du sol. La fraction granulométrique argileuse et les MOs sont des termes positifs de l'équation, tandis que la fraction granulométrique sableuse est un terme négatif. Le terme relatifs aux MOs est par ailleurs beaucoup plus fort que celui lié aux argiles.

Par ailleurs, la corrélation de la LP avec l'optimum Proctor suggère que la composition impacte l'occurrence de ces deux seuils de manière similaire : les argiles et les matières organiques, en absorbant l'eau, déplacent les optimums, et de manière générale les consistances, vers de plus fortes teneurs en eau.

Cependant, encore une fois, n'oublions pas la diversité des MOs. Certaines pourraient peut-être améliorer des propriétés de compactabilité ou de compaction, surtout si celles-ci sont évaluées en terme de compacité plutôt que de densité : les fibres sont peu denses, ce qui réduit considérablement la densité (masse volumique) des mélanges lorsqu'elles sont ajoutées, alors que la compacité volumique n'est pas forcément plus faible.

6.2.2.8.3 Rugosité

La rugosité favorise la friction donc la résistance mécanique sèche pour une même compacité (Koutous & Hilali 2019) (voir xxx résistance rugosité). Cependant elle augmente également la résistance d'un échantillon aux autres états hydriques donc la compactabilité, ce qui réduit la compacité et donc la résistance mécanique pour un même effort de compaction. Cet effet est implicitement suggéré par Dialmy et al. (2023) car l'application de leur modèle de compressibilité du pisé, issu de la modélisation des bétons de ciment intègre un paramètre lié à la rugosité des granulats.

On peut se demander quel est l'impact le plus significatif entre l'augmentation de la résistance sèche pour une même compacité et la réduction de la compactabilité en situation réelle. On peut cependant supposer que l'impact sur la compressibilité est moins significatif car la lubrification liée à l'eau réduit l'impact de la friction, et qu'ainsi les grains rugueux favorisent plus la résistance mécanique sèche qu'elle ne réduit la compactabilité humide. Cela peut expliquer l'impact positif des éléments rugueux sur la résistance

mécanique en compression observé par Koutous et Hilali (2019), malgré une énergie de compaction identique.

L'optimum de compacité humide est par ailleurs déplacé vers une saturation plus importante (Koutous & Hilali 2019).

6.2.2.8.4 Compactabilité : perméabilité et consolidation

Les propriétés impactant la compactabilité sont globalement semblables à celles impactant la compaction. Cependant, la compactabilité étant définie comme la compacité atteinte à énergie infinie, elle n'est pas sensible à l'intensité d'énergie nécessaire pour la consolidation mais seulement à la force appliquée. Par exemple, les terres aux fortes teneurs en argiles ont une porosité fine et demandent probablement beaucoup d'énergie par unité de consolidation. La compactabilité de ces terres sera donc moins impactée par la présence d'argiles que la compacité atteinte par unité d'énergie appliquée. En pratique, les procédés étant probablement gouvernés par l'économie d'énergie de compaction, cet effet ne devrait pas être significatif.

6.2.2.9 Conclusion compaction

La notion de compaction à énergie équivalente est intéressante par sa relation à l'économie d'effort recherchée dans les procédés de mise en œuvre. C'est pourquoi les échantillons « hypercompactés » à plusieurs dizaines de MPa, réalisés en laboratoire, ne représentent rien d'atteignable en conditions réelles pour des procédés artisanaux : l'énergie corporelle nécessaire pour atteindre ces compacités serait bien trop élevée, et les forces appliquées ne pourraient être atteinte que par un effet de levier considérable.

L'empilement granulaire des mélanges composés de terre crue est gage de compaction potentielle. Cependant il est encore difficile de prédire une compaction réelle qu'une compacité maximale théorique par analyse de la distribution granulométrique, car plusieurs paramètres font varier son impact sur l'énergie de compaction et la compacité maximale : l'empilement réel des grains, la rupture de grains solides, et les interactions cohésives entre les éléments fins sont autant de variables les modulant.

L'énergie appliquée par unité de résistance mécanique gagnée par compaction permet de visibiliser un compromis d'effort qui n'est pas visible par la seule évaluation de la résistance mécanique. En effet, des sols plus difficiles à compacter demanderont plus d'énergie pour atteindre des résistances mécaniques satisfaisant les objectifs. Si l'empilement granulaire est probablement bien corrélé à la compacité d'équilibre atteinte pour une force donnée, il est probable que ce soient les variables gouvernant la cohésion et la porosité fine qui gouvernent l'énergie nécessaire pour s'approcher de la compacité d'équilibre. En effet, on a identifié que les sols argileux devraient demander plus d'énergie pour leur compaction, ralentie par la cohésion du mélange, que des sols moins cohésifs. La variable de l'énergie de compaction est une des pistes d'explication du choix technique préférentiel des techniques compactées pour les sols peu cohésifs et « bien distribués », suggérée dans la plupart des références traitant de convenance des terres [refs? xxx].

Enfin, le calcul de l'énergie appliquée à la déformation d'un volume de mélange, qu'il soit compacté ou déformé à volume constant, est à questionner. Pour l'instant, l'énergie considérée est un calcul simple d'énergie de position liée à la chute de l'objet compactant

(p. ex. dame Proctor) pour les compressions dynamiques, et à l'effet de levier pour les compressions statiques. A notre connaissance, il n'y a pas eu d'étude approfondie des contraintes compactantes d'autres procédés de mise en œuvre (bauge, adobes, terre allégée), et il semble que pour l'énergie appliquée aux éléments de pisé, ce sont les résultats du travail de Myriam Olivier qui font référence (Olivier 1994).

Cette conception n'est pas représentative de l'énergie l'énergie *absorbée pour la déformation*, particulièrement dans le cas des compactions dynamiques, car on a vu qu'une partie de l'énergie était perdue par vibrations liées au comportement élastique. Dans cette perspective, les compactions dynamiques nécessitent ainsi plus d'énergie pour atteindre une même compacité (Xu et al. 2021). Une meilleure compréhension de la proportion d'énergie effectivement compactante pourrait permettre de mieux comparer les procédés statiques et dynamiques.

Ce mode de calcul d'énergie n'est pas non plus représentatif de l'« énergie de travail » mobilisée au cours du procédé de compaction, par les travailleur.euses ou les machines. Il s'agit en effet d'une *énergie finale*, quand l' « énergie » nécessaire à l'utilisation de l'outil, à sa préparation/entretien, à l'organisation de la chaîne de production dans son ensemble est bien plus conséquente.

[ce qui explique que la compaction dynamique soit quand même utilisée, car plus « low tech »… voir ça plus tard xxx]

[xxx voir force de compaction dans les BTC, pisé, adobes ? De manière générale ça serait peut être bienvenu ici de donner les ordres de grandeur des forces et énergies des procédés terre crue.]

6.2.3 Déformation et homogénéisation/ségrégation

6.2.3.1 Mécanismes

Une contrainte purement cisaillante ne modifie pas la compacité et le volume d'un élément. Elle consiste uniquement en le déplacement des éléments les uns par rapport aux autres, ce qui peut produire des réarrangements : la terre peut s'agréger, par variation de la compacité et de l'arrangement des grains localement, ou gagner en homogénéité par rupture des agrégats et répartition des composés solides de manière plus aléatoire.

Une contraint purement cisaillante intervient soit dans des procédés de mélange purement cisaillants, soit lorsque la *compacité d'équilibre* avec une force compactante est atteinte (voir xxx compaction), par exemple a l'approche de la saturation.

Les contraintes cisaillantes répétées dans un volume limité ont pour effet la redistribution de la matière dans le mélange et peuvent participer à un gain d'homogénéité. A l'inverse, les forces de gravité peuvent en milieu saturé favoriser un tri granulométrique par sédimentation différentielle, qui réduit l'homogénéité du mélange.

6.2.3.2 Déformation spontanée : affaissement

L'affaissement et *l'effondrement* d'un mélange sont des déformations non compactantes spontanées sous l'influence de la gravité. Elles diffèrent du *tassement* qui est une

déformation compactante sous l'influence de la gravité et/ou du retrait au séchage (CCTC 2018) (voir tassement xxx).

On distinguera ici l'affaissement et l'effondrement, déformations d'apparence respectivement *ductile* et *cassant*. L'effondrement ne peut concerner que les éléments finis (voir cassant xxx).

Contrairement aux forces induites par les contraintes rencontrées dans les procédés de construction en terre crue (compaction, modelage), la force de gravité ne s'applique pas à partir de la surface du matériau, mais à l'ensemble des éléments le composant, en même temps. Ainsi, là où une contrainte compressive est égale sur l'ensemble de l'épaisseur d'un matériau compressé (en négligeant les frottements latéraux, voir xxx pose compaction), les contraintes de gravité sur une matrice de terre sont d'autant plus importantes qu'il y a de matière sus-jacente. Les zones exposées aux plus fortes contraintes liées à la gravité sont donc les zone basses des éléments, par exemple les pieds de murs, qui subissent l'ensemble du poids du mur sus-jacent, appelé *charge*.

Dans les éléments composés de terre crue et particulièrement les éléments mis en œuvre de manière massive (voir xxx définition techniques), c'est principalement la masse propre du mur qui définit la charge. En effet, les charges liées aux autres structures de l'édifice (toit, planchers) sont souvent négligeables devant la masse des murs. Ainsi, les contraintes sont directement dépendantes des dimensions de celui-ci (voir mécanique finale xxx?).

Pour l'affaissement comme pour l'effondrement, si l'on néglige les questions de stabilité des murs et les contraintes latérales (vent, tremblements de terre), on peut associer ces déformations spontanées à des résistances en compression non confinées. La résistance d'un élément à son propre poids est alors une fonction 1) de ses dimensions, gouvernant la masse et la surface des plans de fissuration à atteindre pour la rupture, et 2) de la résistance, qui est une résistance pour un angle compressif qui peut se transformer en résistance cisaillante dans les éléments non confinés (voir xxx forme des contraintes).

6.2.3.3 Impact des déformations sur l'homogénéité

Les sols naturels ne sont généralement pas homogène à l'échelle macroscopique. Des agrégats sont formés à plus ou moins long terme par retrait-gonflement, certains sont cimentés par des minéraux précipités (voir xxx cimentation). Un mélange de terre dans un état agrégé, par exemple un sol naturel labouré, présente souvent deux catégories de taille de porosité : une macroporosité entre agrégats, et une microporosité intra-agrégats (Oualmakran et al. 2016).

Dans une déformation ductile, il y a déformation des agrégats au cours de la déformation. Les contraintes compressives confinées, ainsi que l'augmentation de la saturation en eau, en favorisant le comportement ductile, favorisent donc la déformation des agrégats et leur coalescence dans des macroagrégats ou une matrice continue (Nimmo & Park 2004). La taille de la porosité s'homogénéise (Oualmakran et al. 2016) et les constituants solides comme les feuillets argileux sont mélangés.

A l'inverse, plus la déformation est cassante, plus la contrainte induit une rupture des agrégats en agrégats plus fins et non cohérents. La porosité décroît peu mais est quand

même réduite, par exemple dans une contrainte compressive sèche, d'une macroporosité entre gros agrégats à une méso-porosité entre petits agrégats (Nimmo & Park 2004). Mais la porosité intra-agrégats est peu affectée, et les microagrégats argileux sont peu désagrégés.

Le travail de labour des sols agricoles a généralement pour objectif l'« émiettement » maximal du sol au passage de la charrue, en compactant le moins possible la microporosité intra-agrégats bénéfique à la respiration et au drainage du sol (Brady & Weil 1984). Il s'agit alors d'un compromis entre une teneur en eau suffisante pour la rupture des agrégats mais suffisamment faible pour ne pas désorganiser la micro-structure. Les études d'optimisation du labour indiquent que l'état idéal se situe généralement autour de l'optimum Proctor (voir xxx compaction), c'est à dire juste avant la transition ductile-cassant ou limite de plasticité d'Atterberg (Brady & Weil 1984).

Cette propriété d'émiettement maximal est intéressante pour les techniques d'homogénéisation du sol aux états peu hydratés, mélangés par cisaillement, par exemple via l'utilisation d'engins de labour ou plus simplement par « frassage » à la pelle manuelle (voir xxx mélange).

6.2.3.4 Homogénéisation dans les procédés de terre crue

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 (voir mélange xxx) ont pour objectif principal d'obtenir une homogénéité au moins macroscopique des composants du mélange: solides ou teneur en eau.

On peut considérer que ces procédés généralement répétitifs organisent progressivement le mélange vers un état d'homogénéité stable, dont l'échelle d'homogénéité est fortement variable selon les propriétés du mélange et les contraintes appliquées. Par exemple, un mélange homogénéisé par brassage de la matière à la pelle 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. Ces mêmes contraintes appliquée à un mélange plus sec auront tendance à produire spontanément des agrégats. 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 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[31]. Le temps ou l'intensité nécessaire à approcher significativement cette hétérogénéité stable dépend également des propriétés du mélange et des contraintes appliquées.

La notion d'homogénéité est 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 dans une machine à faible puis très grande vitesse (p. ex. (Ansaa-Asare et al. 2023; Meimaroglou &

31 asymptotique : se rapprochant de plus en plus lentement sans jamais réellement atteindre l'objectif.

Mouzakis 2024)). Ces intensités de mélange sont probablement plus intenses que celles réalisées sur les chantiers et pourraient impacter la représentativité des échantillons testés.

Il y a relativement peu d'informations disponibles sur la variation de l'homogénéité des mélanges de terre crue au cours de procédés mécaniques, par exemple de malaxage. 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 (Nimmo & Park 2004).

[xxx a voir si utile]

On supposera que les contraintes compressives ont pour conséquence la rupture des agrégats existants, tandis que les contraintes d'extension-relâchement ont peu d'impact sur les mélanges peu cohésifs mais induisent une agrégation progressive pour les mélanges cohésifs, comme cela peut se produire au cours de contraintes de retrait-gonflement répétés.

Dans les procédés de construction en terre crue, on supposera donc que les procédés de mélange par poinçonnement (piétinement) auront pour effet de rompre les agrégats tandis que le brassage sera moins efficient pour leur rupture pour les mélanges cohésifs et pourra même favoriser l'agrégation.

[en dire plus ? Lien avec étape mélange ? Xxx]

6.2.3.5 Ségrégation spontanée par gravité : la sédimentation

Lorsque la teneur en fluides est importante, les solides sont en *suspension* dans les fluides. Contrairement à une *solution*, une suspension n'est pas stable dans le temps car ses composants tendent à se séparer selon leurs densités respectives par *séparation de phases* où les composants les plus denses se retrouvent en dessous des moins denses (Communauté Wikipédia 2024). L'instabilité engendre donc un retour spontané vers un état plus stable où les forces de réorganisation par gravité sont compensées par d'autres forces. Dans le cas d'un mélange de terre, on constate de manière assez évidente que de gros granulats solides denses agités dans l'air tombent spontanément sous l'effet de la gravité et s'empilent, ce qu'on peut appeler *affaissement* ou *effondrement*, et qu'il en va de même dans l'eau bien que généralement moins rapidement pour une même densité des solides, ce qu'on appelle *sédimentation*. De même, lorsque l'on mélange de l'air et de l'eau l'air s'échappe vite vers la surface, par *dégazage*. Dans ces trois cas, il faut considérer un volume de référence, duquel l'air ou l'eau peuvent partir, sans quoi la composition générale du système reste inchangée. L'élément de référence que l'on considérera comme « mélange composé de terre crue » est le volume de matière où il y a au moins un composant solide: au-delà de ce volume, on est généralement dans un état séparé avec une seule phase (eau ou air), le mélange air-eau étant instable à très courte échéance.

6.2.3.5.1 Ségrégation

L'*affaissement* et la *sédimentation*, à l'échelle des éléments du sol mis en suspension, sont des propriétés qui dépendent de leur masse.

Dans le premier cas, ces éléments sont plutôt des agrégats ou des éléments grossiers car à l'état sec les dynamiques d'agrégation sont conséquentes (voir xxx agrégation). La ségrégation granulométrique n'est pas significative.

Dans le cas de la sédimentation, l'état hydrique est saturé ou proche de la saturation et la plupart des grains non colloïdaux sont dispersés. Seules les particules chargées peuvent former des agrégats par liaisons électrostatiques. Les particules les plus lourdes tombent plus vite au fond de la suspension, puis les éléments de plus en plus petits. On assiste à une ségrégation des éléments par leur masse, qui prend la forme d'un tri granulométrique vertical une fois le mélange « stable ».

La ségrégation au cours de la sédimentation est mobilisée dans les procédés de mise en œuvre de terre crue à l'état de *barbotine* (voir xxx intro techniques terre allégée). Les terres y sont mélangées à l'eau pour séparer les constituants, et après quelques instants de repos seuls les éléments fins restent en suspension. C'est cette suspension qui est prélevée, laissant les grains grossiers au fond. Seule la fraction la plus cohésive est ainsi gardée ce qui permet d'optimiser les propriétés mécaniques et thermiques des éléments de terre allégée mis en œuvre (voir xxx mélange-homogénéisation).

6.2.4 Variations spontanées et zones d'instabilité.

La gravité est une force constante qui s'applique à tous les corps dont les mélanges de terre crue sont composés. Elle influence la teneur en eau des éléments finis au cours du *ressuyage*, délimite leur hauteur maximale stable par *effondrement* ou *affaissement*, participe au tri granulométrique dans les suspensions de terre crue par *sédimentation* différentielle selon la taille, la masse et l'affinité à l'eau des granulats. La gravité peut également entraîner une augmentation de la compacité par *tassement*.

La stabilité de composition des phases du *mélange* fait entrer en jeu une notion d'échelle temporelle : l'affaissement des solides dans l'air est presque instantané, la dégazage, la sédimentation et le ressuyage sont plus lents. La vitesse de ces phénomènes dépend des différentes forces en jeu : par exemple, une plus petite taille de particules ou une densité plus faible, ainsi qu'un milieu moins fluide engendre une séparation de phases plus lente car les forces de cohésion, de friction ou encore le mouvement Brownien sont plus conséquentes que la gravité. Dans un mélange de terre argileuse type barbotine épaisse (voir XXX techniques), l'air se sépare plus vite par affaissement des solides ou par dégazage que l'eau ne ressuie.

Maintenir la matrice des trois phases dans un état *instable* nécessite donc une homogénéisation continue, pour remettre les phases denses en suspension dans les phases moins denses : l'air dans les solides et l'eau, l'eau dans l'air. En pratique, cette homogénéisation continue consiste en l'application de contraintes cisaillantes répétées : outils manuels ou rotatifs soulèvent ou agitent la matière et remettent en suspension les éléments.

A l’observation, on constate qu’après un mélange proche de ce qu’on a appelé l’« homogénéité stable », si on laisse le mélange au repos, l’organisation des constituants évolue plus ou moins vite pour atteindre un état « visiblement stable », que l’on appellera « état foisonné » (Figure 68). Lorsque la matrice est mélangée vers une zone de compacité inférieure à cet état foisonné (+ d’air et/ou + d’eau) elle revient spontanément vers cet état foisonné. Cette zone peut être appelée « zone mélangée » du fait qu’elle ne puisse être maintenue que par le mélange.

Cet état stable en apparence ne l’est pas *vraiment*, car à plus long terme ces phénomènes continuent de plus en plus lentement vers l’état de séparation parfaite des phases, car d’une part de l’air piégé dans la porosité d’un sol « foisonné » peut mettre un temps considérable à être remplacé par de l’eau, notamment par dissolution des gazs, et d’autre part même les solides présentent une forme de fluidité à très long terme (*compression secondaire*, en anglais *creep*) (Mitchell & Soga 2005). C’est ainsi que si l’on souhaite définir cette zone d’instabilité de la matrice qu’est la « zone mélangée », la délimitation doit faire intervenir un critère temporel. Notre référence sera l’échelle d’une journée, ce qui veut dire que l’état dit « stable » sera celui dont la matrice ne change pas sensiblement de compositions volumiques relatives au bout de 24h d’observation. Si cette notion mérite d’être approfondie, elle sera suffisante pour les considérations théoriques de ce travail de thèse.

La stabilité d’une compacité fait intervenir l’ensemble des propriétés discutées jusqu’alors. Notamment, on peut considérer que l’initiation d’un mouvement de compaction spontanée (tassement) ou de sédimentation différentielle nécessite que les interfaces frottantes dépassent leur seuil de cisaillement. La force appliquée étant la force de gravité, il faut donc que le seuil de cisaillement soit supérieur à la contrainte gravitaire pour que la compacité soit stable. Une fois le seuil de cisaillement dépassé, la fermeté n’impacte que la vitesse de déformation car la force de gravité est appliquée de façon constante. Des mélanges plus cohésifs, par exemple argileux, auront des seuils de cisaillement ainsi que des fermetés plus élevées, et leur état « foisonné » sera moins compact que des mélanges peu cohésifs.

Le gain de compacité progressif par tassement, comme toute contrainte de compaction (xxx compaction), entraîne une augmentation de la résistance en cisaillement, jusqu’à ce que celle-ci soit équivalente à la force de contrainte et qu’ainsi la stabilité soit atteinte. De la même manière pour la sédimentation, plus le mélange sédimente, moins il sédimente vite. L’état de compacité stable atteint, « état foisonné », peut donc en première approche être approximé à un seuil de résistance en cisaillement, quoique l’impact du le tri granulométrique au cours de la sédimentation soit incertain.

D’après les profils d’évolution théorique de la résistance en cisaillement selon la composition volumique solide proposés sur la Figure 56, on peut supposer que l’état « foisonné » suive une ligne d’équi-résistance en cisaillement. La résistance correspondante dépend de la force appliquée par la gravité, et donc de la hauteur de matériau sus-jacent et sa masse. En première estimation, si l’on prend une hauteur de 20cm de mélange correspondant à l’ordre de grandeur des « tapis de bauge » à l’étape de piétinement et une densité de 1.5 (rencontrée dans les sols labourés), la force exercée en bas du mélange est d’environ 3 kPa. C’est donc à proximité d’une courbe d’équi-

résistance de l'ordre du kPa que l'on pourrait trouver la résistance des sols « foisonnés », donc leur compacité à une teneur en eau donnée.

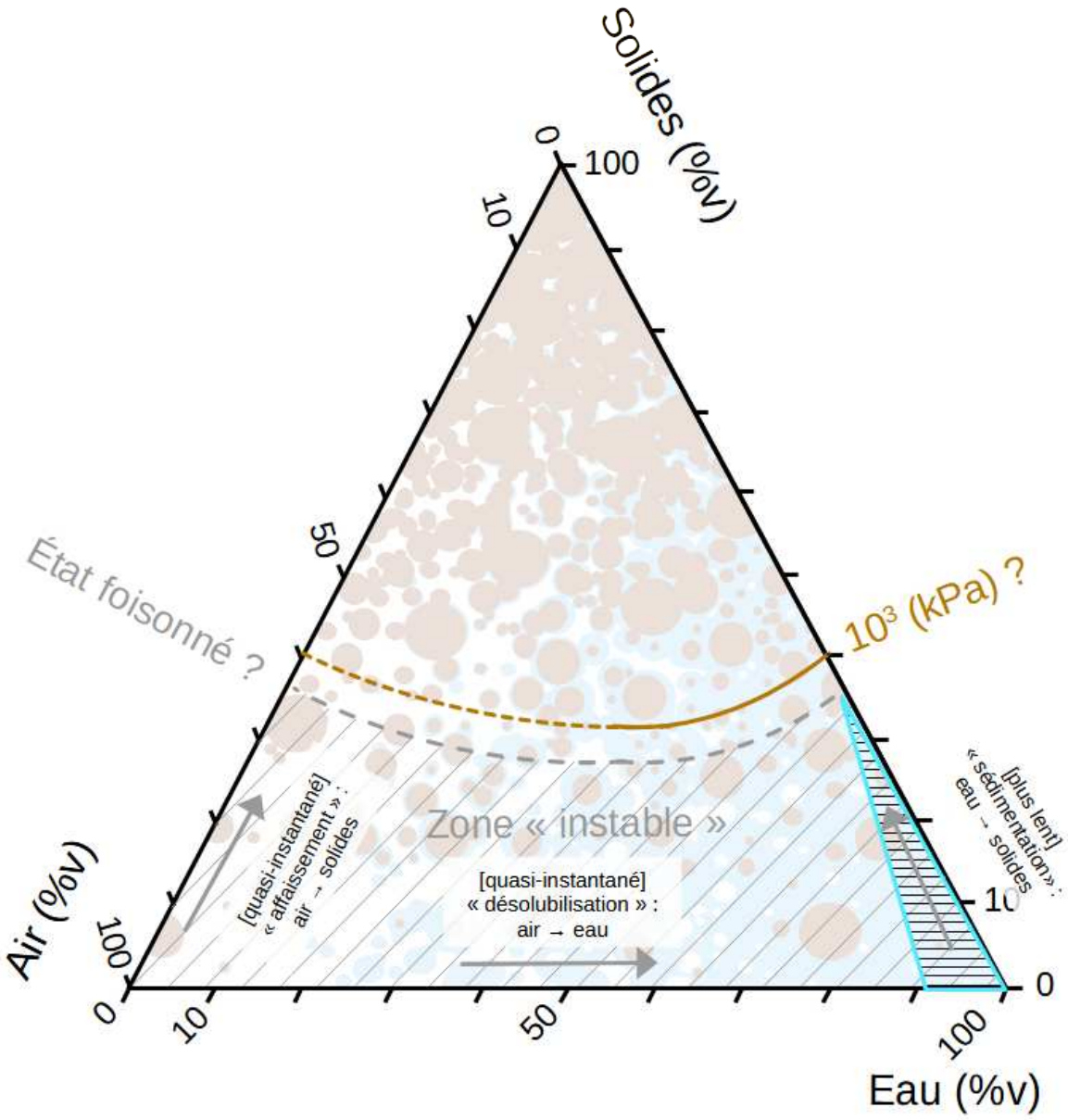


Figure 68 : [XXX a modifier. Remonter la limite au dessus de kPa pour être cohérent avec le discours]. Zones de stabilité et d'instabilité théoriques des mélanges triphasés. Les flèches indiquent les phénomènes par lesquels un milieu « mélangé » change spontanément de composition de phases. Lorsque les phases n'évoluent plus, le milieu est dit « foisonné ». Les compacités supérieures à celles de l'état foisonné sont dites « compactées »

La sédimentation dans les mélanges saturés est un procédé relativement lent pour les terres cohésives. En revanche, les mélanges non saturés sont presque immédiatement stables, ainsi que leur résistance au cisaillement. C'est celle-ci qui impactera la résistance et donc l'ouvrabilité des procédés d'homogénéisation non compressifs : « frassage » à la pelle, labour ou encore extraction (voir homogénéisation xxx).

7 Ouvrabilité : les propriétés des mélanges au cœur des choix techniques

[xxx j'ai l'impression que cette partie est un peu « pré-conclusive », je discute de choses qu'on va voir au chapitre d'après. Peut-être qu'elle gagnerait à être plus succinte et à garder les discussions pour la suite.]

7.1 Ouvrabilité, ouvrabilités

> *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[32]. 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.

Barnes (2013b) s'intéresse à l'ouvrabilité des mélanges de terre crue relativement à différentes techniques issues de disciplines variées, par leur relation avec la propriété de *fermeté* du mélange (énergie nécessaire pour déformer un mélange, voir xxx fermeté). Il indique que la fermeté est souvent *composante* des ouvrabilités. Cependant, elle n'est pas la seule propriété d'intérêt, car dans les ouvrabilités de multiples autres variables peuvent être impliquées, notamment des seuils de résistance mécanique du mélange ou des agrégats, des propriétés plus ou moins spécifiques dépendantes de la cohésion ou de la taille des éléments du mélange, *etc*.

Il cite des exemples où l'ouvrabilité implique un optimum de fermeté:

- en géotechnique, l'ouvrabilité désigne « la facilité avec laquelle le sol peut être placé et compacté comme matériau de remblai » (Barnes 2013b). On a vu l'impact que les propriétés des mélanges de terre crue ont sur les procédés de compaction : on cherche l'optimum de teneur en eau pour laquelle la compaction est la moins énergivore pour les engins de terrassement.

- en agronomie, l'ouvrabilité désigne la proximité du sol à sa teneur en eau idéale pour le labour, ou pour la circulation d'engins sur une parcelle sans tassement du sol. Hors labour, il s'agit d'une résistance à la compaction maximale, relativement aux avantages procurés par le travail effectué ou son report dans le temps. On voit dès lors que l'ouvrabilité ne fait sens qu'en contextualisant son usage, ici, une variable d' « intérêt agronomique » et une variable « organisationnelle ». En labour, la compactabilité est moins importante puisque le sol est relativement décompacté derrière l'engin. L'ouvrabilité au labour prend alors en compte plusieurs paramètres : la résistance mécanique des agrégats doit permettre leur

32 Au sens général, pas forcément une technique de terre crue.

rupture et non leur écrasement pour favoriser l'aération du sol (Barnes 2013b; Weil & Brady 2016) (voir xxx émiettement); tandis qu'une trop grande fermeté augmente l'énergie nécessaire pour tracter la charrue dans le sol. La fermeté est maximale à la limite de plasticité, et l'émiettement est identifié comme optimal autour de l'optimum Proctor. L'ouvrabilité idéale pour ce travail se situe probablement autour de ces limites.

- dans l'industrie céramique, c'est l'étape d'extrusion qui est mise en avant, où le comportement de la terre est critique dans le bon déroulement de l'opération. Elle doit ne doit pas être trop ferme tout en ayant un comportement ductile pour permettre le travail d'extrusion d'un produit sans fissures et réduire l'énergie consommée ; mais avec une résistance assez forte pour que les briques ne s'affaissent pas sous leur propre poids une fois façonnées. Par ailleurs, il semble y avoir également un paramètre de retrait au séchage. Les terres très « plastiques » (au comportement ductile à haute fermeté, voir plasticité xxx) nécessiteraient beaucoup d'eau pour atteindre des fermetés acceptables pour l'extrusion, ce qui poserait des problèmes au séchage : retrait/fissuration, temps de séchage.

L'ouvrabilité est également considérée dans les procédés de mise en œuvre du béton. Phung (2018) indique qu'elle peut s'illustrer par un optimum de distribution granulométrique: un mélange trop « fin » demandera plus d'eau pour mettre en œuvre le béton (que l'on comprend ici comme non souhaitable), tandis qu'un mélange trop grossier « perd en ouvrabilité », ce qu'on peut supposer être une facilité de modelage. L'ouvrabilité est ici aussi considérée comme relative au façonnage de la matière.

Ces exemples illustrent la diversité des ouvrabilités. Dans l'usage courant de ce terme, il semble que ce soit principalement des propriétés que l'on peut rapprocher de comportements mécaniques, ou *consistances*, qui sont considérées dans son évaluation qualitative ou quantitative. Pour la terre, l'état hydrique est central dans les propriétés du matériau, et d'autre part est une propriété sur laquelle il peut être aisé d'agir. La teneur en eau d'ouvrabilité optimale se situe autour de l'optimum Proctor et de la LP pour les terrassements et le labour ; la plus sèche possible pour la circulation d'engins sans tassement ; et quelque part entre le seuil de cisaillement à la limite de plasticité et celui à la limite de liquidité pour l'extrusion des briques de terres cuite. Cela dépend de l'objectif de transformation de la matière, de l'échelle des éléments, des outils utilisés, etc.

La composition fait également partie de l'ouvrabilité lorsqu'elle peut être modifiée pour être optimisée. C'est le cas des mélanges formulés comme les bétons de ciment ; dans l'industrie céramique qui « choisit » les argiles ; ou dans une moindre mesure pour les terrassements où certaines terres peuvent être importées ou réemployées sur site quand d'autres sont envoyées en décharge. En revanche, ce n'est pas le cas des travaux agricoles, ni dans la construction en terre crue locale où les procédés doivent s'adapter à la terre et non l'inverse. L'ouvrabilité concerne alors des optimums sur les propriétés accessibles, comme la teneur en eau, l'ajout de fibres, et plus généralement l'adaptation des techniques employées, et non sur le choix de la terre.

Barnes souligne que les essais mesurant des limites du comportement plastique sont souvent indiqués pour estimer des ouvrabilités. Cependant, dans le cas de l'industrie céramique, il indique que c'est une limite de fermeté qui caractérise la bonne teneur en

eau d'usage des mélanges de terre. Mieux comprendre les phénomènes à l'oeuvre dans les procédés permettrait d'identifier des propriétés plus proches de celles réellement impactantes dans l'ouvrage.

A notre connaissance, les propriétés d'ouvrabilités sont peu explorées dans la recherche académique relative à la construction en terre crue. On trouve pourtant des allusions à celle-ci dans la mise en œuvre des échantillons de laboratoire. Meimaroglou & Mouzakis (2019) indiquent implicitement que de teneurs en eau élevées favorisent l'ouvrabilité des mortiers. Certains travaux relatifs aux techniques high-tech expérimentales considèrent l'ouvrabilité, qui représente un défi face aux besoins spécifiques des machines à chaque étape. Ji et al. (2023) utilisent plusieurs termes pouvant se rapprocher de l'ouvrabilité, pour différentes étapes de leur procédé mécanisé : la « constructibilité » (buildability) est la hauteur d'empilement permise à l'état frais ; la « pompabilité » (pumpability) est la possibilité de déplacer le matériau par pompage, l'« extrudabilité » (extrudability) la possibilité d'extruder le matériau.

Les recherches relatives aux optimums de compaction Proctor ne sont généralement pas qualifiées d'ouvrabilité, mais il s'agit bien d'une recherche d'optimum, vis-a-vis de la compacité, pour énergie de compaction donnée. A travers l'optimum de compaction dynamique, la mise en œuvre du pisé est par ailleurs le seul procédé-type de mise en œuvre de la terre crue pour lequel la notion d'énergie est considérée. Cependant, il nous semble que ces procédés ne sont pas observés d'un « point de vue ouvrabilité ». D'une part, on a vu que ce ne sont pas les mêmes énergies qui sont dépensées selon que l'on considère l'énergie effectivement compactante, l'énergie appliquée par l'outil, et l'énergie mobilisée dans le procédé sur le chantier (voir xxx compaction). L'ouvrabilité serait plutôt l'évaluation de cette dernière modalité.

D'autre part, d'un point de vue ouvrabilité, il semble qu'en pratique le raisonnement soit inversé : on cherche à atteindre une résistance mécanique (donc une densité) « suffisante » *à moindre énergie*. Les optimums ne sont pas forcément différents si l'on considère l'optimum de compaction ou l'optimum d'énergie. Mais cela traduit selon nous une différence d'objectif entre le chantier et le laboratoire, entre l'économie de moyens et la performance mécanique (voir plus loin mécanique au labo xxx?).

Enfin, il nous semble que les termes relatifs à la « plasticité », lorsque employés relativement au modelage d'éléments comme la bauge, relèvent en fait d'une recherche d'ouvrabilité : la terre doit pouvoir être modelée donc présenter une résistance au cisaillement minimale ; mais elle doit répondre de manière ductile donc être suffisamment hydratée ; on prend également en compte la facilité de modelage, car il est plus aisé de travailler à de fortes teneurs en eau car la fermeté est moins intense, mais à l'inverse de fortes teneurs en eau apportent du retrait et du temps de séchage.

7.2 Les ouvrabilités, optimums multivariés

Cet exemple de la modelabilité montre que les optimums d'ouvrabilités sont souvent multivariés : une seule variable, par exemple une résistance mécanique, ne peut appréhender parfaitement leur complexité. Il est vrai qu'elles sont souvent composées de propriétés mécaniques, toujours propres à la situation : outils, méthodes, contexte. On

peut cependant approcher ces contraintes mécaniques complexes en les « décomposant » en contraintes-types plus simples, afin de *comprendre* les phénomènes, ce qui peut aider à la décision. En revanche, composer des modèles capables de *prédire* l'ouvrabilité des procédés suppose d'une part, une bonne modélisation de la contrainte complexe, et d'autre part, une forte répétabilité du procédé lui-même en pratique. Or, le travail de la matière ne semble être un procédé répétable que dans le cas de procédés industriels employant des terres aux propriétés constantes, ce qui n'est pas le cas des procédés artisanaux s'adaptant aux terres locales.

[a déplacer?] Ainsi, les indices, limites, abaques et autres fuseaux granulométriques peuvent être corrélés à des ouvrabilités idéales relativement à une variable qui la représenterait. On fait varier la composition et cette variable pour la calibration du modèle. Par exemple, pour une terre et un procédé de compaction donnés, on peut calibrer un optimum de teneur en eau. En revanche, il semble difficile d'appréhender la variabilité des terres *et* des procédés par calibration, car la variabilité de leurs propriétés respective est telle qu'il faudrait des quantités considérables d'échantillons. C'est pourquoi, nous pensons que l'utilisation d'indices ou d'abaques doit rester dans le domaine de l'aide à la compréhension plutôt que dans l'aide à la décision.

Les ouvrabilités semblent systématiquement intégrer des notions de mécanique de la matière, mais on a vu qu'elles intégraient aussi des variables non mécaniques. Par exemple, pour le 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 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 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 de la personne recherchant l'optimum. Dès lors, l'intégration de variables dans l'« ouvrabilité » peut être infinie si l'on cherche à comprendre tous les phénomènes et leurs interactions.

7.3 L'ouvrabilité à chaque étape, conjuguée dans les procédés

Si l'on considère uniquement la facilité d'extrusion des procédés céramiques, l'ouvrabilité optimale serait exactement à la résistance en cisaillement suffisante pour limiter l'affaissement des briques formées, car elle garantirait une fermeté minimale et donc un gain de travail énergétique. Mais l'optimum d'ouvrabilité est déplacé si l'on considère la suite du procédé : conditions de séchage, objectifs de non-fissuration, etc. Au coeur même des procédés, et sans considérations pour le contexte, l'ouvrabilité n'est donc pas la même selon l'horizon délimitant le procédé lui-même, ici la qualité de l'étape du séchage. Elle ne serait pas non plus la même s'il s'agissait de considérer les étapes précédent l'extrusion : mélange, transport, extraction, etc. , avec leurs optimums mécaniques propres.

Dans les procédés de construction en terre crue, le mélange de terre traverse une suite de procédés, que l'on appellera étapes, composant un ensemble que l'on peut appeler « chaînes de production ». Souvent, les étapes de *mise en œuvre*, incluant la transformation active de la matière, sont séparées des propriétés d'*usage*, où la matière a des propriétés plus ou moins constantes. La chaîne de production peut être divisée en 7 étapes, plus ou moins distinctes et dont certaines ne sont pas réalisées dans certaines procédés-types : l'extraction de la matière, sa préparation, son homogénéisation, son façonnage, sa pose (si façonnage préfabriqué), son retravail ou maintenance au cours du séchage. Les propriétés d'usage peuvent être identifiées comme agissant au cours de la *vie de service* du bâtiment et sont multiples et variées. On s'intéressera ici aux propriétés *finales* de résistance mécanique et de durabilité, de comportements hygrothermiques, et de qualités esthétiques.

Ces étapes et propriétés sont distinguées pour faciliter la compréhension des phénomènes mais ne sont pas strictement délimitées : par exemple, le façonnage dépend de propriétés mécaniques variant de manière continue avec les propriétés mécaniques d'usage ; l'homogénéisation est entamée dès l'extraction, etc.

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 ». Cette simple « addition » de travail, une fois intégrée dans le procédé montre en fait une *conjugaison* des ouvrabilités sur l'ensemble du procédé. Les compromis de propriétés sont donc intégrés dans l'ensemble des variables d'intérêt de toutes les étapes. 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 (voir xxx compromis compaction-retrait). 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 (xxx ref). 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 ?

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. L'importance des compromis multi-étapes est pourtant remarquée dans l'étude des procédés de mise en œuvre expérimentaux high-tech (p. ex. (Pinel et al. 2017; Ji et al. 2023)).

7.4 Pertinence sociétale des choix techniques : vers une ouvrabilité holistique ?

Les méthodes d'Analyse de Cycle de Vie ont ainsi pour objectif de sommer, sur l'ensemble de procédés techniques, les *impacts environnementaux* de toutes les étapes et de rapporter chacun de ces impacts à *l'unité fonctionnelle* qu'ils ont permis. De manière similaire, dans le cas d'une analyse d'ouvrabilité d'une étape, on suppose que sont sous-entendues des *variables objectif* rapportées à l'élément produit : l'énergie consommée par

les machines, le travail nécessaire, sa pénibilité, ou encore l'économie de coûts financiers. Ces objectifs « d'ordre supérieur » sont forcément présents, mais ils sont rarement explicités. Pourtant, ce sont bien eux qui guident la recherche d'optimums évalués et ont donc un impact conséquent sur les travaux de recherche académique.

Considérer les variables objectifs des unités fonctionnelles ou celles des procédés en questionnant leur subjectivité est un vaste chantier. Qu'est-ce qu'un « bon » procédé, que doit-on optimiser ? Dans le cas des ACV, il s'agit de réduire un ensemble d'impacts environnementaux. Dans le cas des ouvrabilités, qu'est ce qui est considéré, implicitement ? Le temps de travail humain ? Sa pénibilité ? L'énergie des machines ? La rentabilité économique ? Les variables objectifs semblent résulter de la perception de ce qui est désirable pour les personnes les définissant. De ce fait, les recherches relatives aux optimums techniques relèvent de points de vue *situés* qui définissent les objectifs de recherche et influencent les résultats s'ils ne sont pas conscientisés et/ou explicités (voir xxx savoirs situés intro).

La question sous-jacente est celle d'un choix technique *pertinent*. Analyser un choix technique pertinent suppose une conception holistique des ouvrabilités à chaque étape, en considérant une variabilité presque infinie de considérations sociales et environnementales, intégrées dans un système global et contextualisées localement. La pertinence d'un choix technique est donc inévitablement une évaluation située, et doit donc être questionnée.

Cette vision paraît complexifier considérablement l'évaluation des *ouvrabilités*, et à cette échelle d'intégration systémique, il semble plus adéquat d'utiliser une terme plus holistique qui peut être la *pertinence sociétale*, au sens de la pertinence d'une action pour le système social dans son ensemble, qui dans notre conception est composé des humain.es et de l'ensemble de la biosphère dans lesquels iels sont intégré.es.

De toute évidence, la *pertinence sociétale* n'est pas une variable mesurable en laboratoire. Il s'agit d'un concept hautement subjectif. Pourtant, cela ne nous semble pas être une raison de se concentrer uniquement sur les variables physiques, mesurables, des propriétés mécaniques des matériaux. En effet, si les humain.es produisent des matériaux, c'est bien pour un objectif d'ordre supérieur, *sociétal*, et si on optimise des propriétés de mise en œuvre, c'est bien pour faciliter un travail, à l'avantage de quelqu'un.e ou de plusieurs personnes ou entités. Comme pour l'évaluation de l'ouvrabilité pour une seule étape, ne considérer qu'une variable quand l'optimum est complexe et fortement intégré dans le système sociétal ne permet pas d'appréhender correctement le choix technique, ce qui peut mener à des contre-productivités. A l'échelle de la pertinence sociétale, la contre-productivité liée à l'absence de considération pour des objectifs collectifs plus globaux a été illustrée et théorisée par Illich (1973). Nous reviendrons sur les concepts d'Analyse de Cycle de Vie et de contre-productivité au chapitre xxx (ACV xxx).

7.5 Modéliser les ouvrabilités

Les propriétés d'ouvrabilité *physiques* sont une intégration de propriétés mécaniques, qui elles-mêmes sont décrites comme *empilement* de propriétés de comportement et *in fine*

de propriétés de composition des mélanges. Dès lors, peut-on prédire des ouvrabilités par la construction de modèles mécanistes prenant en entrée des variables de composition des mélanges, et remontant les propriétés physiques de la matière jusqu'à leur usage ? Cette perspective paraît nécessiter un travail considérable et difficilement généralisable au vu de la variabilité des propriétés des terres et des procédés. Dans tous les cas, il faudra « calibrer » les modèles avec des essais en conditions réelles.

8 Conclusions

8.1 Relier les propriétés des matériaux à leur composition

Les procédés de construction en terre crue sont étudiés d'un point de vue *performanciel* dans la recherche académique : l'objectif est généralement d'optimiser des performances des matériaux. Ces performances sont principalement les propriétés finales d'usage : résistances mécaniques, propriétés hygrothermiques ; et plus rarement leurs propriétés de mise en œuvre.

La recherche de compréhension et d'optimisation des propriétés mécaniques finales des éléments composés de terre crue ont permis de décrire les liens de dépendance qu'elles ont avec les procédés de façonnage des éléments, et surtout les propriétés de composition des terres employées. Les résistances mécaniques des éléments finaux composés de terre crue dépendent particulièrement de l'homogénéité et de la compacité de leur matrice. Ces deux propriétés d'organisation des solides sont gouvernées par les procédés d'homogénéisation et de compaction qui sont appliqués aux matériaux par des contraintes mécaniques, mais également par des phénomènes spontanés comme le retrait au séchage. Les résistances sont également dépendante de la composition des mélanges : des mélanges plus cohésifs, par exemple riches en minéraux argileux, auront de meilleurs propriétés de cohésion et de plus fortes résistances sèches; c'est aussi le cas des mélanges aux empilement granulaires potentiels compacts, qui permettront de plus grandes compacités.

Mais les résistances au cours des procédés de mise en œuvre sont elle aussi dépendante de l'organisation des matrices et de la composition des mélanges. De plus fortes teneurs en eau, des compositions moins cohésives engendreront des mélanges moins fermes et demandant moins d'énergie de transformation. Certains procédés de transformation comme la compaction, en augmentant progressivement la résistance du mélange, ont un effet rétroactif sur leur propre facilité de déformation. Les dynamiques à l'oeuvre dans chacun des procédés de transformation de la terre crue peuvent être appréhendées par une décomposition de procédés-types plus simples : procédés compactants, cisaillants, ou extensifs (traction). Chacun de ces procédés types fait jouer en proportion différentes les familles de propriétés de résistance des matériaux : friction et cohésion.

Les propriétés finales des matériaux sont donc impactées par la composition des mélanges de terre crue par deux voies principales : directement à travers les propriétés

des composants du matériau final, et à travers les potentiels de transformation qui sont influencés par la composition.

En effet, les propriétés mécaniques des mélanges de terre crue sont gouvernées par la somme des interactions entre tous les grains solides et les fluides. Ces interactions sont regroupées par familles de forces. Les forces de friction résultent des interactions de contact entre différentes éléments solides, c'est à dire les frottements interparticulaires. La friction entre en jeu dans les processus compressifs et dans les éléments compacts, qui forcent les contacts intergranulaires. Les forces cohésives résultent des interactions entre solides et liquides, *via* la cohésion capillaire ; entre solides chargés électroniquement *via* la cohésion électronique ; enfin elle concerne aussi la cohésion interne aux granulats solides et aux matrices cimentaires. La cohésion est donc centrale dans les procédés cisaillants ou extensifs : la somme des interactions cohésives entre grains confère aux mélanges des propriétés de résistance en traction. En maintenant les grains dans des arrangements compacts, les forces cohésives favorisent aussi la résistance en compression non confinée, particulièrement dans les mélanges secs et compacts, qui peuvent bénéficier de cohésions capillaires considérables.

Comprendre ces propriétés d'interactions permet d'expliquer l'apparition de *consistances* différentes selon les terres et les teneurs en eau. Aussi appelées *états hydriques*, on les différencie par les propriétés spontanées qu'adoptent les matrices de terre crue soumises à des contraintes: comportements ductiles ou cassants, adhésion aux outils, affaissement spontané, possibilités de compacter, sont autant d'observations qualitatives qu'il est possible d'expliquer en comprenant les propriétés gouvernant les matrices. Ces propriétés sont celles qui sont ressenties *en pratique* et qui guident les interactions des artisan.es avec la matière : comprendre leur fonctionnement est fondamental si l'on cherche à expliquer les choix techniques relativement aux terres à disposition.

Les familles de forces agissant dans les mélanges sont impactées par leur composition. Les minéraux argileux sont au cœur des propriétés de consistance des mélanges de terre crue. Leur forme élancée et leurs propriétés de cohésion électronique et capillaire apportent des propriétés de tenacité, de fermeté et de ductilité aux mélanges et éléments finis humides, et de fortes propriétés de cohésion aux éléments secs. C'est dans l'interaction avec l'eau que les argiles procurent leurs propriétés aux matrices, car c'est leur état d'hydratation élémentaire à l'échelle microscopique qui gouverne leur comportement et ainsi celui des matrices à l'échelle macroscopique. Par leur élancement et leur charge électronique, la plupart des minéraux argileux adsorbent un manteau d'hydratation conséquent et de ce fait, présentent des propriétés de gonflement. Au niveau des matrices et des éléments de terre crue, ce gonflement implique un retrait au séchage qui dans le cas d'éléments libres de se rétracter, favorise la compaction par retrait dimensionnel. Dans le cas de retraits non libres, la porosité créée peut se rassembler en macroporosité, jusqu'à l'apparition de fissures. L'impact du retrait sur les propriétés mécaniques reste cependant incertain. Les propriétés de cohésion et de retrait des minéraux argileux dépendent de leur composition chimique, mais de manière générale, plus la teneur en minéraux argileux est forte et/ou les argiles sont *gonflantes*, plus la quantité d'eau adsorbée par ces minéraux est conséquente et plus les changements de

consistance délimitant les états hydriques seront marqués et apparaîtront à des teneurs en eau élevées.

Les matières organiques sont souvent associées aux composés humifères présents dans les sols naturels. Ces composés sont extrêmement variables, mais semblent généralement présenter des propriétés d'absorption d'eau plus considérables encore que celles des argiles, sans apporter significativement de cohésion : elles sont donc souvent indiquées comme non désirables relativement aux propriété de construction en terre crue (voir chap 1 xxx). Cependant, comme pour le retrait/fissuration, peu d'information vient confirmer ces suppositions courantes dans la littérature académique. A l'inverse, des matières organiques sont souvent ajoutées aux mélanges de terre crue : fibres macro ou microscopiques, molécules cohésives, etc. Celles-ci permettent d'améliorer des propriétés de cohésion, de ductilité, de cimentation ou de fermeté. La maîtrise de la composition de ces ajouts « naturels » fait toute la différence, car contrairement aux matières organiques naturellement présentes dans les sols, les propriétés apportées sont relativement maîtrisables. Cependant, n'oublions pas que certaines techniques traditionnelles emploient des sols de surface de prairies, parfois très humifères, pour profiter du réseau racinaire et de son effet de maillage voire de cimentation (voir cimentation, gazon xxx).

Les autres éléments solides sont généralement appréhendés par leur taille et leur forme. La distribution granulométrique permet d'appréhender l'empilement granulaire, garant de multiplication des contacts entre les grains et d'augmentation de la compacité, donc de la friction. L'élancement des éléments solides, souvent apporté par l'ajout de fibres dans les mélanges de terre, augmente la tenacité des mélanges ce qui favorise les comportements ductiles des mélanges humides et secs, et raffermit les mélanges plus fluides. La rugosité des éléments solides peut également avoir un impact sur la friction interparticulaire, augmentant les résistances à tous les états mais particulièrement pour les éléments secs.

La composition granulométrique et minéralogique des sols employés dans les mélanges de terre crue dépend de leurs conditions de formation. Celle-ci est multifactorielle : la géologie locale, la topographie, le climat, la faune et la flore, et les interactions entre ces paramètres influencent le développement du profil de sol au cours du temps. Il en résulte une diversité considérable de compositions des horizons pédologiques, et une grande variabilité horizontale et verticale des sol. Le climat tempéré de l'hexagone est favorable à la formation d'une diversité de minéraux, y compris argileux, et à des sols à granulométries variable. La géologie semble avoir un impact central sur les propriétés de composition qui nous intéressent dans le cadre des procédés de construction en terre crue. Le matériau parental influence en effet la taille, la forme et la composition minéralogique des macro et micro granulats ainsi que les propriétés chimiques de la solution du sol.

Relier la pédogenèse aux propriétés d'usage des mélanges de terre crue nécessite d'appréhender une diversité considérable de processus. Le lien entre un composant et son impact sur la réponse d'une matrice de terre crue à une contrainte est complexifié par : la variabilité intrinsèque des propriétés du composant, son interaction avec les autres éléments du sol (solides et fluides), la forme et l'intensité de la contrainte appliquée, les conditions de confinement de la matrice. La quantité d'un composant-type d'un mélange

de terre crue n’impactent donc jamais ses propriétés de manière linéaire, et rarement de manière prédictible (Mitchell & Soga 2005).

8.2 Une conception continue et interdisciplinaire des comportements des mélanges de terre

L’eau a un rôle clef dans les dynamiques des mélanges de terre crue. Les propriétés mécaniques sèches gouvernent les propriétés finales des matériaux ; tandis que les états hydriques humides, plastiques, visqueux et liquides représentent des consistances que l’on retrouve dans les procédés de mise en œuvre. Les techniques-types de construction en terre crue présentent des variabilités dans les procédés, et on peut observer une certaine continuité entre elles. Cette continuité passe notamment par une continuité des teneurs en eau rencontrées dans les procédés. Ainsi, l’étude des propriétés des matériaux terre crue gagnerait à appréhender les mélanges de terre crue comme une continuité d’états hydriques, insaturés et saturés.

La compacité est une autre propriété clef gouvernant les propriétés de tout le cycle de vie des éléments composés de terre crue. La même remarque peut être faite pour les états de compacité des mélanges : il n’y a pas des procédés « compactés » et « non compactés », mais une continuité de compacités variées rencontrées à toutes les étapes de l’ensemble des procédés-types.

Ces observation suggèrent qu’une conception cohérente intégrant l’ensemble des disciplines d’étude des mélange de terre naturels et remaniés est souhaitable: les travaux de géotechnique, pédologie, rhéologie, etc., doivent être parcourus et connectés pour appréhender l’ensemble des états de la terre dans les étapes des procédés de construction en terre crue. Cependant, cela représente un défi, car les méthodes de mesure de la résistance, l’échelle et la forme des échantillons testés, et la terminologie utilisée varient selon les disciplines.

8.3 Une conception volumique des interactions de phases

Afin de comprendre les propriétés des composants des mélanges de terre crue, nous suggérons une approche volumique plutôt que massique. Nous faisons l’hypothèse que cette approche permet de mieux comprendre les interactions entre éléments. Notamment, les propriétés mécaniques des éléments de terre crue sont gouvernées par la *compacité* plus que par la *densité* des matériaux, et par la *saturation de la porosité* plus que par la *teneur en eau massique*.

Le diagramme de phases volumique peut servir à représenter l’état de composition de phases solides, liquide et gazeuse des mélanges de terre crue à tous les états rencontrés au cours d’un procédé de transformation. Deux terres différentes pourraient être décrites par des représentations de leurs comportements selon la composition de phases. Une des limites de cet outil est la prise en compte de l’homogénéité des matrices dans la représentation. Une autre est la rareté des données existantes relatives aux teneurs volumiques, moins aisées à mesurer que les données massiques.

8.4 De la modélisation à la complexification

Ce travail avait pour objectif initial une proposition de modèle reliant les propriétés de composition aux propriétés d'ouvrabilité des mélanges de terre crue. La complexité des interactions et la dispersion des modèles existants entre différents champs disciplinaires n'ont pas permis d'aboutir à une telle réalisation. Surtout, le cheminement de réflexion de ce travail de thèse nous a entraîné vers le développement de questionnement plus holistiques sur le choix technique qui seront développés dans les parties suivantes. Malgré tout, nous pensons que la présente description des liens de causalité permet d'illustrer la complexité des interactions entre la terre et les procédés. Nous espérons qu'elle aide les équipes de recherches à prendre du recul sur d'éventuels objectifs de composer des modélisations mécanistes lorsque l'on travaille sur des systèmes *vivants* : le premier étant le sol, un matériau-écosystème fortement variable, le second étant les systèmes techniques artisanaux, complexes, diversifiés et en perpétuelle évolution. Appréhender des systèmes multivariés nécessite une ouverture et un recul qu'il peut être difficile à avoir dans des disciplines académiques cloisonnées.

L'analyse montre que ce qui limite la conception continue des propriétés de la terre sur l'ensemble du spectre de teneur en eau et de compacités est la faible considération pour les propriétés de la matière au cours de la mise en œuvre. En effet, à l'exception de quelques travaux principalement axés sur la robotisation/industrialisation des procédés de terre crue (Pinel et al. 2017; Ji et al. 2023) et d'un travail sur les propriétés des barbotines pour la terre allégée (Vinceslas 2019), les études concernant les propriétés mécaniques des matrices composée de terre crue proches de la saturation ou saturées, et/ou non compactées sont rares. Pour l'étude des sols « foisonnés » insaturés, la pédologie agronome semble être une piste intéressante à explorer.

Dans l'ensemble, cette analyse illustre le consensus autour du fait que les propriétés intrinsèques des terres impactent les propriétés des matériaux de construction en terre crue. Cependant, nous avons vu que l'impact des procédés de transformation mécaniques de la matière est central sur les propriétés des matériaux, que ces propriétés se conjuguent sur l'ensemble des étapes des procédés de mise en œuvre et d'usage final. Enfin, le choix d'une technique de construction appropriée ne dépend pas que des propriétés mécaniques : les propriétés des matériaux sont à intégrer dans leur contexte de mise en œuvre et d'usage, dont l'influence peut être décisif sur les optimums relatifs à la matière. On peut se demander si, in fine, ce sont les propriétés intrinsèques de la terre qui dominent dans les choix techniques ou si c'est les contextes constructifs qui gouvernent les choix techniques.

8.5 Vers une conception holistique de l'étude des choix techniques

Remonter l'échelle des propriétés de la matière vers la mécanique des matériaux, son intégration dans les ouvrabilités des étapes de mise en œuvre, et la considération de celles-ci dans un système plus global, paraît assez vertigineux. C'est pourquoi nous avons procédé progressivement, en partant de la formation des composants de la terre jusqu'aux propriétés mécaniques des mélanges. La vaste étendue du sujet traité, sa relative

interdisciplinarité et le temps imparti ne permettent pas d'élever ce travail au rang d' « état de l'art », mais il pourrait servir de base à un travail plus exhaustif et systématique.

Nous prolongerons désormais l'analyse par l'impact des mécanismes décrits sur les choix techniques. Une poursuite logique serait l'analyse, étape par étape, des ouvrabilités *physiques* de chaque procédé à chaque étape, avant d'intégrer l'ensemble dans un contexte sociétal plus global. Cependant, nous apercevons par les exemples présentés dans le dernier chapitre que l'ouvrabilité *physique* et les impacts sociétaux sont intimement liés. Choisir de les séparer paraît moins pertinent que de les analyser conjointement. Dans le chapitre suivant, nous analyserons étape par étape les procédés de construction en terre crue, en décrivant à la fois les ouvrabilités liées à la physique de la matière et leur intégration sociétale.

Partie 2 : Evaluation des relations entre terre et choix techniques à partir du patrimoine bâti en terre et de bases de données pédologiques

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 les performances mécaniques (chap 1 xxx). 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*. Dans ce choix, les *performances de mise en œuvre* sont en interaction avec les *propriétés d'usage* dans le choix technique (chap 3 xxx). 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).

[a déplacer en intro?]

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 20^{e} 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 relativement des savoir-faire par observation du patrimoine et expérimentations d'artisan.es passionné.es, dits de l' « avant-garde consacrée » (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.

9 Méthode et Données

9.1 Étudier le patrimoine vernaculaire

Étudier le patrimoine vernaculaire pré-industriel présente plusieurs avantages non négligeables. Dans la plupart des cas, ils 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 (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 dans ce contexte économique, 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 les plus adaptées aux terres employés, dans une préoccupation d'économie de moyens. L'analyse des relations entre *propriétés de la terre* et *choix technique* pourrait donc permettre d'observer des corrélations qui, confrontées à nos analyses des choix techniques relatifs à la terre disponible (chap précédent xxx), serviraient de « validation » des hypothèses.

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; Rinino 2021b; 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, mais pas 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. Le contexte constructif apporte bien trop de variabilité aux procédés et aux objectifs 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 valider nos hypothèses sur l'influence des propriétés de la terre sur le choix d'une technique de construction en terre crue (hypothèses partie procédés xxx). Or, un seul échantillon nécessite un travail de laboratoire conséquent qui s'ajoute à en plus du travail d'analyse de la technique sur le terrain et d'extraction de l'échantillon, rarement possible hors destruction ou 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 nombre considérable d'échantillons.

Cette méthode a 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 moyenne des sols locaux sur les choix techniques.

9.2 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.

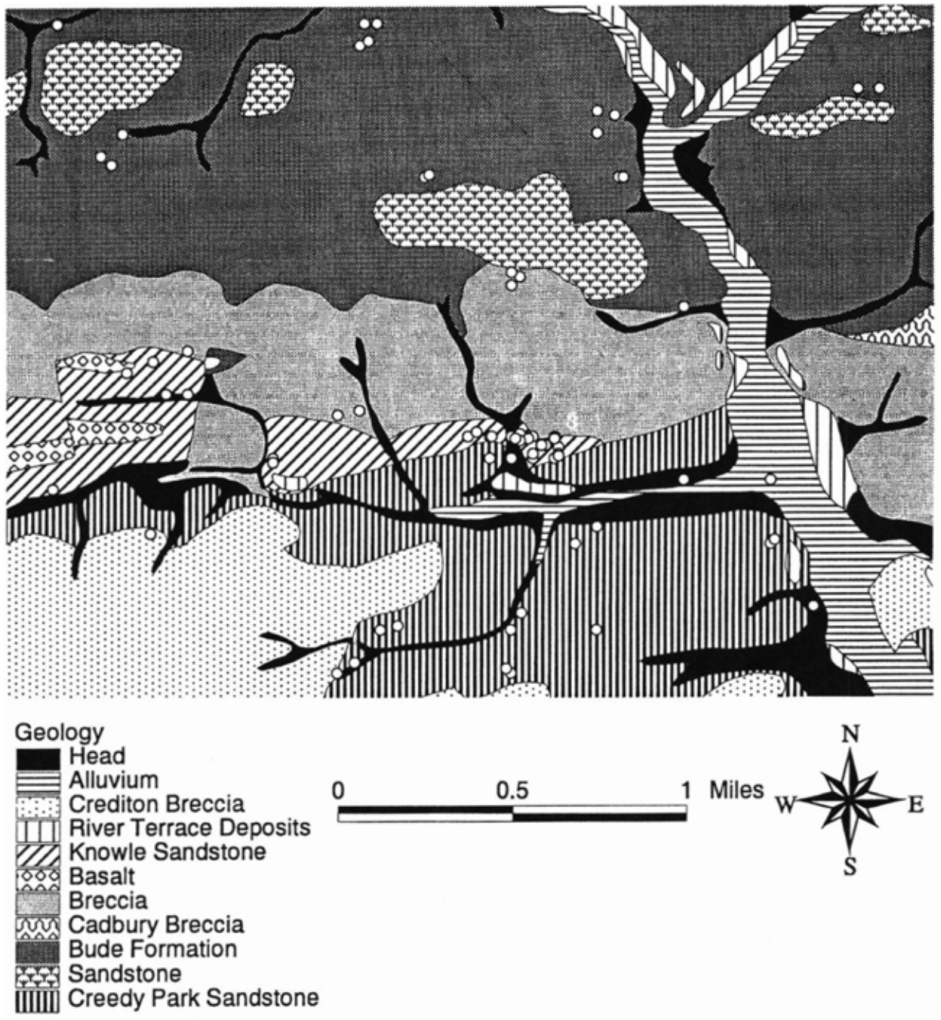
Nous ne traiterons ici que des études ayant mobilisé un nombre conséquent de bâtiments dans des bases de données patrimoniales, ayant donc une portée statistique. En effet, plusieurs études (Harries et al. 1996; Pagliolico et al. 2010) dont certaines ont été évoquées au chapitre 1 (xxx convenance littérature) 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.

[ajouter keefe et al ? Pas sur internet… Y a t il de la carto, ou au moins une comparaison avec carte géol?]

9.2.1 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 Géographiques (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.



(Ford et al., 1999, p. 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 (voir XXX recartographie – zones sans patrimoine?).

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. Erreur : source de la référence non trouvée). 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.

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

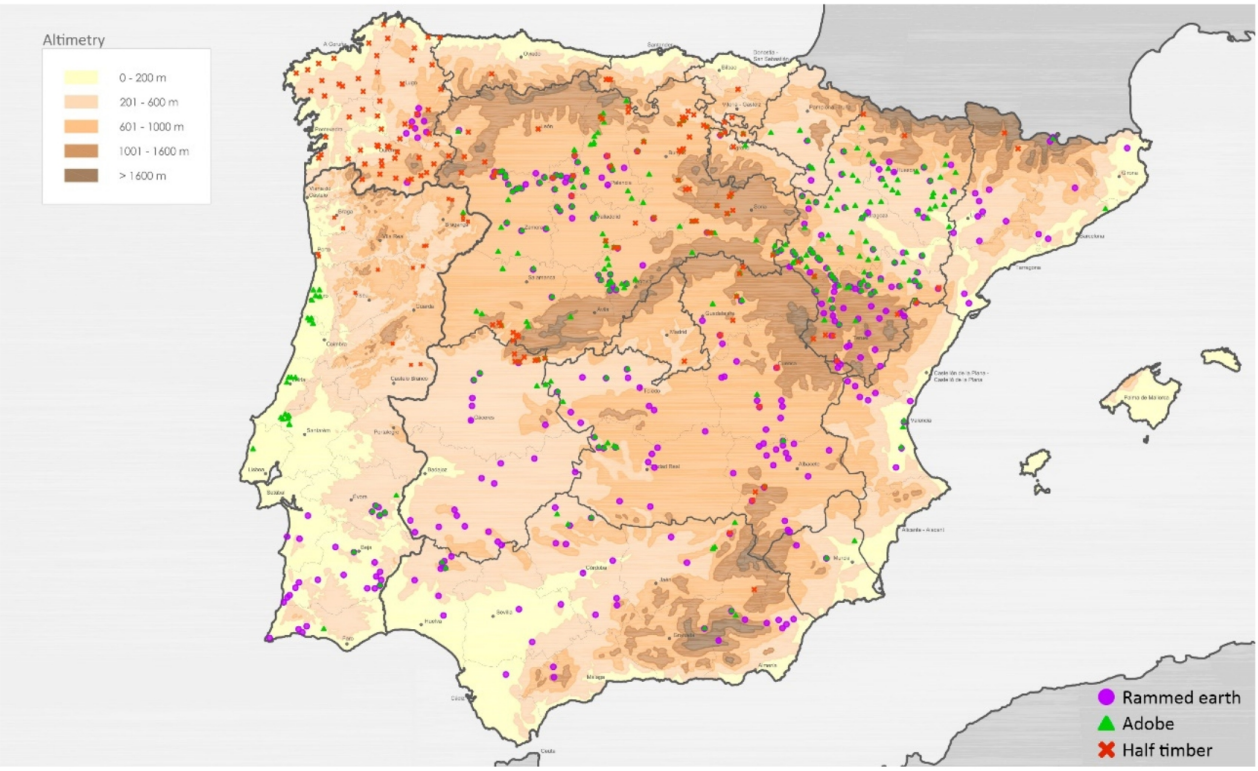


Figure 1. Altimetry/relief and vernacular earthen techniques. Source: Own elaboration based on Dirección General de Planificación Territorial, 1994 [18].

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, la proximité au réseau hydrique, la température, les précipitations annuelles, 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 »).

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 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. 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 causalité.

Les conclusions inspirées par la distribution absolue des bâtiments en terre selon les variables étudiées sont donc difficiles à valider, par présence de biais et 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. Quelques exemples de conclusions sur la distribution *relative* :

- 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.

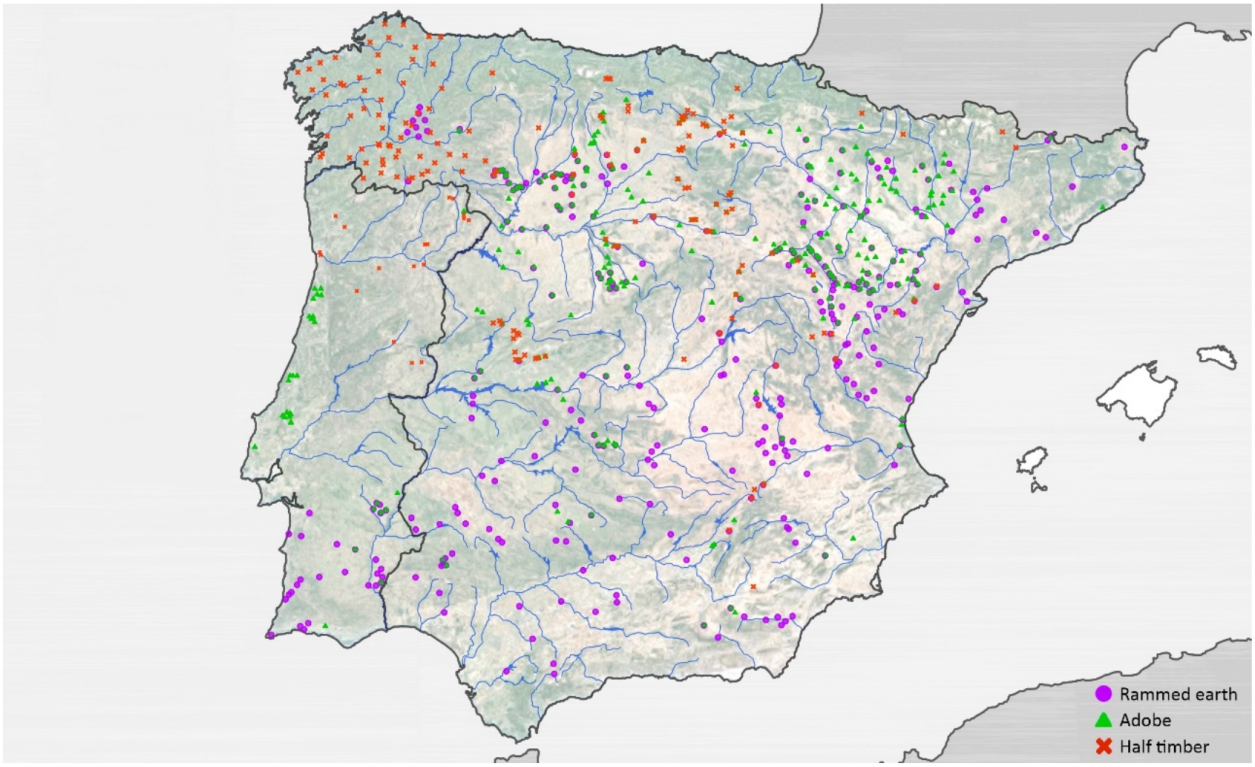


Figure 3. Landscape, rivers and vernacular earthen techniques. Source: Own elaboration based on the Atlas Nacional de España [18] and Google Maps.

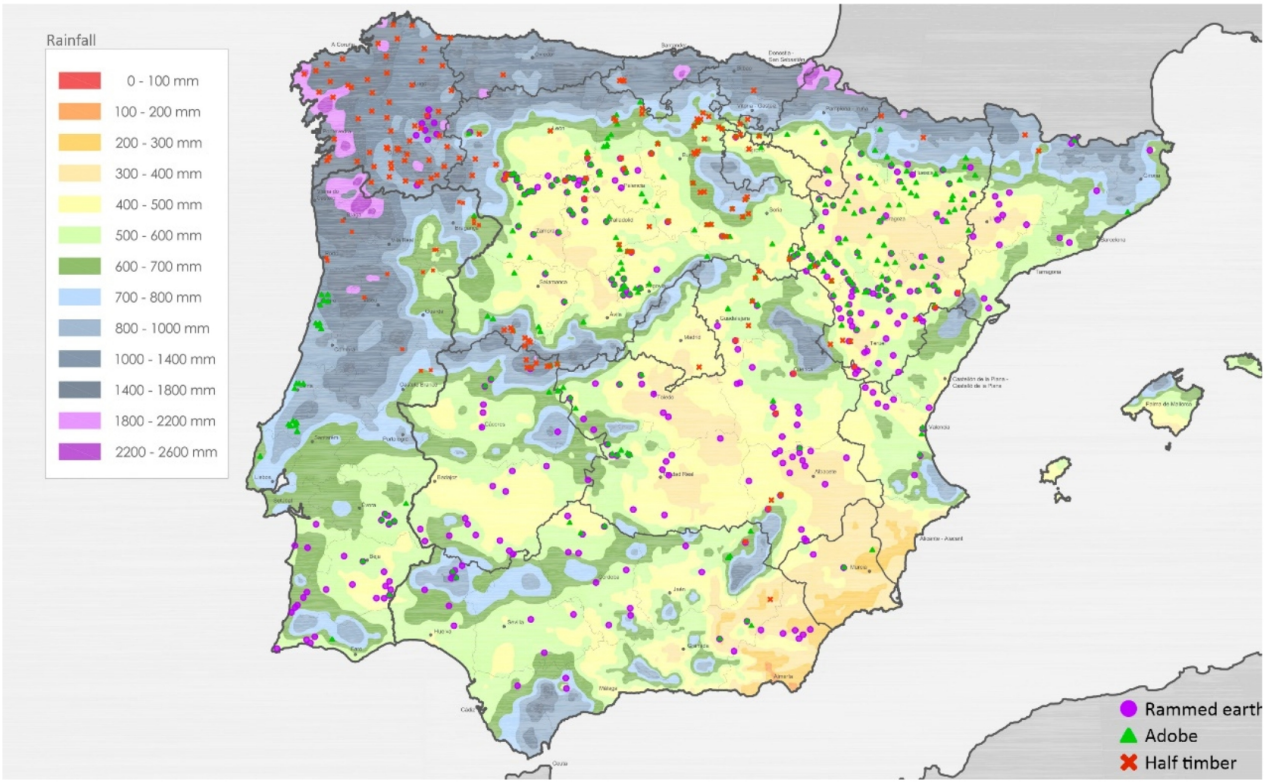


Figure 4. Rainfall and vernacular earthen techniques. Source: Own elaboration based on the Atlas Climático Ibérico [20].

- La présence des techniques de construction en adobes et pisé semble importante dans les régions à lithologie argileuse (Figure 69). Le pourcentage d'adobes y est plus important que celui du pisé. D'autre part, les pan de bois garnis d'adobes soient relativement plus représentés que les pan de bois garnis de torchis dans les régions argileuses. Il est indiqué que cela s'explique par la meilleure convenance des terres argileuses pour la fabrication des adobes. Cette conclusion est tentante mais reste fragile ici encore, au vu des corrélations potentielles entre la lithologie et les autres variables.

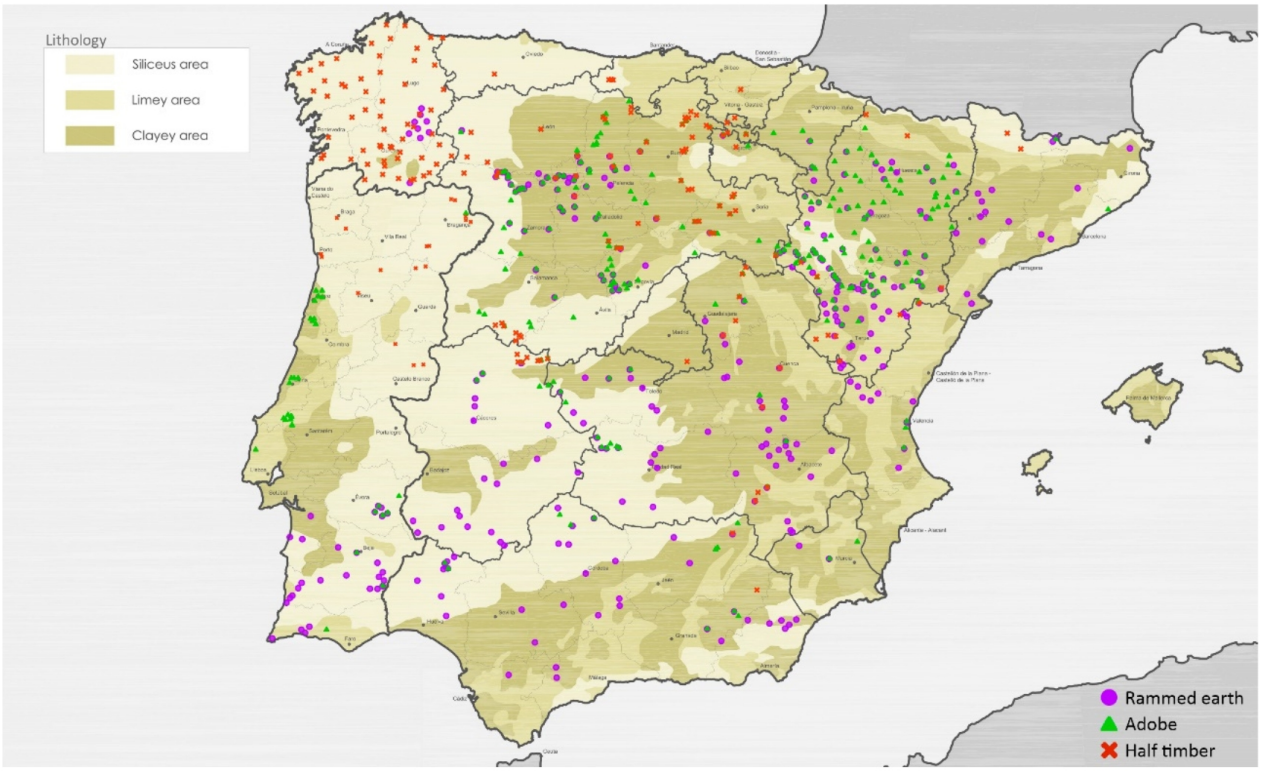


Figure 9. Lithology and vernacular earthen techniques. Source: Own elaboration based on Solé et al. 1952 [18].

Table 8. Relation between the location of earthen construction techniques and geological factors.

Geological Factors	Rammed-Earth		Adobe		Half-Timber		All Techniques	
	323	**%**	**293**	**%**	**178**	**%**	**618**	**%**
Lithology								
Siliceous	92	28.5%	61	20.8%	101	56.7%	214	35%
Limey	57	17.6%	46	15.7%	25	14.0%	106	17%
Clayey	174	53.9%	186	63.5%	52	29.2%	298	48%

Figure 69: Résultats d'observation de la répartition des bâtiments composés de terre crue selon la lithologie du sol (Mileto et al, 2019)

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. Comme pour les études de convenance par analyse d’échantillons recensées dans le chapitre 1 (xxx), 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. »

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.

« 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, p. 17)

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 (cf. chap 1, ou XXX introduction freins, on discute des suggestions de correction granulaoire).

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.

« 1160 half-timbered walls in 916 buildings throughout 320 locations, mostly on the Cantabrian coast and in the northern plateau of Spain. » (Hueto-Escobar et al., 2022, p. 3)

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.

Ici aussi, les résultats de distribution *relative* entre les techniques peuvent cependant être repris. Les auteur.ices 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. Aussi, les territoires argileux sont légèrement plus denses en techniques garnies de terre autoporteuse qu'en autres matériaux. 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. Cependant, pour les remplissages en « terre et bois », c'est à dire *a priori* en torchis appliqué sur une structure, l'inverse est observé : la fréquence est moindre que les techniques non comblés de terre. En l'absence d'informations sur la répartition relative des différentes techniques de terre crue dans la zone d'étude (la carte présentée en Figure 70 ne permet pas de distinguer les matériaux employés), il est difficile de conclure quant à une influence de la terre sur le choix technique.

En guise de conclusion, nous soulevons 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. La lecture par pourcentage de distribution direct est très biaisée. En effet, que veut dire une distribution de 91.9 % de bâtiments en pisé dans les zones à pluviométrie faible (300-700mm) ? Cela dépend de la distribution de la variable sur la zone étudiée, des biais d'échantillonnage, de la présence d'autres matériaux adéquats pour construire, de la densité bâtie en général… avant de représenter 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 sous-bassements) 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.

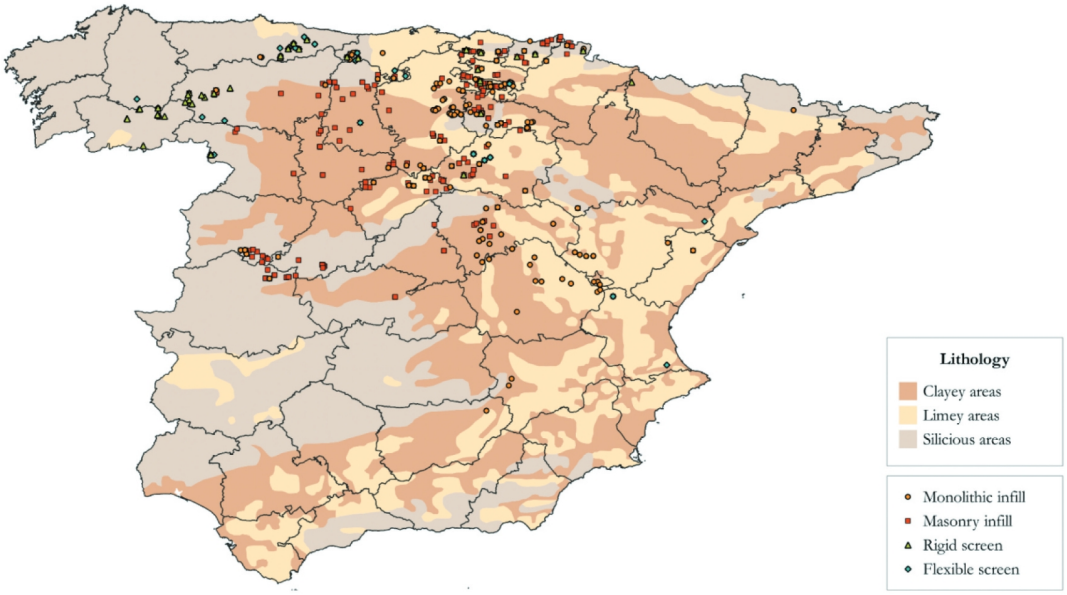


Figure 12. Lithological domains and half-timbered walls, classified by material variant. Source: Authors, based on Atlas Nacional de España (Instituto Geográfico Nacional 2019).

Table 6. Correlation between lithological domains and documented half-timbered walls, classified by main material used for infill or enclosure.

Lithology	Stone		Bricks		Earth		Timber and earth		Timber	
Limey	62	36.3%	98	47.1%	211	33.3%	21	22.6%	8	14.8%
Clay	36	21.1%	43	20.7%	239	37.7%	5	5.4%	2	3.7%
Siliceous	73	42.7%	67	32.2%	184	29.0%	67	72.0%	44	81.5%
	171		208		634		93		54	

Figure 70: Résultats d'observation de la répartition des bâtiments en pan de bois selon la lithologie du sol (Mileto et al, 2019). Sur la carte, c'est le type de mise en œuvre qui est distingué et non le matériau. La table distingue les matériaux mis en œuvre et leur distribution.

9.2.3 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 Erreur : source de la référence non trouvée) et comprennent à la fois des bâtiments composés de terre crue ainsi que d'autre matériaux (« timber, stone, earth, fired bricks » (Hamard, 2017, p. 48)). Le matériau de construction et la datation du bâtiment sont notamment renseignés pour chaque bâtiment (avec plus ou moins de certitude, voir Erreur : source de la référence non trouvée xxx ?). 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). Etant composées d'Unités Cartographiques de Sol (UCS), la représentation cartographique ne donne pas directement les valeurs des propriétés pédologiques (voir 9.4.2.1). 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 71.

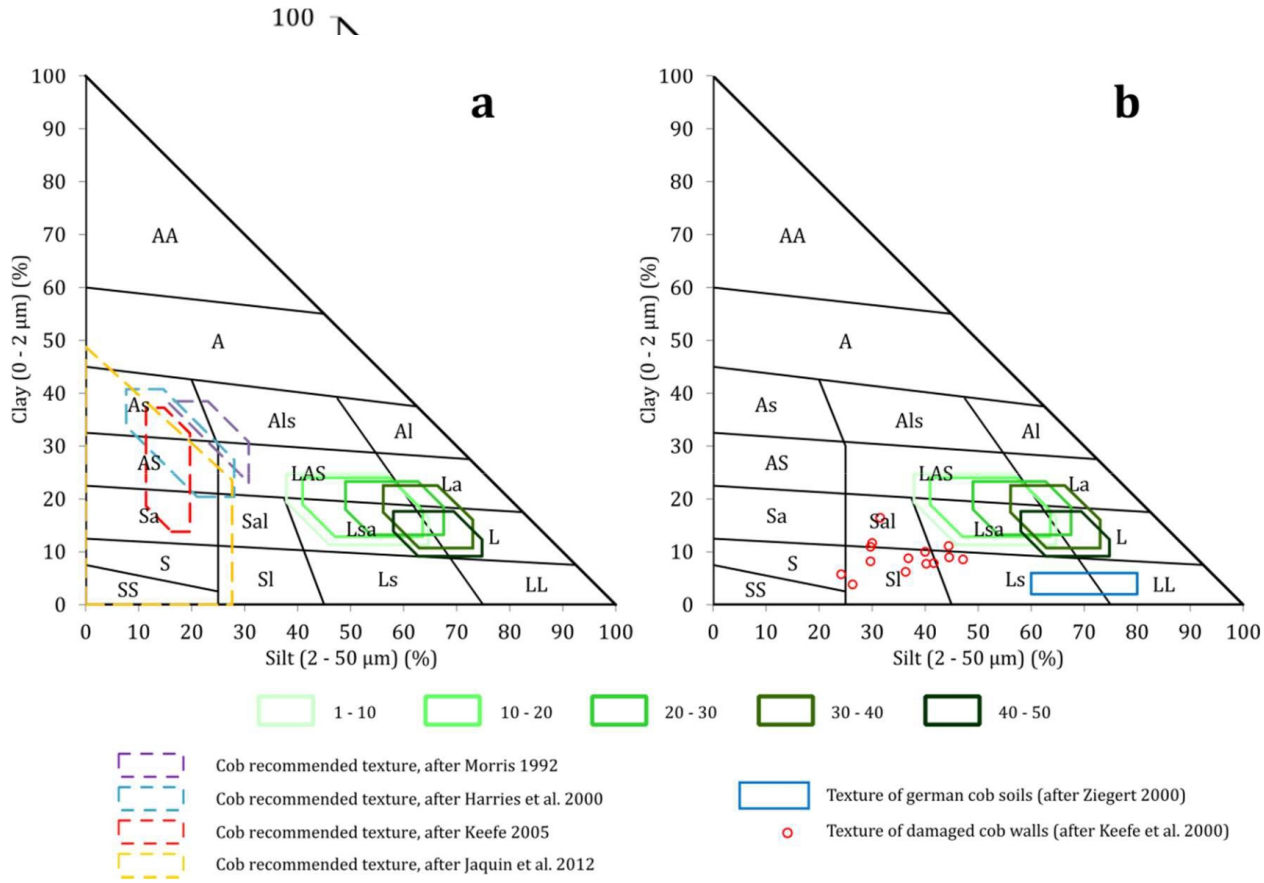


Figure 72 : (également représentée en fig. XXX). Texture des sols employés pour la construction en bauge dans des bâtiments vernaculaires en Bretagne (dégradé vert par densité bâtie en bauge relativement à la densité de bâtiments vernaculaires). A gauche, comparée à 4 seuils de référence (tirets discontinus). A droite, comparée à celle de bâtiments observés en Allemagne (bleu continu) et Royaume-Uni (points rouges). (Hamard 2017).

bâtiments vernaculaires) (Hamard 2017)

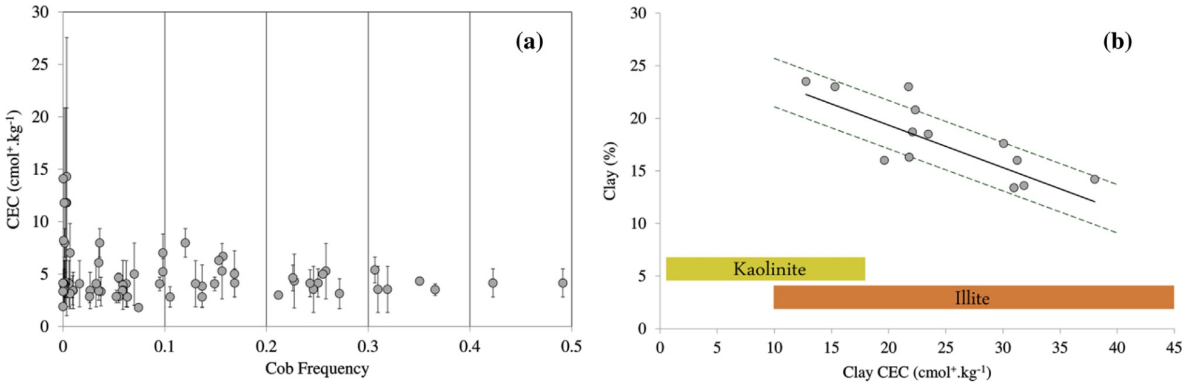


Fig. 9. Cation Exchange Capacity (CEC) of strata of Brittany plotted against cob frequency (a) and clay content of strata with a 20–50% cob frequency plotted against the CEC of clay fraction (b).

(Hamard et al., 2018, p. 494) plus argilo-sableux : plus résistant ; plus limoneux, plus facile à mettre en oeuvre ?

[déplacer cette discussion dans le chap précédent, conclusion choix technique relatif a la terre ? Ou alors évoquer résultats relatifs a la facilité de mise en oeuvre]

La densité relative de bâtiments en terre crue croît progressivement avec la teneur en limons, 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. Cette tendance 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.

Les résultats sont comparés aux recommandations de limites de textures issues d'essais mécaniques visant à optimiser la résistance d'échantillons de bauge Figure 72. Ceux-ci placent les zones de convenance à des granulométries bien plus argilo-sableuses que les résultats obtenus. Cependant, 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 72. 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 choisis pour leur faiblesse structurale, 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 autres données 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. P

Ces résultats ont été employés pour commenter la différence significative entre les recommandations de la littérature académique, que l'on suppose issues d'essais de résistances mécaniques, et la diversité des matériaux employés dans les bâtiments vernaculaires. 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 pas qu'à la résistance mécanique, mais également (et certainement principalement) à l'aisance de mise en œuvre de la matière. À l'extrémité limoneuse de l'axe repéré, la mise en œuvre serait facilitée par une cohésion moins forte et une teneur en eau nécessaire plus faible (xxx chap précédent). A 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, la teneur en eau nécessaire plus forte et donc l'homogénéisation nécessaire plus intense : des propriétés non considérées dans les essais mécaniques de laboratoire (xxx). De plus, le mélange nécessiterait plus de fibres pour amortir le retrait non-libre de la bauge *in situ*, alors que dans le laboratoire les échantillons bénéficient de retraits libres (xxx ref). 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 plein pied), optimiser la mise en œuvre pour réduire le temps de travail induirait un emploi privilégié de matériaux plus limoneux, comme observé dans le patrimoine vernaculaire.

Lorsque l'on observe la distribution des résultats de convenance non agrégés (Figure 73), des densités nulles sont relevées en Bretagne pour les zones granulométriques correspondant aux bâtiments observés au Royaume Uni et en Allemagne. (entourer sur la figure?). 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 peut 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* induit donc 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.

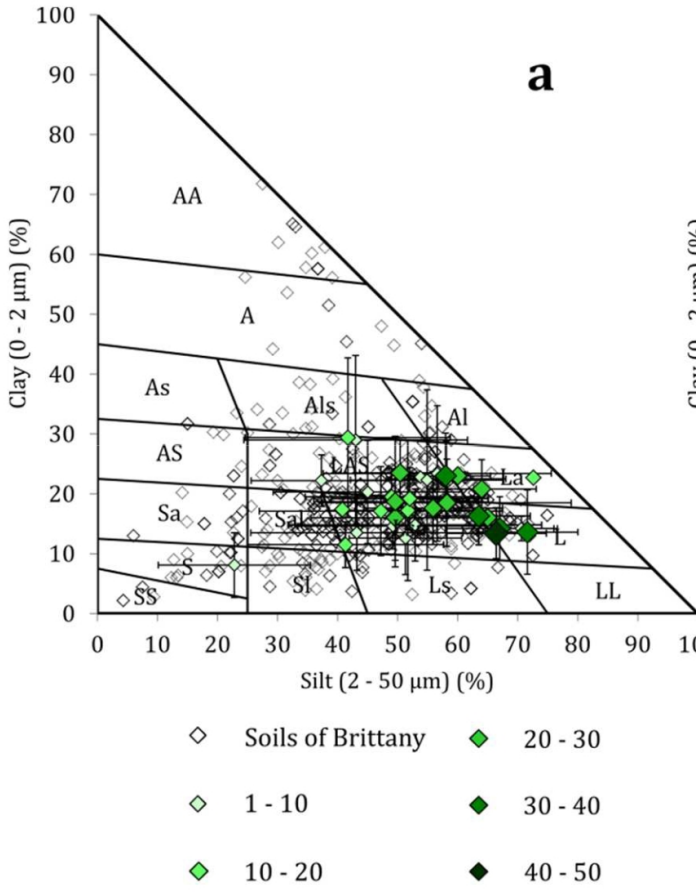


Figure 73 : densité relative bâtie en bauge pour chacune des unités pédologiques étudiées, selon leur texture moyenne. Le fait que certaines unités pédologiques ne soient pas densément bâtie en bauge peut vouloir dire que la technique n'y est pas connue, autant que les propriétés de la terre ne sont pas convenables.

9.2.4 Conclusion

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.

9.3 Théorie : choix technique et propriétés pédologiques en période pré-industrielle

[a partir des observations de la méthode précédente, nous proposons une théorie des facteur sayant pu impacter les choix techniques en contextes pré-industrialisation ou à ses

débuts en france hexagonale ; et les impacts de ces facteurs sur les méthodes d'analyse des relations entre sols et choix techniques de terre crue]

9.3.1 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 (xxx procédés). L'objectif du présent travail sera 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 préciser 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 en partie XXX (procédés). 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 (xxx préambule interdisciplinarité).

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.

[XXX selon si je le présente au chap d'avant ou pas, je pourrais le mettre en fin de cette partie :

Depuis, les contextes ont bien changé : nous discuterons des variations liées à l'avènement des sociétés industrielles mondialisées contemporaines dans un ultime paragraphe]

Un schéma résumant les interactions entre les paramètres décrits est proposé en Figure 74.

9.3.2 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 la dispersion des résultats de corrélation entre l'occurrence d'une technique et une propriété environnementale dont on cherche a voir l'influence sur le choix technique. Cette variabilité n'est pas corrélée à la propriété elle-même, mais présente une influence *aléatoire* sur l'ensemble des échantillons. 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, peut-être influant positivement ou négativement la facilité de mise en

œuvre de certaines techniques-types, mais également corrélé à l'accès à la pierre pour construire, 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**

- les ressources « naturelles » et techniques

- la culture constructive

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 décrits en partie xxx (xxx).

9.3.3 L'installation préférentielle

9.3.3.1 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 un 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)

9.3.3.2 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 à aux propriétés pédologiques, par exemple la proximité de réseaux routiers ou encore la présence de forêts (voir xxx plus loin), il ne s'agit que d'une composante aléatoire qui fait baisser l'acuité de la relation sol-choix technique, sans modifier sa forme.

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.

9.3.3.3 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.

9.3.4 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 (ref?), 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 (Mille 2023).

L’environnement matériel est ici vu comme un continuum entre les ressources de l’écosystème peu impactées par la société humaine, comme les propriétés des 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 dont les sciences humaines et sociales ne peuvent désormais que faire le deuil (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).

9.3.4.1 Géographie et climat

Si la géographie et le climat influencent l'installation préférentielle des populations, une fois celle-ci normalisée par la prise en compte de la densité bâtie, ces variables impactent également les choix préférentiels des techniques de construction.

Nous avons constaté la dépendance au climat des techniques de construction en terre crue. Parfois, directement parce qu'elles gouvernent des variables de teneur en eau du sol ou par l'impact de la météo sur les éléments au cours de la mise en œuvre (séchage, gel) (partie procédés xxx). Parfois, plus discrètement, par exemple dans les choix architecturaux : isolation/inertie, durabilité et protection des éléments (enduits, débords de toit, sous-bassements, etc.).

Hueto-Escobar et al. (Hueto-Escobar et al., 2022, p. 18) montrent en effet que la hauteur des sous-bassements, 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[33].

Il est probable que le climat local ait des climats plus difficiles favorisent l'emploi de techniques supposées plus résistantes, 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-Pyrennées ou en Bretagne (Marfaing et al. 2000; Bardel & Maillard 2009). De même, les zones inondables sont peu investies par les bâtisseur.euses vernaculaires en général mais lorsque c'est le cas, par exemple pour des moulins, la terre est rarement employée.

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 (voir procédés xxx, rappeler conclusions ici?).

9.3.4.1.1 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 (voir xxx propriétés sol) 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

33 Toutes proportions gardées sur la qualité de ces conclusions, voir xxx hueto escobar

élevée pendant l'essentiel de la saison, comment le suggèrent les artisan.es contemporain.es (xxx procédés).

9.3.4.2 Terre

[en fait, peut être pas détailler à priori… car ce sont les variables qu'on étudie, donc ça serait faire l'hypothèse des résultats... Ou alors, c'est une partie de la méthode à part, et on y fait référence ici (« résultats attendus ? »). Pour les mortiers pour la pierre, il faut bien parler de l'ouvrabilité de la terre… Mais on peut juste le mentionner sans tout détailler.]

[Peut etre supprimer terre en fait. Il me semble qu'on ne fait que : reprendre ce qui est dit au chap précédent OU parler de biais qui sont dans les autres paragraphes. La preuve on en a pas besoin dans le tableau. En fait déplacer brique cuite dans energie et tech]

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. Nous avons vu que 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.

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. Les alternatives à la terre sont relativement accessibles et sa modification par amendement l'est également (xxx discussion amender pas grave si enduit ou mortier). En ce sens, c'est un facteur probablement peu conséquent sur les choix techniques.

En revanche, les procédés de fabrication de briques cuites travaillent directement la matière terre et sont favorisées par des sols très argileux aux alentours des briquetteries. Les sols calciques pourraient être d'autant plus favorables à la brique cuite car selon Smith & Austin (1989:20) les ions calcium réduisent la température de calcination des briques [réaction similaire à la chaux ? xxx].

9.3.4.2.1 Biais et aléa

L'abondance de ressources adéquate, très argileuse et peut être calcique, 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. Celui-ci ne serait probablement pas conséquent, tant les propriétés de composition argileuse de la terre sont importantes sur la mise en œuvre de la terre crue, mais pourraient exacerber ou réduire des tendances observées.

9.3.4.3 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, XXX, 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.* (voir plus loin xxx urbain). 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 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).

9.3.4.3.1 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.

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 de cette ressource étant peu limitant on peut considérer que la corrélation avec les sols alentours des bâtiments reflètera peu ce choix : 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), la corrélation sol-technique sera moins directe.

9.3.4.4 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, le pisé n'ayant généralement pas de fibres (cf. partie 3 : fibres XXX). 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 (cf. Partie 1 : techniques modernes : terre allégée/cobBauge XXX), 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). Ce peut être parce que l'isolation des maisons n'était pas une variable centrale dans le choix des propriétés des matériaux, ou plus certainement que l'excédent de production de fibres caractérisant les systèmes agricoles mécanisés modernes était moins conséquent à l'époque.

Ainsi, des aléas et biais sur les variables environnementales relatifs aux fibres sont peu susceptibles d'apparaître à l'échelle du territoire hexagonal.

9.3.4.5 Eau

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 (cf. Partie 1 : classer les techniques XXX)). Souvent, les constructeur.ices s'arrangent pour extraire la terre au moment où sa teneur en eau est proche de celle désirée (cf. Partie 3 : extraction XXX). Peut-être même que les choix techniques ont été influencés par les teneurs en eau des sols locaux (cf. 9.3.4.1 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.

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 des teneurs en eau par masse de terre selon l'ordre suivant : torchis > adobe ≥ bauge > pisé (cf. Partie 3 : eau XXX). Notons que la teneur en fibre courante suit cette même tendance. Il est possible que la quantité d'eau nécessaire par unité fonctionnelle*, c'est à dire par m² de mur, ne soit pas directement proportionnelle à la teneur en eau massique supposée puisque l'épaisseur de mur influence le volume total de matériau.

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.

9.3.4.6 *Pierre*

Les techniques de construction employant de la pierre en France métropolitaine sont diverses et variées. La provenance du matériau varie également, de la *cueillette* locale (Amouroux et Saramon 1982, p 20) permettant par la même occasion d'épierrer les champs et faciliter les travaux agricoles (Klein 2011), aux carrières plus ou moins centralisées et mécanisées.

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.

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. Selon comment est définie l'occurrence du matériau, par une occurrence brute ou pondérée par l'intensité de la technique dans le bâtiment, la hauteur du sous-bassement en pierre peut être considérée comme une forme de continuité du choix préférentiel (voir discussion en 9.3.5.7.1 xxx ?). Notons également l'existence d'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 maçonnées avec un épais mortier de terre (cf. Partie 1 : techniques de terre crue xxx).

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. 9.3.5.5), 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 (voir techniques terre xxx).

Dans l'ensemble, si l'accessibilité et l'ouvrabilité de la pierre ont pu avoir des impacts directs sur certains aspects de la performance des techniques de terre crue, il est probable qu'ils soient mineurs et non significatifs relativement à la facilitation de la construction en 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, 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)

9.3.4.6.1 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 profond = pierre plus 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.

Cela, avec des effets variables selon les techniques de terre considérées : les techniques massives, notamment compactées (pisé) semblent moins gênées par la présence de pierres dans la terre (Partie 3 : XXX).

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 la terre qui relève de leur influence via la *facilité de mise en œuvre des techniques de terre* ou via l'influence indirecte de la *facilité de mise en œuvre des techniques de pierre.*

Cependant, ce biais s'applique à toutes les techniques de terre crue puisqu'il est leur est défavorable *via* la concurrence des techniques de pierre. Dans une comparaison relative entre différentes techniques de terre crue, on peut penser que l'accès à la pierre n'impliquera pas de biais conséquents.

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, 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 soit d'importance dans l'intensité relative d'occurrence des techniques de terre. Cependant, la part qui est corrélée aux variables pédologiques reste incertaine.

9.3.4.7 Ressources énergétiques et systèmes de transports

9.3.4.7.1 Impact sur les techniques de pierre, terre cuite, chaux, ciment

La disponibilité des ressources énergétiques externes* 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[34] 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[35] 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

34 Note : en fait, ces nouvelles sources d'énergies s'additionnent dans le mix énergétique global (xxx fressoz histoire de l'énergie)

35 Idem

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 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, p. 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 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.

9.3.4.7.2 Relations avec la terre : distance de transport

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 (xxx procédés). 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 le choix de la terre est agrandi et ainsi la facilité de mise en œuvre potentiellement optimisée.

Pour les techniques autorisant une préfabrication des éléments comme les adobes, le transport du matériau permet une gestion de la temporalité du procédé (xxx procédés préfa). 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 (xxx procédés transport).

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).

[Pourtant, les procédés en bauge rationalisés ont existé ? XXX suggère que c'est ce « retard » de rationalisation qui a mené ces procédés à leur disparition ;]

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 XXe, et peu sur son transport, sauf éventuellement pour les adobes qui de ce fait ont pu être préférées aux autres techniques de terre crue dans les contextes techniques intensifs.

Pour les techniques nécessitant une fabrication sur site, il est probable que la facilitation du transport des matériaux soit moins favorable à un développement de l'emploi de la terre par facilitation de l'accès à des ressources optimales, que défavorables à son emploi par l'apport de matériaux concurrents comme la pierre ou la brique cuite.

Il est probable que cela soit vrai également pour les techniques préfabriquées. Cependant, leur meilleure adaptation aux systèmes techniques intensifs que les autres techniques de terre crue leur apporte certainement un avantage *relatif* parmi les techniques de terre.

9.3.4.7.3 Relations avec la terre : matériaux secondaires

[voir doublons avec assotiations techniques?]

La présence de contextes constructifs favorables a la pierre ou a 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, si leur accessibilité facilite dans l'absolu la mise en œuvre de certaines techniques de terre crue, il est probable que ces matériaux, comme la pierre favorisent relativement plus l'emploi de techniques non composées de terre crue. La chaux est employée préférentiellement à la terre comme mortier pour les techniques de pierre, la brique cuite a remplace progressivement la brique crue dans les cultures constructives Occitanes et « champenoise » [ref? Siècle ? Terminologie régions ?], bien qu'elle ait 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 à l'établissement d'une « pudeur » symbolique dévalorisant le matériau relativement à la pierre dans de nombreux contextes culturels (cf. 9.3.5.5), et peut participer à la réduction du choix technique de la terre crue.

9.3.4.7.4 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.

L'emploi de briques cuites et de la pierre est favorisé par des conditions d'abondance énergétique, impactant probablement négativement l'emploi des autres techniques de construction 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 (cf. Erreur : source de la référence non trouvée). 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 décorrelle les choix techniques et les variables environnementales.

La cuisson et la distribution de la chaux est facilitée. Celle-ci remplace progressivement les mortiers de terre dans les maçonneries de pierre. 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 9.3.5.5).

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 vont croissant avec la délocalisation des matériaux employés.

9.3.4.8 Conclusion 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. 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 défavoriser la première technique dans un choix *relatif*.

Le Tableau 3 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 optimque, 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 3 : 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			+/-		+/-	±

9.3.5 Cultures constructives

Dans un même lieu et souvent dans une même période, se superposent plusieurs techniques-types de construction en terre et/ou en d'autres matériaux. 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 si petite échelle qu'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. 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*.

Les facteurs d'influence de la culture constructive sont nombreux : les besoins techniques, désirabilité esthétique, coût économique, contraintes administratives (Fabbri et al. 2022) ; 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 la désirabilité esthétique 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.

9.3.5.1 Diffusion

De toute évidence, le développement d'une techniques nécessite au moins sa connaissance dans les savoirs vernaculaires locaux, qui dépend 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 ».

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 ».

9.3.5.1.1 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 apportée 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 (voir xxx délimitation spatiale buffer).

9.3.5.2 Coutumes et rythmes saisonniers de subsistance

[AJOUTER un ex : adobes en occitanie. Cf. témoignage de la dame de la maison en damier ? cf. autres bouquins echanges transdis ?]

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. 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*.

9.3.5.2.1 Aléa biais

En contexte favorable pour son inclusion dans l'organisation générale de la subsistance, une technique a bien plus de chance de se déployer localement. 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.

9.3.5.3 Performances techniques d'usage

Aujourd'hui comme hier, la construction d'édifices a pour principal objectif leur usage en service comme habitat. 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* catégorisation approximative de ce qui concerne la mécanique et l'hygrothermie des matériaux a partir de l'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.

9.3.5.3.1 Contraintes mécaniques

La terre crue, même porteuse, ne se limite pas à certaines fonctions spécifiques du bâti. Elle est employée « 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.

Les techniques d'adobes ont aussi de bonnes performances, leur forte résistance et leur format maçonné permettent la réalisation de parois relativement étroites.

9.3.5.3.2 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. [photo, frinière ou terrain xxx]

9.3.5.4 Performances techniques de mise en œuvre

9.3.5.4.1 Intensité de travail

L'occurrence du patrimoine bâti en terre dépend de la facilité de mise en de dans la technique considérée, comprenant l'ensemble des étapes du cycle de vie (XXXchap précédent, rappelé au paragraphe « matériaux-terre » précédent). 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 l'ensemble du travail de construction est réalisé dans l'espace social des habitant.es, en d'autres termes lorsque le coût du travail est le même pour les habitant.es et les fabricant.es du matériau, la technique de mise en œuvre choisie dépend directement de cette facilité de mise en œuvre. Celle-ci regroupe toutes les considérations de l'écosystème matériel (xxx) 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 maçonnée directement, la bauge et le pisé locaux, sont probablement les mises en œuvre les plus directes et donc plus économes

- 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.

9.3.5.4.2 Intensité de l'espace-temps disponible : contraintes d'organisation du chantier

[a voir si cette partie n'est pas redondante avec le chap procédés : contexte extensif/intensif]

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, surface de séchage pour les éléments préfabriqués (xxx procédés).

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.

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).

Si les techniques de torchis et d'élements préfabriqués se prêtent volontiers au contexte urbain intensif en temps et en espace, le pisé a également une place techniquement adéquate en milieu urbain. Il compose par exemple une grande partie des bâtiments de l'espace urbain Lyonnais (Mille 2023). 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).

9.3.5.4.3 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 (xxx intro). Mais, dans une économie monétaire où les capitaux et rémunérations ne sont pas égales, 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 20^{e} 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, cette technique est 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 l'intensité des aléas potentiellement apportés à l'occurrence du patrimoine en terre par la position sociale moyenne des habitant.es est proportionnelle à

cette domination économique, et que les éventuelles orientations de choix préférentiels d'une technique sur une autre sont plutôt indépendantes de cette variable et plutôt gouvernées par la *désirabilité* de la technique.

9.3.5.5 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 le marais Vendéen, Le Boeuf (Le Bœuf 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).

Dans le puy-de-dôme, Letterlé & Fizellier-Sauget (2011 : 367, dans Goizauskas 2020) observent une corrélation étroite entre le matériau de construction et la classe sociale des habitant.es: « 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’. »

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 contexte 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 (xxx intro) 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, son utilisées au-delà du nécessaire comme caractères esthétiques, 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.

9.3.5.5.1 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.

9.3.5.6 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 (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.

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 régulations ont pu être facilitatrices ou exclusives 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 son esthétique rurale ; 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).

9.3.5.6.1 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 question de la contrainte réglementaire est une celle d'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 xxx. 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.

[pas clair?]

9.3.5.7 Conclusion : cultures constructives

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 4 résume les interactions positives et négatives que les facteurs d'origine urbaine ont sur les choix techniques.

Dans l'ensemble, il est difficile d'imaginer des liens systématiques avec les variables pédologiques, du moins pas autant qu'avec les variables de l' « écosystème matériel ». Mais l'influence de la culture constructive apporte certainement beaucoup d'aléa dans le choix technique, ce qui 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 4 : 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 favoriable 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	+/-		+/-	+/-

9.3.5.7.1 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'un 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 (xxx) : 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 d'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 a 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 (xxx procédés). 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.

Une telle association avec le pisé est plus difficile à envisager puisque la force de compaction pourrait rompre les adobes sous-jacent. De plus, la mise en œuvre traditionnelle du pisé est rarement impactée par les temps de séchage (xxx procédés).

L'adobe est un matériau idéal pour combler des ouvertures ou réparer des fissures (xxx procédés, observation frinière ?, observations terrain). 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.

9.3.6 Conclusion

9.3.6.1 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 ? Cette question mérite d’être posée, tant l’influence socio-environnementale des autres facteurs peut être importante.

Nous proposons sur la Figure 74 une représentation de ce qui peut expliquer le choix d’une technique de construction en terre crue. 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) est le lien que l’on cherche à mettre en évidence dans cette étude. Mais d’autres facteurs influencent cette corrélation directe, que l’on a identifié comme pouvant présenter également 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*.

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 non.

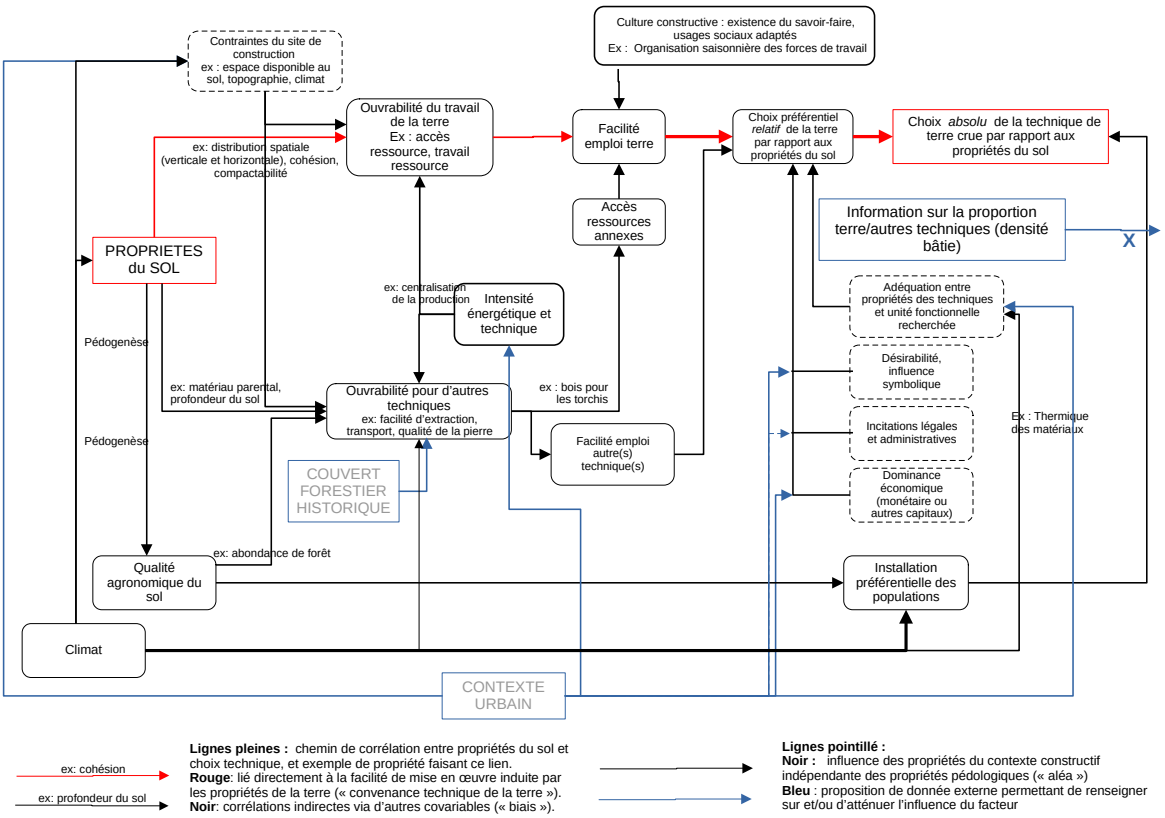


Figure 74: Facteurs de corrélation entre propriétés du sol et occurrence de techniques de construction en terre crue, et facteurs externes d'influence sur le choix technique. Propositions de covariables permettant d'appréhender certaines des influences du contexte constructif. Par exemple, la densité bâtie permet d'éliminer le biais lié à l'installation préférentielle des populations.

9.3.6.2 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 » intègrent les liens de corrélation, qui dépassent 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 on suffisamment décorrélé de cette propriété, par exemple déséquilibré entre le contexte urbain/rural, peut changer cet aléa en biais d'interprétation.

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 corrélation par des aléas vraiment décorrélés des propriétés pédologiques n'est pas forcément problématique. Au contraire, on considérera que **la baisse de l'acuité est corrélée à l'importance du contexte constructif dans le choix technique, hors influence du sol**. Sa caractérisation permettra de discuter de l'importance du déterminisme matériel sur les choix techniques. Ainsi, si malgré l'emploi de données de qualité et un traitement adéquat, nous n'arrivons pas à dégager de tendance claire ou expliquable 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. (xxx).

Une fois ces aléas et ces biais identifiés, il est utile de les réduire, ou au moins quantifier leur influence potentielle, via l'introduction de variables externes, afin de « dégager » les choix techniques liés à l'ouvrabilité de la terre à disposition.

Nous ajoutons alors à la Figure 74 des propositions de données qui pourraient renseigner et/ou éliminer des biais (pointillés bleus). 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, notammen 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 ;

- 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.

- 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

- 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 relatifs selon les techniques-types.

9.3.6.3 Un déterminisme environnemental ?

[en discussion?]

> « S'il est vrai que les hommes font leur propre histoire, mais pas dans les conditions de leur choix, comme le dit Marx, il n'en est pas moins vrai que l'histoire fait la société, mais pas dans les conditions de son choix. La dimension cachée que suggère ce jeu avec les mots et la célèbre formule de Marx n'est autre que l'histoire naturelle qui participe à la formation de l'histoire sociale - et bien en tant que nature active, concrète, existentielle, qui émerge, d'une phase à l'autre d'un développement toujours plus complexe, sous la forme d'écosystèmes également complexes et dynamiques. » (Bookchin, 1982, p. 31)

Le terme de « biorégion » apparaît pour la première fois dans l'article « Reinhabiting California » publié en 1977 dans la revue « The Ecologist » par Peter Berg et Raymond Dasmann. Le mouvement biorégionaliste, qui hérite des réflexions du philosophe « écosocialiste » Murray Bookchin, s'est alors progressivement constitué autour de cette question de compréhension des écosystèmes humains et non humains.

Une biorégion peut être définie par la délimitation d'un territoire qui n'est pas établi par une administration nationale mais par des limites géographiques qui considèrent l'ensemble des écosystèmes humains et non-humains et leurs interactions, dans une approche pensant la décentralisation des systèmes politiques vers une gestion qui leur serait idéalement adaptée. Ainsi, des délimitations d'unités biorégionales peuvent se baser par exemples sur des éléments climatiques, pédologiques, de description de la biocénose, et notamment des systèmes sociaux des populations humaines en interaction plus ou moins forte avec l'environnement. L'approche biorégionale cherche à qualifier ce qui fait le « chez soi », c'est à dire les limites de reconnaissance de l'écosystème dans lequel chaque individu et communautés sont ancrées. En ce sens, la biorégion peut se rapprocher de la notion de « pays » (au sens traditionnel) qui, malgré les réorganisations administratives de la délimitation du territoire hexagonal, perdure dans l'imaginaire collectif, peut être par sa forte influence socio-écosystémique[36]. Les « pays » sont suggérés comme une approche intéressantes pour les choix techniques des constructions en terre crue (Hubert Guillaud et al. 2008).

Des échelles de taille de zones écologiques ont été proposées[37]. Les facteurs environnementaux n'ont pas la même influence selon l'échelle considérée : le climat est d'influence continentale (« écozone », « écoprovince ») ; les propriétés pédologiques sont d'influence plus locale (« écosite », « écotope », « écoélément »). Le sol revient souvent dans les propriétés d'influence des unités biorégionales.

36 Lien écorégions wiki
37 https://fr.wikipedia.org/wiki/Classification_%C3%A9cologique_des_terres

Nous avons vu en effet que les propriétés pédologiques, comme les autre variables de l'écosystème « matériel » sont d'importance dans les choix des techniques de construction de subsistance.

Mais nous avons également vu l'influence de la construction *sociale* des socio-écosystèmes sur les choix techniques, qui finalement peut devenir dominante lorsque l'influence du système social déracine les choix techniques de leur base matérielle « brute ». C'est le cas des milieux urbains qui, à la fois éloignés des écosystèmes spontanés locaux et rapprochés des autres écosystèmes par le commerce et les moyens de transport. De manière générale, Berque (2021) considère que le déterminisme de l'environnement sur un événement culturel est faible.

La philosophie biorégionale, intégrant à la fois les conditions « matérielles » et « culturelles » dans une approche holistique est alors une piste intéressante pour des travaux cherchant à comprendre l'origine des choix techniques. Elle permet de dépasser un essentialisme « naturalisant » les pratiques constructives, qui peut être qualifié de *déterminisme environnemental*. Une telle approche, que Villain (2020) qualifie même de « monoïdéique » rappelle le mécanisme de *pensée en silo* (xxx) qui enferme la pensée dans des schémas de compréhension décontextualisés. Cela n'est pas approprié pour observer l'effet de l'environnement sur les choix techniques (Rollot 2024).

Cependant, l'approche biorégionale évite également une analyse « hors sol », ce qui est essentiel pour comprendre les cultures vernaculaires pré-industrielles ainsi que pour réancrer les cultures constructives dans les écosystèmes locaux.

Si l'on maintient la distinction entre environnement et société, il faut au moins considérer qu'il s'agisse d'un déterminisme « environnemental » noyé dans une matrice « culturelle » qui bien souvent la domine.

L'approche biorégionale reste cependant avant tout une culture politique plutôt qu'une approche scientifique et semble inexplorée pour la construction en terre crue.

9.4 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 (XXX ref ? Annexe ? 20 000 lignes...)

9.4.1 Données pédologiques ou données géologiques ?

On a vu que trois domaines scientifiques étudient le « sol » au sens commun (chapitre propriétés terre xxx) : 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, 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 patrimoine vernaculaire pré-industrialisation composé de terre crue, il est généralement admis que le matériau utilisé pour l'édification est généralement 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'aie 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).

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 (voir excavation ? Ou contexte technologique ? XXX). Il s'agit généralement d'un « co-produit » (comprendre : déchet) de travaux ayant d'autres objectifs.

On a vu (intro xxx) 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. Dans ce contexte, l'utilisation de bases de données géologiques peut être pertinentes pour estimer le potentiel de réemploi des terres d'excavation. 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 (cf ; intro).

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.

9.4.2 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.

3 bases de données pédologiques couvrent l'ensemble du territoire hexagonal. DoneSol3, GlobalSoilMaps et SoilGrids.

9.4.2.1 DoneSol3 – vecteur d'UCS et raster d'UCS

Les bases de données DoneSol permettent le stockage et la gestion de données pédologiques spatialisées. 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 5.

Dans l'ensemble, les données renseignées dans les bases DoneSol3 décrivent 3 échelles spatiales[38] (IGCS 2023), dans une organisation schématisée sur la Figure 76 :

- 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



Figure 75: Illustration de la délimitation d'UCS dans un paysage. © E. Rabot, CNRS, laboratoire Écologie Fonctionnelle et Environnement, photographie V. Hurtes, CAUE de l'Aveyron

38 voir aussi la vidéo de présentation : https://peertube.iris

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.

- 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 d’un profil type par des expert.es est considérée comme plus performante que l’évaluation d’un profil de sol réel à une position aléatoire dans l’espace (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 UCS est définie, mais les délimitations spatiales exactes ne sont pas définies. Une UTS peut être présent dans plusieurs UCS.

  Dans le format expérimental proposé par (Vincent et al. 2018), une cartographie des UTS au format raster (appelé par la suite *raster-UTS*) est proposée à l’échelle de la Bretagne. Ce format facilite le traitement de données spatiales.

- Les strates : ce sont les « horizons types » des UTS. 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 UTS de DoneSol3 sont d’épaisseur et de profondeur d’apparition variable. C’est pourquoi nous distinguerons les termes « strates » et « couches », relevant de deux représentations différentes des profils de sols.

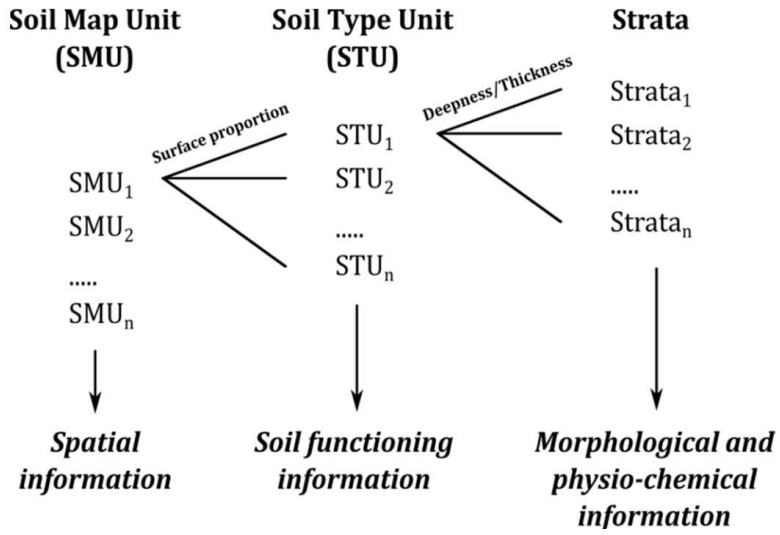


Figure 76 : Les Unité Cartographiques de Sol (UCS, ou SMU en anglais) sont des descriptions de pédopaysages spatialisées à l'échelle 1:125000. Elles sont composées d'Unité Typologiques de Sol (UTS), « profils-types » de sols. Les STU sont composées de couches (layers), représentant des horizons-types (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 UCS, des UTS et des Strates.

C'est à l'échelle des strates que sont définies la plupart des propriétés qui nous intéresseront dans cette étude : texture (F0002µm, F0050µm, 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 UTS : 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 5). 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 matièrs 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 5: 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 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 (UCS) associée. L'inconvénient majeur de ce format est que les UCS 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 donnée, 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 (UTS) du RRP Bretagne au format raster avec une résolution de 90m, en désagrégeant les UTS des UCS 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 l'UTS concernée et en précisant la profondeur désirée, accéder à la strate et aux variable pédologiques recherchées.

9.4.2.2 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 (F0002µm, F0050µm, 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 F0050µm. La prédiction de F0002µm et CEC est moins performantes, 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 peut être retrouvé 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-F0002µm 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 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 nous n'avons pas eu accès aux autres propriétés telles que la CEC.

9.4.2.3 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 UCS, mais les essais réalisés par Lemercier et al. 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[39]. Le téléchargement des données peut s'automatiser et s'intégrer aux programmes de calcul.

9.4.2.4 Conclusion : sources de données pédologiques

Le système de cartographie par unités pédologiques représentatives de DoneSol (UCS, UTS 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.

La représentation cartographique des UCS 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 performane 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-UTS est idéale, car il est aisé d'extraire et représenter spatialement les propriétés de ces UTS, 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

39 les cartes SoilGrids sont également consultables directement via un outil interactif en ligne : https://soilgrids.org/

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 (Lemercier et al. 2022). 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.

9.4.3 [A REVOIR] Préparation des données pédologiques

[dire juste les grandes lignes et renvoyer au code?]

- vise a rendre disponible chaque variable pédologique d'intérêt directement pour l'extraction au niveau d'un point bâti

- code fourni en annexe et sera publié en accès libre une fois mis en forme

9.4.3.1 DoneSol3

9.4.3.1.1 Accès et préparation de la base de données harmonisée nationalement

- système d'identification à 4 critères

- vérification de la somme texture

- harmonisation des unités de mesure au système international

(- complétude de teneur en carbone par régression sur teneur en MO) selon si utilisé

(- simplification des noms de couches et noms de matériau parental) selon si utilisé

- estimation de l'épaisseur du dernier horizon, pas toujours renseigné car l'étude de terrain n'a pas atteint sa limite basse, a partir de la moyenne dans le rrp local

(- calcul possible des *variables secondaires* dès cette étape) selon si utilisé

(- tri des horizons selon critères organiques-profondeur comme hamard2018) si utilisé

9.4.3.1.2 raster-UTS

En bretagne seulement

- réattribution (autre mot) des strates en couches format GSM, meme methode que lemercier

- pour chaque propriété attribution des valeurs au raster des numéros STU

(Suivi des variables produites via un dictionnaire des couches existantes)

9.4.3.1.3 vecteur-UCS

- choix d'une profondeur d'extraction (45cm dans l'étude, mais paramètre modifiable)

et extraction de la valeur de la strate concernée pour chaque STU.

- agrégation a l'échelle UCS : moyenne pondérée par surface UTS (comme suggéré par Lemercier et al.), ou médiane pondérée pour les propriétés qualitatives numériques (semi-quantitatives?). Insister sur le système flexible d'agrégation des propriétés

- fusion des shp locaux, et jointure des shp avec les propriétés par UCS

9.4.3.1.4 Vecteur-UTS

- réalisé à postériori du croisement en chaque point

- l'identifiant UCS extrait au niveau du point permet de relancer l'algorythme d'agrégation des propriétés au niveau de l'UCS, cette fois en prenant aléatoirement pondéré par surface la valeur d'un UTS plutot qu'une moyenne pondérée.

- intialement, a été fait pour voir si le traitement des données en était simplifié : on supposait que l'effet serait le même statstiquement que la moyenne pondérée, mais en pratique on verra que la distribution des données n'est pas la même (xxx)

9.4.3.1.5 ----------

A ranger :

« To make comparison of digital soil maps and reference data feasible, the following pre-processing procedures were applied to the datasets, if necessary: • Data cleaning to discard cells with no value in gridded maps • Standardizing units for the three soil properties in all databases • Assigning a unique Coordinate Reference System (CRS) to all vectors and rasters: WGS84 – EPSG (European Petroleum Survey Group) code: 4326 • Adjusting the spatial extents of soil maps using regional masks to ensure compatible extents To process data to compare DSM products to the reference datasets, the first step (pre-processing) consisted of extracting information about soil properties from the punctual and polygonal databases (Fig. 3). Soil profiles were vertically divided into pedological horizons, each of which had values for clay content, pH and SOC content. Horizons overlapped the 5–15 depth interval were selected, and weighted means of soil properties were calculated using the proportion of each layer's thickness in the target depth interval as the weights. The same procedure was applied to the layers of STUs for intermediate-scale and detailed maps, with values extracted from the representative profiles of the STU. For complex SMUs of regional polygonal soil maps, weighted means of clay content, pH and SOC content were calculated for each STU as before, and then an additional calculation yielded horizontally weighted means, using the probability of occurrence of each STU in each SMU as the weight (Vincent et al., 2018).» (Lemercier et al. 2022)

Un travail de nettoyage automatisé est réalisé sur les données de la base sémantique DoneSol3. Il est commun aux deux types de représentations (vecteur d'UCS, raster d'UTS).

- une *classe* python « SoilSMUs » est initialisée. Toutes les données relatives aux couches (layers) sont extraites de la base DoneSol3. Elles sont stockées dans une table

générale comprenant une ligne par couche de chaque UTS de chaque UCS : la table « SoilSMUs.studySmuStuLayerTable ».

- les « non-sols », c'est a dire les sols « noyés », « anthropiques » ou « autres » sont identifiés : leur numéro d'UCS est négatif. Leur surface est calculée et sommée pour toute la base, et sont affichées. Puis, ces « non-sols » sont supprimés.

- l'épaisseur du dernier horizon de chaque UTS est sans valeur, car généralement, s'il est le dernier horizon connu du profil alors sa limite basse n'a pas été atteinte. 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 l'UTS) des épaisseurs des derniers horizons de tous les UTS de la base.

Ainsi, le dernier horizon de sol n'est pas considéré comme inexistant, ce qui ferait perdre de l'information sur les volumes de ressource.

- Selon la documentation [ref], 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 pour 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.

- Les noms des couches (nom d'horizons) selon le Référentiel Pédologique 2008 [ref] sont disponibles dans la base DoneSol3. Ces noms sont classés dans différentes catégories-types, pour faciliter les traitements suivants. Les catégories utilisées sont les suivantes :

```
# Very organic horizons
    'O':['O','o','H','h'],
    # Eluviation and sightly organic horizons:
    'E':['E','e'],
    # Illuviation horizons
    'B':['B','b'],

    # Rocky and hard horizons
    'X':['X','D','R'],
    # Slightly organic horizons
    'A':['A','a'],
    #("the rest") horizon types that don't have particle
    #redistribution phenomena, organic matter or rocks
```

'S':['C','S','G','g','J','F','M','L', 'Z', 'V', 'Y','K','U']

Dans la méthode utilisée par Hamard et al. (2018), les couches de sol retenues pour l'évaluation passent par un tri portant sur la profondeur et la teneur en matières organiques des horizons du sol. En effet, les auteur.ices partent du principe que les horizons organiques ne sont pas utilisés par les constructeur.ices, et que la profondeur d'extraction avec les moyens d'époque est inférieure à 50cm (ref these erwan).

« Topsoil is rich in organic matter and was therefore inappropriate for construction purpose. Since soil excavation was traditionally made by hand, only subsoil near the surface was used, i.e. a large surface area and a thin layer of soil below the topsoil [24]. This is why organo-mineral (A, LA, H) and deep (appearance depth >50 cm) strata were not considered in the analysis. » (Hamard et al. 2018)

Ce tri est reproduit dans un premier temps afin de tenter de reproduire les résultats de leur étude. Puis, une évaluation de la sensibilité du résultat à cette filtration préalable est réalisée (cf. sensibilité XXX).

Concernant le présence de matière organique, les horizons éliminés étaient ceux dont le nom commençait par « A », « LA » ou « H ». Les définitions du Référentiel pédologique 2008 (AFES (Association Française pour l'Etude des Sols) 2008) pour ces horizons sont les suivantes :

« Horizons A : Il s'agit d'horizons contenant en mélange des matières organiques et des matières minérales, situés à la base des horizons holorganiques lorsqu'ils existent, sinon à la partie supérieure du solum ou sous un autre horizon A. […] Le plus souvent, la teneur en carbone organique de la terre fine en A est > 0,5 g/100 g et < 17 g/100 g (analyse élémentaire) »

Note : La teneur de 17 g.100g de matière organique est une teneur massique, il faut avoir à l'esprit qu'elle représente une important fraction volumique : « 17 g de carbone organique pour 100 g correspondent environ à 30-35 g de matières organiques sèches en masse pour 100 g, soit, environ encore, à près de 70 % en volume pour ces mêmes matières organiques à l'état frais. »

« Horizons labourés L : Horizons dont la morphologie et le fonctionnement ont été anciennement ou sont encore périodiquement artificialisés par un labour et/ou d'autres pratiques agricoles. […] Si l'on reconnaît encore nettement des caractères d'horizons A [...], on peut utiliser la notation LA [...] »

« Horizons histiques H : Horizons holorganiques formés en milieu saturé par l'eau durant des périodes prolongées (plus de 6 mois dans l'année) et composés principalement à partir de débris de végétaux hygrophiles ou subaquatiques. »

[XXX faire exactement ce tri, puis modifier sensibilité?]

A ce tri réalisé par les auteur.ices, quelques modifications ont été apportées. Il nous semble important d'ajouter les horizons « O » à ce tri :

« Horizons O (horizons organiques) : Horizons formés en conditions aérobies, constitués principalement, mais pas toujours exclusivement, de matières organiques directement observables, [...] ; ces matières organiques correspondent à des débris ou fragments végétaux morts, issus, pour la plupart, de parties aériennes (feuilles, aiguilles, fruits, écorces, matériels ligneux) ou parfois de racines fines ou mycéliums morts, développés initialement dans ces horizons eux-mêmes. »

Ainsi que les horizons possédant les suffixes « -h » et « -ho » :

humifère (-h): « qui contient beaucoup plus de carbone organique que la norme »
« Horizon plus humifère que la norme. Ex : Ah, Eh, BTh, Scah, Salh, Xh »

hémiorganique (-ho) : « Qualifie un solum dont l'horizon de surface est hémiorganique (> 8 g de carbone organique pour 100 g). »

La différence entre humifère et hémiorganique se situe dans la forme de la matière organique, qui est définie dans le cas de l'horizon humifère (matière organique humifiée, c'est a dire ayant subi les dégradations typiques de l'humus), et n'est pas définie dans le cas de l'horizon hémiorganique qui n'est qu'une distinction liée à la teneur en carbone.

Enfin, il paraît intéressant de ne pas éliminer tous les horizons « A » mais seulement « Ah » ou « Aho », les plus organiques.

[en fait, discuter de tout ça dans l'analyse de sensibilité ? Reproduire simplement modele erwan?]

Concernant la profondeur des horizons, les horizons éliminés étaient ceux dont la profondeur d'apparition dépassait 0.50m de profondeur. Cette valeur est alors appliquée, puis sa sensibilité est évaluée (cf. sensibilité XXX).

XXX ICI. Continuer traitement comme hamard 2018. Relire l'article, faire « pareil ».

9.4.3.1.6 Agrégation pour l'extraction raster-UTS

La carte des UTS au format raster nous permet de représenter directement les données pédologiques des UTS sur la carte. On ne peut en revanche représenter les propriétés de tous les horizons dans les deux dimensions du plan. Deux méthodes de traitement sont réalisées.

1) **Raster d'UTS-moyennes** : Moyennage des propriétés pédologiques des horizons dans l'UTS. Pour rappel, dans l'étape précédente, on a éliminé les horizons au delà de 60cm ainsi que les horizons organiques et/ou durs : la moyenne s'effectue sur les horizons restants. Puis, les propriétés moyennées sur l'UTS peuvent être projetées sur le plan. Comme pour le vecteur-UCS (cf. plus loin), il n'y a donc qu'une valeur projetée pour chaque variable pédologique.

2) **Raster d'UTS-classes :** Création de classes de profondeur. Elles 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 l'horizon supérieur aura un facteur 0.20/0.30 et l'horizon inférieur 0.10/0.30. Ensuite, on projette chaque propriété pour chaque couche de profondeur, comme pour SG et GSM.

Même méthode que (Lemercier et al. 2022) « To process data to compare DSM products to the reference datasets, the first step (pre-processing) consisted of extracting information about soil properties from the punctual and polygonal databases (Fig. 3). Soil profiles were vertically divided into pedological horizons, each of which had values for clay content, pH and SOC content. Horizons overlapped the 5–15 depth interval were selected, and weighted means of soil properties were calculated using the proportion of each layer's thickness in the target depth interval as the weights. The same procedure was applied to the layers of STUs for intermediate-scale and detailed maps, » (Lemercier et al., 2022, p. 4)

« with values extracted from the representative profiles of the STU. For complex SMUs of regional polygonal soil maps, weighted means of clay content, pH and SOC content were calculated for each STU as before, and then an additional calculation yielded horizontally weighted means, using the probability of occurre » (Lemercier et al., 2022, p. 5)

[faire un schéma] Enfin, comme pour SG et GSM, ce sont les données des couches de profondeur 0.15-0.30m qui seront extraites, après avoir validé leur pertinence par l'analyse de sensibilité (cf. analyse de sensibilité données pédologiques profondeur XXX). [faut-il mettre ça dans paragraphe croisement données?]

9.4.3.1.7 Création d variable orgc_calc

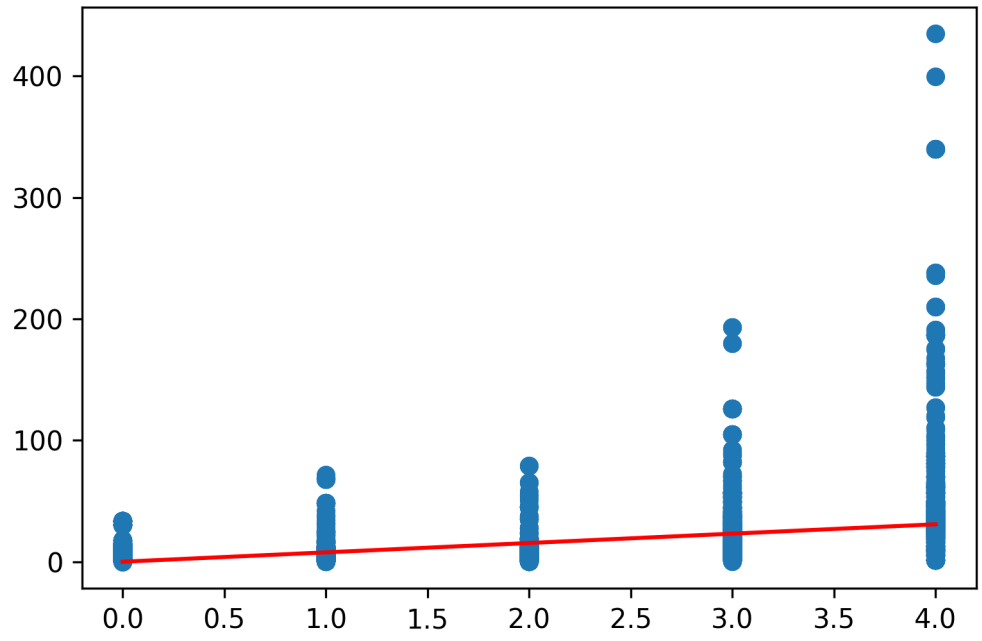


Figure 77

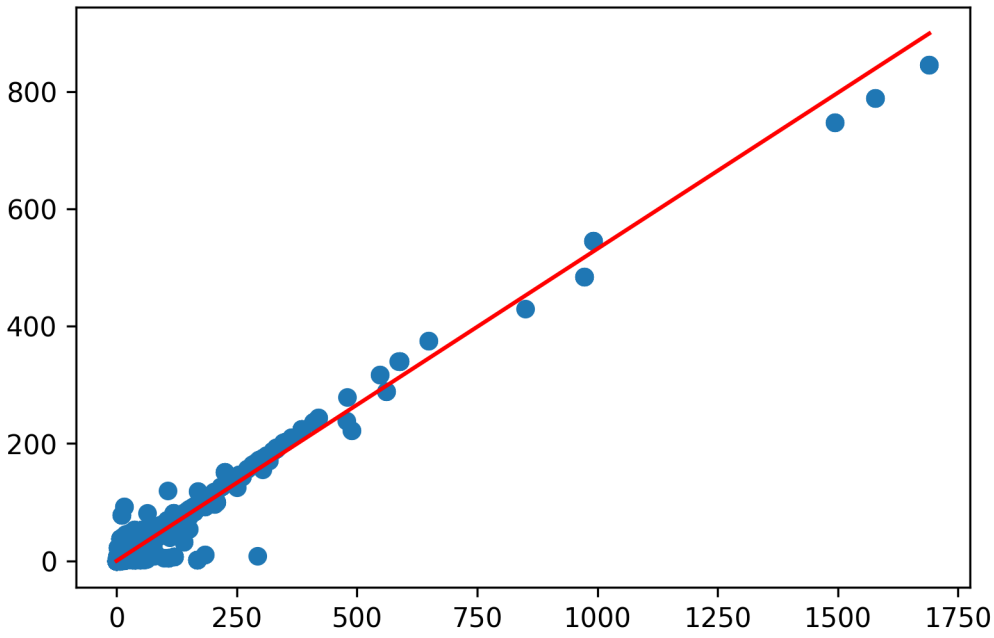


Figure 78

9.4.3.1.7.1 Mélange d'horizons, épaisseur continue d'horizon convenable

[pas que RRP donesol. Autres BDD aussi concernées… metrre dans aprtie + générale données pédo?]

- pour atteindre un matériau adéquat, on peut mélanger plusieurs matériaux. Pas pris en comtpe dans le modèle. Multiplierait trop les combinaisons possibles, surtout si on combine avec l'approche sols dans un buffer et pas que sous-jacent… Autre possibilité : supposer les convenances et rechercher les horizons convenables. A voir dans la partie reprojection.

- épaisseur minimum a montré être non significative dans l'article terre allégée. Donc on ne s'encombre pas.

« To obtain the best adobe material, soils from more than one deposit may be blended. » (Smith et Austin, p. 16)

9.4.3.1.8 Agrégation pour l'extraction vecteur-UCS

Les propriétés des horizons sont moyennés dans l'UTS (verifier si c'est la cas pour Hamard2018). Pour rappel, ce sont uniquement les horizons supérieurs à 60cm de profondeur, non « organiques » et non « durs ».

[cf. (Hamard, Cammas, et al. 2016) !!!]

La cartographie vecteur des UCS ne permet pas une extraction directe des propriétés des UTS au point du bâtiment, car ce sont les UCS qui sont cartographiées. L'emplacement des UTS au sein des UCS n'est pas connu.

La méthode utilisée par Hamard et al. 2018 consiste en l'attribution à chaque UCS du nombre de bâtis en bauge situés dans l'UCS, par un calcul spatial sur QGIS, puis à distribuer ces bâtiments à chaque UTS en pondérant la distribution par la proportion surfacique de chaque UTS dans l'UCS. Enfin, chaque UTS étant potentiellement présent dans plusieurs UCS, le nombre total de bâtiments attribué à chaque UTS est sommé.

Le traitement réalisé pour les données pédologiques raster nous a amené à utiliser la méthode inverse : au lieu d'attribuer le nombre de bâtiments à chaque UCS, on attribue l'UCS sous-jacente à chaque bâtiment. Ensuite, plusieurs options sont possibles pour passer à une valeur de propriété d'UTS :

- **vecteur d'UCS-moyenne** : Pour chaque UCS, on calcule une moyenne pondérée des propriétés des UTS, comme suggéré par (Lemercier et al. 2022). Cette moyenne est pondérée par les proportions surfaciques des UTS dans l'UCS. On attribue ces valeurs moyennes au bâtiment.

  « Following this idea, mean values of predicted soil properties from spatial aggregations of DSM products at the SMU level can be compared to those observed in SMUs. The latter is usually approximated by measuring a

“representative profile” of the SMU that is carefully selected by the soil surveyor. Indeed, Leenhardt et al. (1994) observed that representative profiles approximated values of soil properties better at all sites in SMUs than randomly-selected soil profiles did. **For complex SMUs, the mean value of a soil property can be approximated by a weighted mean of the values in representative profiles of each soil type unit (STU) in the SMU.** »

[on observera que ce moyennage n’est pas idéal car il lisse la variabilité locale. En fait, si on calculait des intervalles de confiance avec, ça serait ok, mais puisqu’on le fait pas on perd l’information sur la variabilité. Tandis qu’en faisant aléatoire, on garde la variabilité.]

- **vecteur d’UCS-aléatoire :** une UTS de l’UCS est attribuée aléatoirement au bâtiment, en tenant compte de la proportion surfacique des UTS de l’UCS.

  Afin de reproduire exactement la méthode de Hamard et. Al (2018), il aurait été possible d’attribuer exactement proportionnellement le nombre de bâtiments à chaque UTS relativement à sa surface dans l’UCS. Pour cela, il aurait fallu sommer le nombre de bâtiments attribués à l’UCS, puis calculer le nombre relatif à chaque UTS (et approximer à l’entier près), puis attribuer à tous les bâtiments de l’UCS, un UTS, en s’assurant que le nombre total de bâtiment par UCS soit respecté et en assurant une répartition aléatoire afin que l’UTS attribué ne soit pas dépendant d’une autre variable de tri de la table de données de bâti.

  Cependant, l’attribution aléatoire-pondérée fonctionne si les données sont abondantes. En augmentant le nombre d’échantillons de bâtiments, les deux méthodes donnent asymptotiquement les même résultats. En présence de plusieurs milliers de données, nous avons donc gardé la première méthode, plus simple à mettre en œuvre.

Ce moyennage est source d’incertitudes difficiles à quantifier. Dans les travaux de Hamard et al. (Hamard 2017; Hamard et al. 2018), des astuces statistiques permettent d’évaluer des erreurs-types sur les données et des incertitudes sur les résultats. Cette méthode n’a, pour l’instant, pas été reprise dans les présents travaux, du fait de la complexité de son ajout aux algorithmes utilisés. D’autre part, nous n’avons pas pu obtenir l’ensemble de la couverture du territoire français, ce qui limite les possibilités de reprojection cartographique des fonctions de convenance évaluées (cf. chap XXX).

9.4.3.2 SoilGrids

- extraction des données du serveur au découpage spatial souhaité et enregistrement en local

- vérification de la somme des textures et modification si jamais (stats)

9.4.3.3 GlobalSoilMaps

- vérification de la somme des textures et modification si jamais (stats)

9.4.4 [AR] Régions pédogénétiques

[a déplacer directement dans l'analyse de chaque région?]

Description des régions des 4 zones d'étude

9.4.4.1 Bretagne

« At regional level (SG2.0, GSM_Fr, GSM_LR, GSM_Br and 250), LanguedocRoussillon, then Alsace exhibited higher clay contents » (Lemercier et al., 2022, p. 6)

et plus argile dans autres régions. Bretagne faiblement argileuse...?

« In addition, the clay content and pH values were much less scattered in Brittany than in the other regions. Regarding SOC, the values were higher in Brittany than in Languedoc-Roussillon and Alsace, but a greater dispersion of the data was noted for Languedoc-Roussillon, again at regional level. » (Lemercier et al., 2022, p. 6)

Plus grande dispersion de valeurs dans autres régions que bretagne. Homogénéité données bretagne.

GSM-FR sous-estime l'argile dans la zone bretagne

« GSM_Fr, which strongly underestimated clay content in Brittany » (Lemercier et al., 2022, p. 6)

« SG2.0 GSM_Fr GSM_B » (Lemercier et al., 2022, p. 7)

« Clay content (g.kg 1) » (Lemercier et al., 2022, p. 7)

« 20 30.6 3.6 » (Lemercier et al., 2022, p. 7)

GSM-fr mauvais en bretagne! Dans les données bati, on voit plutot que GSM est un peu plus grand en moyenne argile que R ou STU, et encore plus SG... Ils sont sur profondeur 5-15 et nous 30-60, peut etre pour ça ? Faire stat données pédologiques brutes pour s'assurer que similaire à l'origine?
E plus points comparaison bien dans la zone…

Mais méfiance, ils ont fait la moyenne pondérée des SMU. Verifier si sous-estimation argile pour SMU et STU. Si tout est logique, c'est = pour STU et c'est bien sous-estimé pour SMU, car données « moyennées » ? mais en même temps dans une évaluation de corrélation l'extraction par moyennage doit fonctionner en fait.

« SG2.0 generally had poor prediction performances for most of the comparisons tested (SSmse < 0.20 for 7 of 9 comparisons), » (Lemercier et al., 2022, p. 6)

SSmse c'est la prédiction de la varince, donc SG a peu de finesse de variance. Concordant avec ce qui est dit

« This study covers the territory of Brittany region, located in the Armorican Massif geological domain. In this 27,040 km2 area, the local pedological database is the Regional Pedological Referential of Brittany (Lemercier et al., 2015). Generally, geological formations strongly impact on the pedogenesis of the overlying soils and especially in the Armorican Massif. The dominant soil mechanisms in the Armorican Massif are browning and clay leaching (Berthier et al., 2009; Jamagne et al., 2011). » (Verron et al., 2022, p. 3)

« Brittany is part of the Armorican Massif. This Massif is the result of, at least, three orogenies. Rocks of this geological domain are mostly old sedimentary rocks, more or less metamorphosed (sandstone, schist), metamorphic rocks (gneiss), magmatic rocks (granite, rhyolite) and loess deposits [170–172]. Paedogenesis of the massif is dominated by darkening and leaching. Locally, podsolization and a paleopedogenesis, marked by a fersiallitization, are mentioned [173]. Among Armorican rocks, Brioverian schists are sensitive to alteration and thus produced thick soils that favoured cob construction [77,93,116,174,175]. Regoliths deriving from other local parental materials (granite, sandstones, Cambrian schists) were also employed for cob construction [93]. Nevertheless, the correlation between geology and cob heritage distribution in Brittany did not provide satisfactory results [175]. » (Hamard, 2017, p. 52)

9.4.4.2 champagne

« s a region composed in large part by the chalky Champagne (upper Cretaceous substratum), bounded to the east by the Humid Champagne (lower Cretaceous substratum) whose physical limit is marked by the Champagne cuesta and to the west by the Ile de France plateau (Cenozoic substratum) whose limit is marked by the Ile de France cuesta (Fig. 2). As its name suggests, chalky Champagne is characterized by a quite homogeneous chalk substratum that has given its specificityto the Champagne landscape, as well as its resources for construction. » (Aras-Gaudry et al., 2023, p. 2)

9.4.4.3 Occitanie

9.4.4.4 Limagne

9.5 Données patrimoniales géolocalisées

Evaluer l'impact des propriétés du sol, et donc a priori des terres à bâtir, sur les choix techniques réalisés dans le patrimoine vernaculaire, 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 patrimoine vernaculaires non bâti en terre crue.

En effet, l'occurrence du patrimoine 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 (Hamard 2017).

Trois formats de données de densité bâties 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.

9.5.1 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 7. 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 Rhone et la Limagne,

catégorie	Référence/Origine	Période de collecte	Zone géographique	Techniques constructives	Nombre d'échantillons par technique	Méthode d'échantillonnage/données densité	Echantillons analysés
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	
			Ille-et-Vilaine et Pays de la Loire	bauge; torchis; enduit	167; 2; 3		
	Campagnes de relevés réalisée pour cette étude	2020-2023	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	409; 770; 4119 (57; 429); 965 (2); 4		
interne	(Rojat et al. 2020)	?-2020	Rhône-Alpes	pisé	22	non	Oui
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	7816; 831; 4500; 1364		

Tableau 6 : Sources et caractéristiques des données patrimoniales utilisées dans cette étude
l'ancienne région Champagne-Ardennes.

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 7: Sources de donnés patrimoniales mobilisées dans 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 »[40] 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 [edit : 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

40 http://craterre.org/actualites:lancement-de-cartoterra/

zones bâties en 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[41], 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.

9.5.2 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 (annexe XXX) 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 (xxx BDD terre crue).

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 Erreur : source de la référence non trouvée.

- Données internes au laboratoire (cf. Transects de collecte de données : bâtiments en terre crue, p.289): 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 (voir annexe XXX : format de la BDD terre crue).
    - 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.

41 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

    - 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 xxx.
- 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.
    - Qualité : Les règles de dénomination des techniques sont connues. La localisation du point est généralement située sur le bâtiment concerné ou à proximité immédiate.
    - (Informations supplémentaires: Selon la source, des données concernant l'intensité du matériau terre peuvent être présentes.) XXX si on travaille sur l'intensité
- 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 aucun* [cf. XXX un batiment pisé en Normandie ? Dans paragraphe description de la répartition du patrimoine en terre crue dans la bibliographie] 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 (xxx).
    - 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 (Perello 2015)

      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)).

- (Informations supplémentaires: Selon la source, des données concernant l'intensité du matériau terre (cf. XXX) peuvent être présentes) xxx si travail sur l'intensité

9.5.3 Détail de la transformation des données terre et densité, par source

9.5.3.1 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) (Camille Gilet XXX ?) 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 (xxx). Une méthode d'évaluation de la densité bâtie est proposée à partir de la trace GPS du transect réalisé (xxx).

9.5.3.1.1 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 (xxx), 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 XXX (erwan?), 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 XXX.

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 technique identifiée 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 (cf. XXX densité visible).

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)

9.5.3.1.2 Choix du transect

La collecte de données sur le terrain s'est effectuée principalement en voiture par souci de rapidité[42], 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 azimuts
- Éviter tant que possible les voies rapides pour pouvoir circuler lentement sans risques, éviter les voies non carrossables.

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* (cf figure XXX intro techniques terre, (Dipasquale et al. 2011)). Puis, l'itinéraire se rapproche du « coeur 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,

42 Sans commentaires…

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 (figure xxx carte transect créneaux).

[figure qui montre créneaux et limite, prendre capture d'écran QGIS occitanie trace]

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 ».

9.5.3.1.3 Limites de la méthode

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.

Visibilité des bâtiments

La visibilité des bâtiments elle-même est inévitablement imparfaite :

- Les obstacles à la vision : autres bâtiments, couvert végétal, topographie
- 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. Dans une hiérarchisation esthétique des matériaux, nous avons vu que la terre était souvent masquée et pouvait être employée exclusivement dans les cloisons intéreures (xxx esthétique). 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).

  En milieu urbain, ceux-cis sont souvent plus souvent « entretenus » et laissent rarement entrevoir la terre sous-jacente.

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 (cf. XXX). Celle-ci ne prend cependant pas en compte le masquage engendré par le couvert végétal.

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 ».

9.5.3.2 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.

9.5.3.2.1 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.).

9.5.3.2.2 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 :

9.5.3.2.2.1 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 79) :

- les champs de description du bâtiment, avec les termes « terre », « bauge », « torchis », « pisé », « quenouilles », « tangue » 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 permet d’évaluer une analyse de convenance basée sur une résistance mécanique hypothétique (cf. XXX si réalisé).

Dans la fenêtre du programme (Figure 79), 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

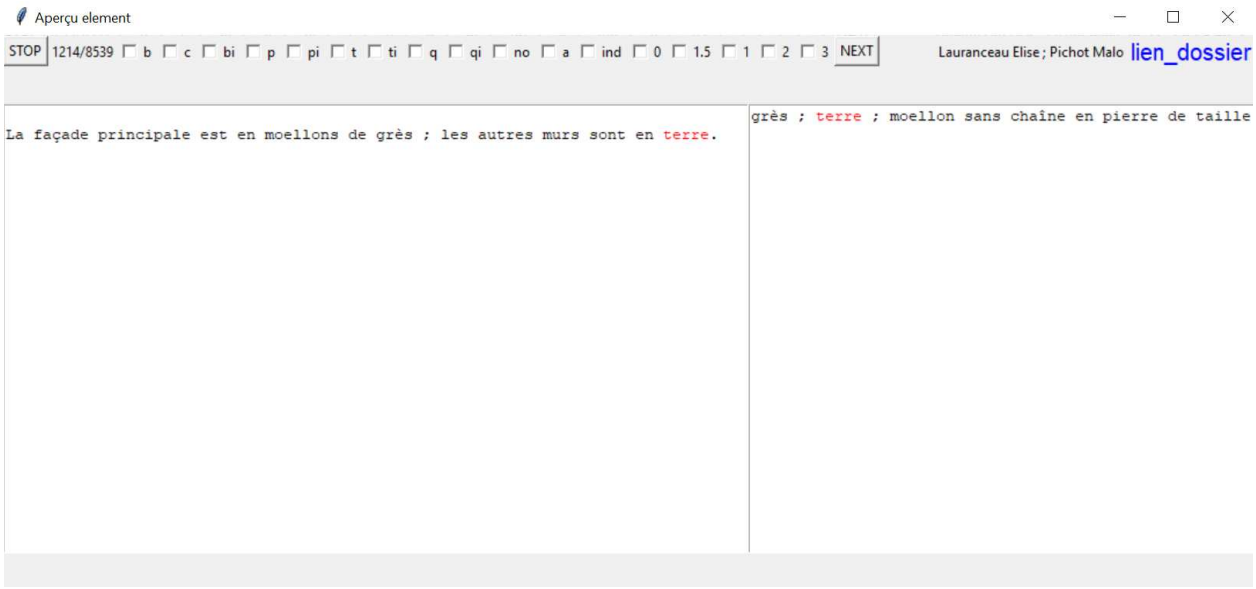


Figure 79: Fenêtre de visualisation des propriétés d'un élément de la base de données. Les cases à cocher sont les « techniques-types », avec ou sans incertitude (i) ; ainsi que des cases de catégories de « hauteur des murs en terre » (en nombre d'étages) lorsque la photo permet de le vérifier. Le bouton "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 80: 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 80.

9.5.3.2.3 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 (voir code en annexe XXX). 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, 94 % 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.

9.5.3.2.4 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.*

9.5.3.3 Fusion des données et suppression des doublons

Lorsque seules les données d'une source sont employées, par exemple la source *Service du Patrimoine de Bretagne* (xxx résultats bretagne) ou la source *transects* (xxx resultats transects), les bâtiments localisés ne présentent *a priori* pas de doublons. En revanche, en superposant des bases de données différentes sur un même territoire, des doublons peuvent apparaître. Nous procédons alors à un tri spatial pour les éliminer.

Certains bâtiments issus des sources de données des services du patrimoine ont leur localisation positionnée au milieu de la ferme, ou parfois dans la rue devant le bâtiment. Lorsque l'on positionne les points sur le terrain, c'est plutôt directement sur l'ouvrage ou sur le mur que le point est positionné. Lorsqu'il s'agit du même bâtiment, l'identification du doublon ne peut se faire que par fusion de proximité.

Pour les bâtiments dont la localisation est considérée « approximative », le bâtiment en terre le plus proche des points dont la localisation est certaine est identifié. La distance à ce point est enregistrée pour chaque bâtiment approximatif. Un graphique représentant le nombre de bâtiments « approximatif » par classe de distances au bâti « certain » le plus proche est proposé en Figure 81. On observe que les classes de distances inférieures à 50-70m sont plus représentées que les classes au-delà, où la proportion semble stagner. On suppose que cette plus forte proportion correspond aux bâtiments « doublons » : au-delà de 50m, les bâtiments les plus proches sont probablement simplement d'autres bâtiments.

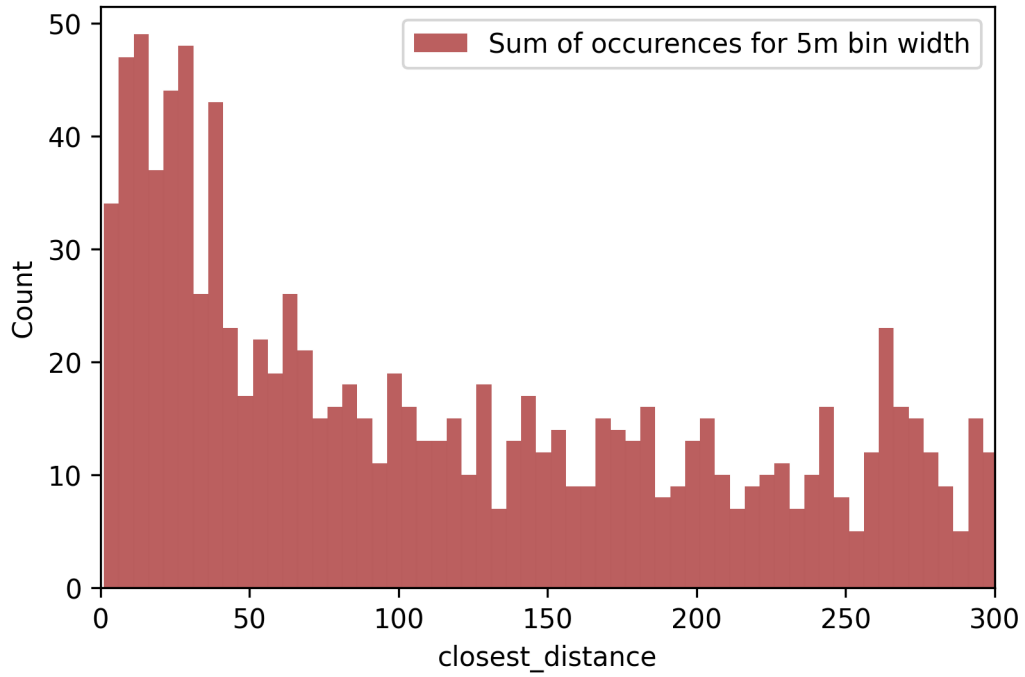


Figure 81

La distance de 50m est donc employée comme limite de distance de fusion des doublons. Cette fusion ne concerne que les bâtiments des sources de données de la catégorie « externe-généraliste », et n'est réalisée que pour l'emploi de la base de données complète. Lorsque la base de données est employée source par source, l'intégralité de la source de données est employée car on suppose qu'il n'y a pas de doublons.

9.5.3.4 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 (xxx), et des points aléatoires sur la zone d'étude.

9.5.3.4.1 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 : 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 (xxx visite fermes). Nous réaliserons cependant une analyse de sensibilité sur ce paramètre, ce qui permettra éventuellement de l'optimiser (cf. xxx).

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.

9.5.3.4.2 Données OpenStreetMap (OSM)

Les données de la base de données cartographiques participative et en accès libre OpenStreetMap sont obtenues depuis les dépôts en ligne [xxx lien]. La couche de

polygones vectoriels géoréférencée représentant les bâtiments sur le territoire français (nom couchexxx) est enregistrée localement sur un disque dur externe (xxx GO).

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 XXe 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 ; additionnée d'une fraction de bâtiments disposés plus aléatoirement par rapport à ces règles d'installation initiales. On peut alors s'attendre à ce que les données OSM soient finalement un intermédiaire entre les données *vernaculaires* et les données *aléatoires*.

- 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'échantilonnage des données terre et des données de densité, donc pas de suppression *de fait* des biais potentiels.

9.5.3.4.3 OpenStreetMap : analyse de visibilité

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 ».

9.5.3.4.3.1 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 « sauts » 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'algorythme.

3) Une couche de données représentant l'altitude du sol est obtenue depuis [xxx BDD alti]. 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 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.

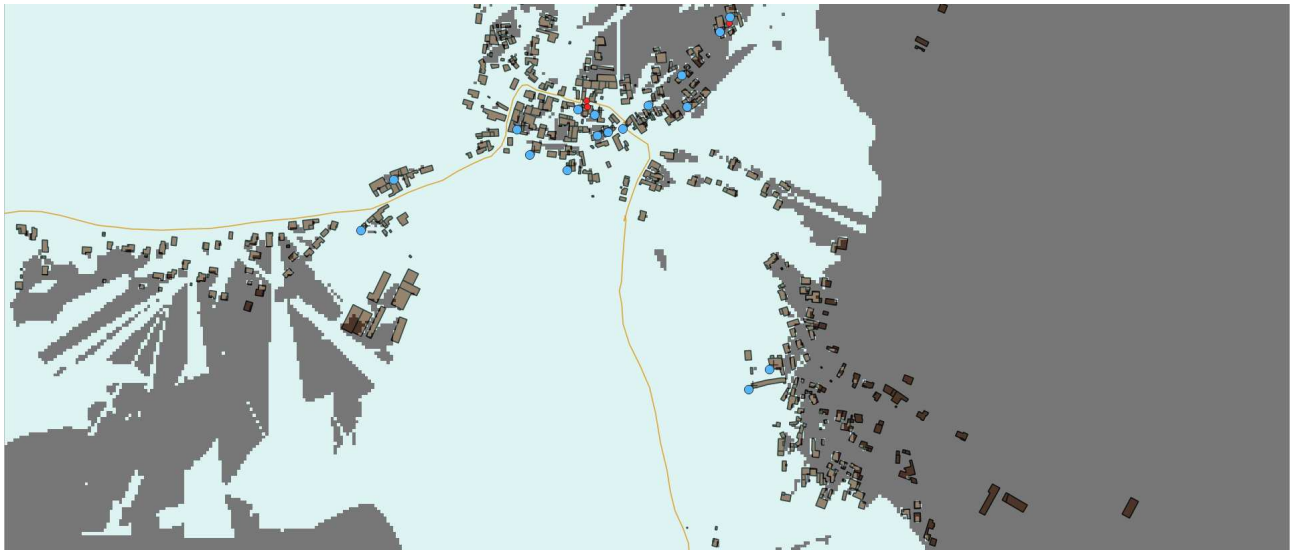


Figure 82 : résultats de l'analyse de visibilité des polygones OSM dans l'interface QGIS. La trace GPS est la ligne orange, les bâtiments OSM sont en gris, ceux composés de terre sont identifiés avec des points bleus (pisé) et rouges (adobes). Les bâtiments dans la zone sombre sont ceux que l'analyse de visibilité identifie comme « invisibles » depuis le transect.

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 82). 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.

9.5.3.4.3.2 Analyse de sensibilité

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 donnés OSM-visibilité, car ces données sont ensuite limitées en largeur par la distance de visibilité, qui varie entre 300 et 2000m (xxx?). 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 est décrit directement dans la partie résultats (xxx).

9.5.3.4.4 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.

9.5.4 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 XXX.

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 (voir xxx intro), 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 (2024 XXX), et de Cannat (2022).

Le format de la base de données est décrit en Annexe XXX. 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 (propriétés terre xxx) 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.

9.6 Croisement des données

9.6.1 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-UCS est ajoutée. Chaque polygone contient le numéro de l'UCS et les données pédologiques agrégées à l'échelle de l'UCS.

- les données SoilGrids et GlobalSoilMaps de la profondeur désirée sont ajoutées. Une couche raster par propriété pédologique.

- En Bretagne, les données raster-UTS 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 l'UCS 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 *vernaculaire* contient en fait également les données *terre* issues de la même base de données.

Chapitre 4 : résultats du croisement de données patrimoniales et pédologiques

10 Quelle profondeur d'extraction ? Sol sous-jacent aux points-bâtiments

10.1 Méthode

Dans l'objectif de considérer les données pédologiques à la localisation des bâtiments vernaculaires comme représentatives du matériau employé dans l'édifice, nous avons fait l'hypothèse que la terre employée dans le bâtiment correspond au sol sous-jacent (xxx dicsussion distance ressource, xxx hypothèses). Afin de vérifier cette hypothèse, une base de données de 22 échantillons de pisé vernaculaire pré-industriel Rhône-Alpins est employée, publiée par (Rojat et al. 2020). Pour chaque échantillon, on dispose d'une analyse granulométrique complète (déjà présentée au chapitre 1 (xxx)), d'une mesure de VBS, ainsi que de la géolocalisation du bâtiment d'origine.

A l'aide de l'algorithme de croisement de données patrimoniales/environnementales spatialisées, les propriétés pédologiques spatialisées issues des trois bases de données couvrant l'ensemble de la France hexagonale (DoneSol vecteur-UCS, GlobalSoilMaps, SoilGrids), donc la région Rhône-Alpes, sont extraites à la localisation de chaque bâtiment et comparées aux propriétés analysées. Les propriétés extraites sont celles des horizons -30 à -60cm pour GSM et SG, et celles de l'horizon présent à -45cm pour VUCS. Cette plage de profondeurs est identifiée par Hamard et al. (2017) comme généralement située sous l'horizon organique et suffisemment peu profonde pour être réaliste dans le cadre une extraction non mécanisée.

Les fractions granulométriques de 0 à 2, 2 à 50 et 50 à 2000 µm (F2µm, F50µm, F2000µm) sont directement comparés et 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 VBS ($mmol.kg^{-1}$) mesurée sur les échantillons de pisé est comparée à la CEC ($mmol+.kg^{-1}$) de la base de données pédologiques.

Pour chaque propriété, on représente la propriété mesurée en fonction de la propriété extraite de chaque source de données pédologiques (Erreur : source de la référence non trouvée). La représentation est dédoublée : sur les figures de gauche, une régression linéaire est calculée et représentée. Le coefficient de corrélation (r^2) est calculé conjointement. A gauche, une régression linéaire dont l'ordonnée à l'origine est forcée sur 0 est proposée, et la somme des moindres carrés obtenus est calculé.

10.2 Résultats

[la pente n'apporte pas grand-chose. Supprimer ? Appuie le fait que la corrélation n'est pas affine, donc qu'il y a un biais autre qu'aléatoire…]

De manière générale, les nuage de points des représentations de corrélation sont très dispersés pour les propriétés granulométriques. Les corrélations linéaires présente de faibles coefficients, ne dépassant pas r^2=0.3 sauf pour SoilGrids-F2000µm_D (0.6). Par ailleurs, les régressions linéaires sont loin de passer par l'origine, avec des pentes généralement inférieures à 0.5, alors qu'une mesure d'égalité donnerait une pente de 1 (y=x). Il n'y a donc pas de bonnes corrélations entre les données mesurées et les données extraites à la localisation des bâtiments. Cependant, la corrélation existe, puisque les pentes sont toujours supérieures à 0 (sauf pour SoilGrids). On note également que la distance de la pente à l'unité varie selon la source de données : Vecteur-STU < GlobalSoilMaps < SoilGrids. En effet, SoilGrids (SG) présente une absence de corrélation manifeste avec des pentes proches de 0. C'est pourquoi il est important d'avoir les deux indicateurs de pente et de qualité de corrélation : même si le coefficient de corrélation est élevé, par exemple r^2 = 0.6 pour SoilGrids-F2000µm_D, la pente est quasi-nulle, donc il y a quasi-absence de représentativité de la propriété. Si l'aléa dispersant les données est bien moindre pour SoilGrids, 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 évoluent de 0 à 400$g.kg^{-1}$. A l'inverse, les données sont bien plus dispersées pour GlobalSoilMaps (GSM) et vecteur-SMU (VSMU) 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, on peut considérer ces deux propriétés comme presque décorrélées dans le jeu de données : la droite de régression linéaire montre une absence de corrélation voir une corrélation négative pour SG.

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 l'ensemble des sources (droites au dessus de y=x). F50µm est légèrement surestimé, F2000µm est sous-estimé. Pour F2000µm_D, il est sous-estimé par SG. Dans tous les cas, c'est VSMU qui dévie le moins de l'égalité, suivi de GSM puis de SG.

En revanche, lorsque la corrélation linéaire est proche de zéro, cette représentation n’a

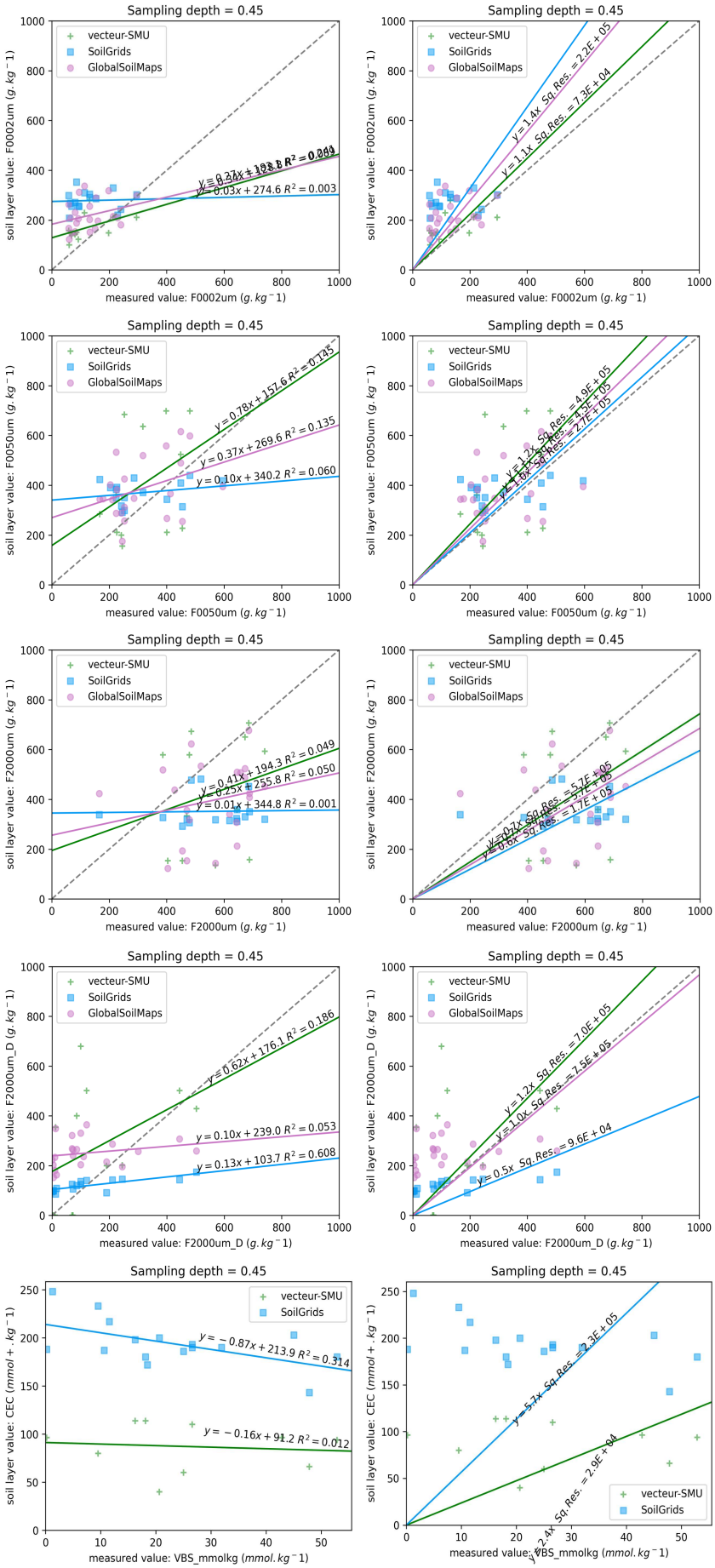


Figure 83 : Comparaison des propriétés mesurées des éléments de pisé (texture, éléments grossiers, VBS) aux propriétés sous-jacentes des bases de données pédologiques. La VBS est comparée à la CEC. La profondeur de la couche de données pédologiques est de -45cm. A gauche, une régression linéaire affine est proposée entre données mesurées et données pédologiques ; à droite, on force la régression à passer par l'origine. La fonction de corrélation est fournie, ainsi que son coefficient de corrélation r². Pour les données granulométriques la droite de proportionnalité est aussi représentée pour comparaison.

Il est difficile de conclure entre des biais liées aux données où à des choix préférentiels de terres loin de la localisation du bâtiment.

Pour la dernière possibilité, il est possible de modifier le choix de profondeur d'extraction du modèle et d'observer l'impact sur les corrélations mesure/données pédologiques.

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 (xxx CEC-VBS, le rédiger?). Cela s'ajoute a 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.

10.4 Optimisation de la profondeur d'extraction

[ajouter des profondeurs intermédiaires?]

Afin de clarifier l'impact de ce choix de modélisation sur les résultats, 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 est évalué. On fait varier la profondeur d'extraction des données autour de sa valeur initiale (0.45cm de profondeur), sur 5 valeurs : 0.025, 0.10, 0.225, 0.45, 0.80. Ces profondeurs correspondent à la moitié des strates-types utilisées dans les bases de données SoilGrids et GlobalSoilMaps (xxx). 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 la source de données VUCS est employée, car c'est celle qui présentait les meilleures corrélations avec les propriétés mesurées.

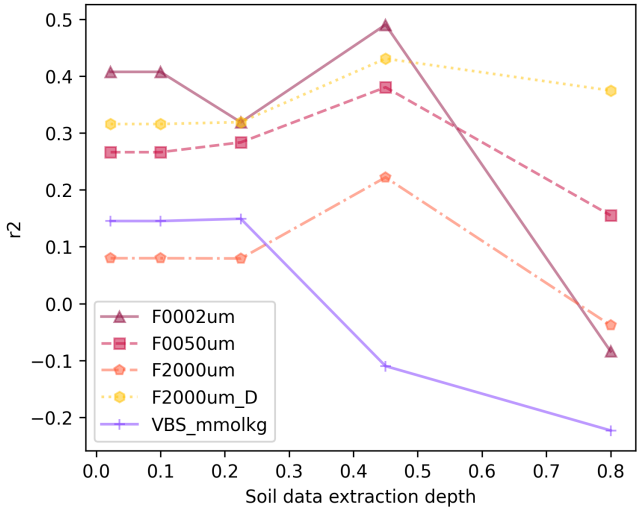


Figure 84: Variation du coefficient de corrélation entre les variables mesurées et extraites des 22 bâtiments de pisé, selon la profondeur d'extraction des données pédologiques. La source de données est DoneSol Vecteur-UCS. 4 fractions granulométriques sont considérées ainsi que la corrélation VBS-CEC.

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. F0002µm) 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. Il y a un « décalage » de l'optimum vers la profondeur. La corrélation VBS-CEC pourrait même représenter ce phénomène à 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 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, plus grossiers, ou plus ou moins bien « distribués ».

En effet, la fraction granulométrique fine baisse généralement avec la profondeur au profit de la fraction grossière (xxx). 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. La bonne corrélation avec la profondeur de -45cm représente donc probablement un intermédiaire entre une « profondeur d'extraction » moyenne et une « profondeur de l'horizon sous-jacent ressemblant le plus à la terre extraite *ailleurs* ».

Par cet essai, il est difficile de conclure quand à la validité de l'hypothèse selon laquelle les propriétés pédologiques extraites à la localisation du bâtiment équivalent aux propriétés de la terre utilisée dans l'édification. La corrélation entre les variables mesurées et les variables extraites est faible. En revanche, 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.

La qualité et la précision des données pédologiques est probablement en cause pour la plupart de la variabilité, et de ce fait, une analyse sur de nombreux échantillons dans différents contextes pédologiques permettra peut-être de réduire l'aléa et les biais.

[perspective]

Pour approfondir la vérification de cette hypothèse, il serait intéressant de disposer de bases de données d'échantillons analysés similaires sur un territoire où des données pédologiques précises existent, comme en Bretagne avec Donesol Raster (xxx). Une campagne d'échantillonnage de bâtiments vernaculaires pré-industriels composés de bauge pourrait apporter du discernement sur ces résultats.

11 Relations entre sol et densité bâtie en bauge : données vernaculaires en Bretagne

11.1 Densité bâtie relative en bauge selon les propriétés pédologiques

11.1.1 Méthode et mise en forme des résultats

Les figures 85, 86, 87 et 88 représentent les résultats du croisement de données pédologiques avec les bâtiments vernaculaires pour les techniques-types de bauge. Pour rappel, la méthode consiste en l'extraction des données pédologiques à la localisation de chaque point-bâtiment, pour quatre bases de données :

- bauge-SPbretagne (bauge): les bâtiments issus de la base de données du Service du Patrimoine de Bretagne identifiés comme composés de bauge (xxx tri)

- vernaculaire-SPbretagne (vernaculaire): tous les bâtiments issus de cette même base de données, y compris ceux composés de bauge

- OpenStreetMap (OSM) : la localisation des bâtiments du cadastre actuel des bâtiments de la base de données OpenStreetMap, échantillonnée aléatoirement pour garder autant de bâtiments que la source « vernaculaire »

- Aléatoire : un échantillonnage aléatoire dans l'espace de points-bâtiments fictifs, représentant la distribution des propriétés du sol

5 sources de données pédologiques décrites en XXX sont employées successivement pour le croisement de données :

- vecteur-UCS (fig. 85, 87) : les propriétés pédologiques de l'horizon à -45cm de profondeur sont extraites de chaque UTS composant l'UCS, et moyennées dans l'UCS en pondérant par la surface de chaque UTS dans l'UCS.

- vecteur-UTS (fig. 85, 87) : pour chaque point-bâtiment, un UTS est sélectionné aléatoirement parmi ceux de l'UCS, et la valeur des propriétés de l'horizon à -45cm de profondeur lui est attribué

- raster-UTS (fig. 85, 87) : les UTS sont directement cartographiés donc peuvent être extraites au point-bâtiment. Les horizons 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.

- GlobalSoilMaps (GSM, fig. 86, 88) : la valeurs de la couche 30-60cm est extraite

- SoilGrids (SG, fig. 86, 88) : la valeurs de la couche 30-60cm est extraite

La variabilité des données est plus fortes pour les sources issues des bases de données DoneSol3 que pour GSM et SG. Les occurrences des bâtiments sont sommées sur de plus grands intervalles pour lisser la variation. Malgré cela, la variabilité reste plus forte pour ces trois sources que pour GSM et SG, ce qui est particulièrement visible pour les variables pédologiques aux plages de variation larges comme F0050µm.

L'occurrence de chaque source de points-bâtiments et la densité relative des bâtiments en terre est représentée selon 5 variables :

- F0002µm : passant granulométrique argileux, en % de la fraction fine

- F0050µm : passant granulométrique limoneux, en % de la fraction fine

- F2000µm : passant granulométrique sableux, en % de la fraction fine

- F2000µm_D : fraction d'éléments grossiers, en % de la masse totale des solides

- CEC : la capacité d'échange cationique du sol, en $mmol+.kg^{-1}$.

Pour chaque propriété, le graphique du haut représente le nombre de bâtiments par classes de valeurs de la propriété étudiée ; le graphique du bas représente la densité relative de la terre par rapport à chacune des variables de « densité ». Selon la source de données pédologique et la propriété étudiée, la largeur des classes de valeurs est choisie pour une meilleure lisibilité graphique. Afin d'éviter de fortes variabilités peu représentatives, le nombre d'occurrence de bâtiment en terre nécessaires à l'affichage d'une valeur de densité pour chaque classe est fixé à n=5.

Pour rappel, la densité relative bauge/vernaculaire est une densité « réaliste », car il s'agit des bâtiments en terre de la BDD relativement à tous les bâtiments vernaculaires pré-industriels : une densité de 1 indique que 100 % des bâtiments vernaculaires de la zone sont en terre. 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 pourrait dépasser l'unité localement si le nombre de bâtiments en bauge est supérieur aux échantillons. Cependant, puisque les échantillons sont ramenés au nombre de bâtiments vernaculaires, les « densités » sont comparables entre elles.

L’occurrence de bâtiments composés de bauge est plus faible que la source Vernaculaire. De fait, elle est bien distinguable des données de densité sur les graphiques d’occurrence. Rappelons qu’elle ne peut dépasser le nombre de bâtiments vernaculaires, donc la courbe d’occurrence Bauge est inscrite sous celle de Vernaculaire. Elle n’évolue cependant pas de manière parfaitement corrélée aux occurrences des courbes de densité, comme en témoignent certains graphique de densité relative comme par exemple GSM-F0050µm, qui présente une augmentation progressive de la densité relative selon la teneur en « limons » 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, quel que soit sa causalité.

11.1.2 Propriétés pédologiques et densité relative

Observons la densité relative bauge/vernaculaire (courbes oranges) :

- pour F0002µm (fig. 85, 86) : 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, mais 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. Si SG présente cette dynamique, les valeurs de l’ensemble des échantillons sont sensiblement supérieures et plus concentrées. En Bretagne comme en Rhone-Alpes, comme observé pour la piséthèque (xxx), SG surestime la granulométrie « argileuse ». Par ailleurs, vecteur-SMU restreint aussi les données à une plage plus étroite que les autres sources DoneSol3.

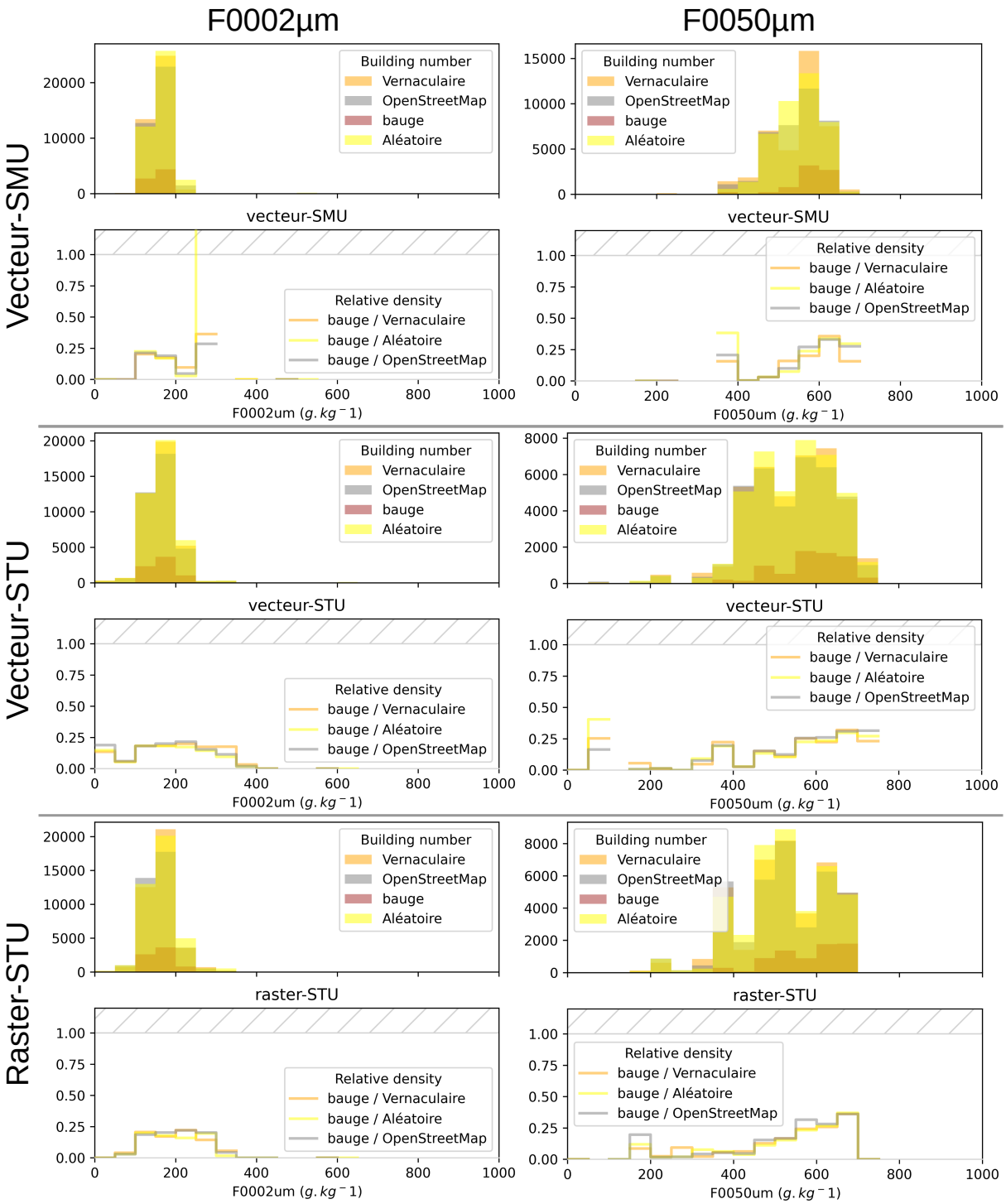


Figure 85

- pour F0050µm : On observe pour toutes les sources pédologiques une augmentation progressive de la densité relative bâtie en bauge avec la teneur en limons. Par exemple, pour GSM, 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 montrent les mêmes tendances. Ici aussi, SG et SMU « 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.

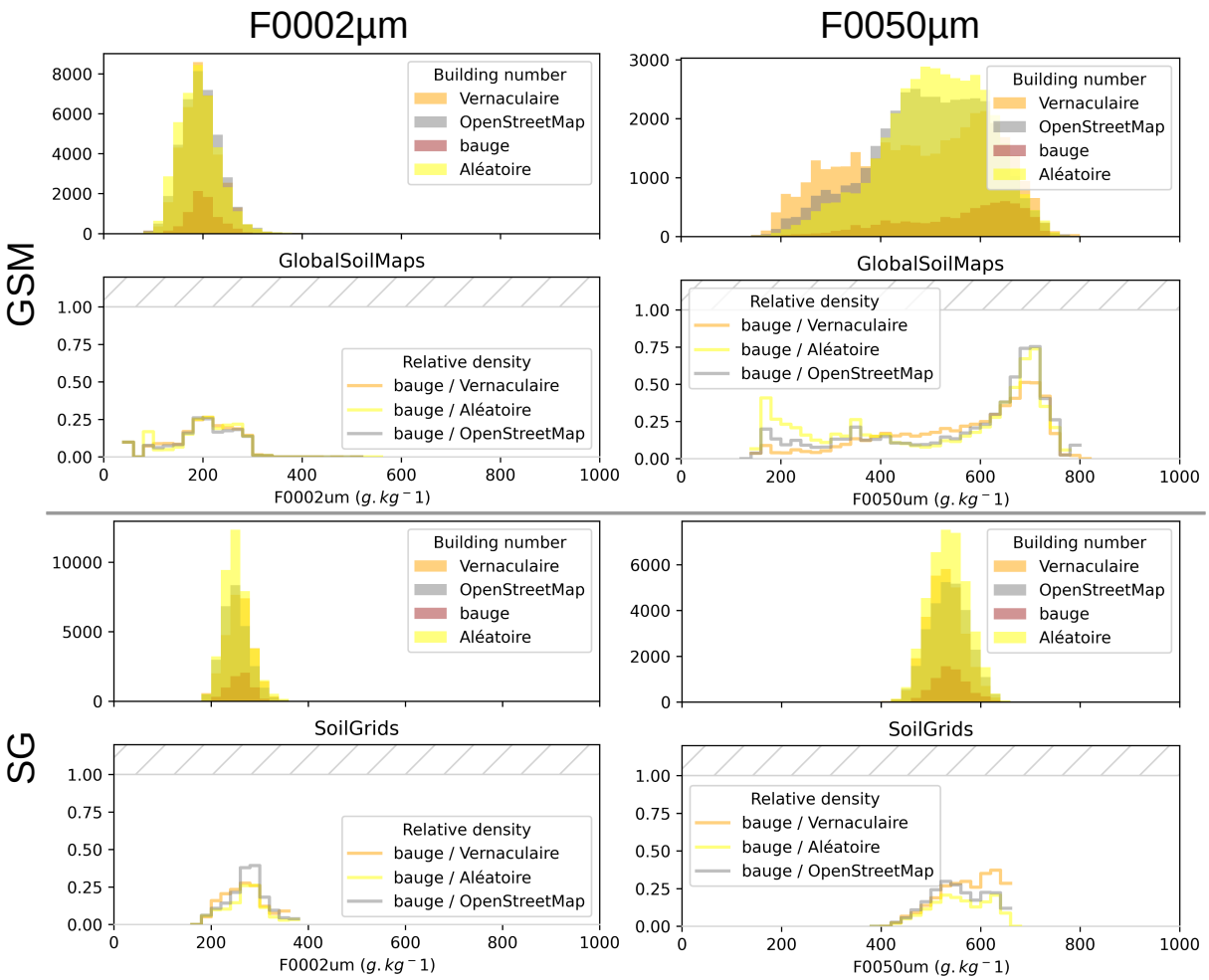


Figure 86 :

- pour F2000µm (« sable », fig. 87 et 88) : 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 F0050µm : c'est assez clair pour GSM-F0050µm (fig. 87), 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}. Mêmes conclusions pour la concentration des variables pour SoilGrids et vecteur-SMU.

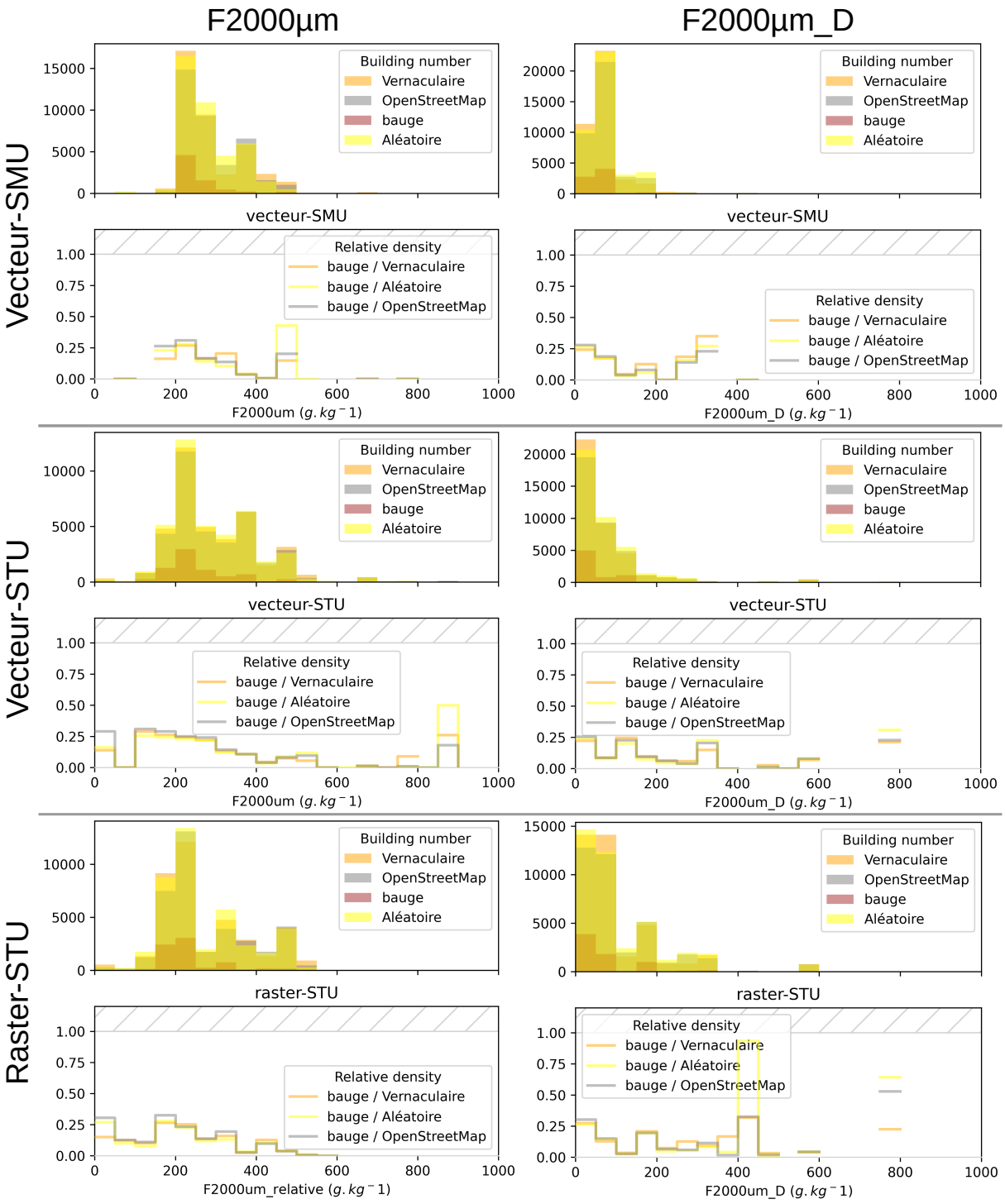


Figure 87

- pour F2000µm_D (« pierres », fig. 87 et 88)) : la teneur en pierre de la plupart des sols étudiés évolue de 0 à 200 g.kg^{-1}. Au delà, les données sont peu fiables et sujettes à aléas. Sur cette plage de valeurs, une décroissance de la densité bâtie en bauge relativement à la teneur en éléments grossiers (EG) est visible pour vecteur-SMU, vecteur-STU et GSM. Cette tendance est moins claire pour raster-STU. Ils semblent globalement surestimés et concentrés pour SG, alors que pour la piséthèque en Rhone-Alpes, la teneur en EG de SG semblait plutôt sous-estimée par rapport aux autres sources pédologiques. Egalement,

de manière surprenante GSM ne présente aucune terre avec une teneur inférieure à 50g.kg^{-1}. Vecteur-SMU ne présente pas de concentration exagérée des données pour cette propriété contrairement aux autres propriétés granulométriques.

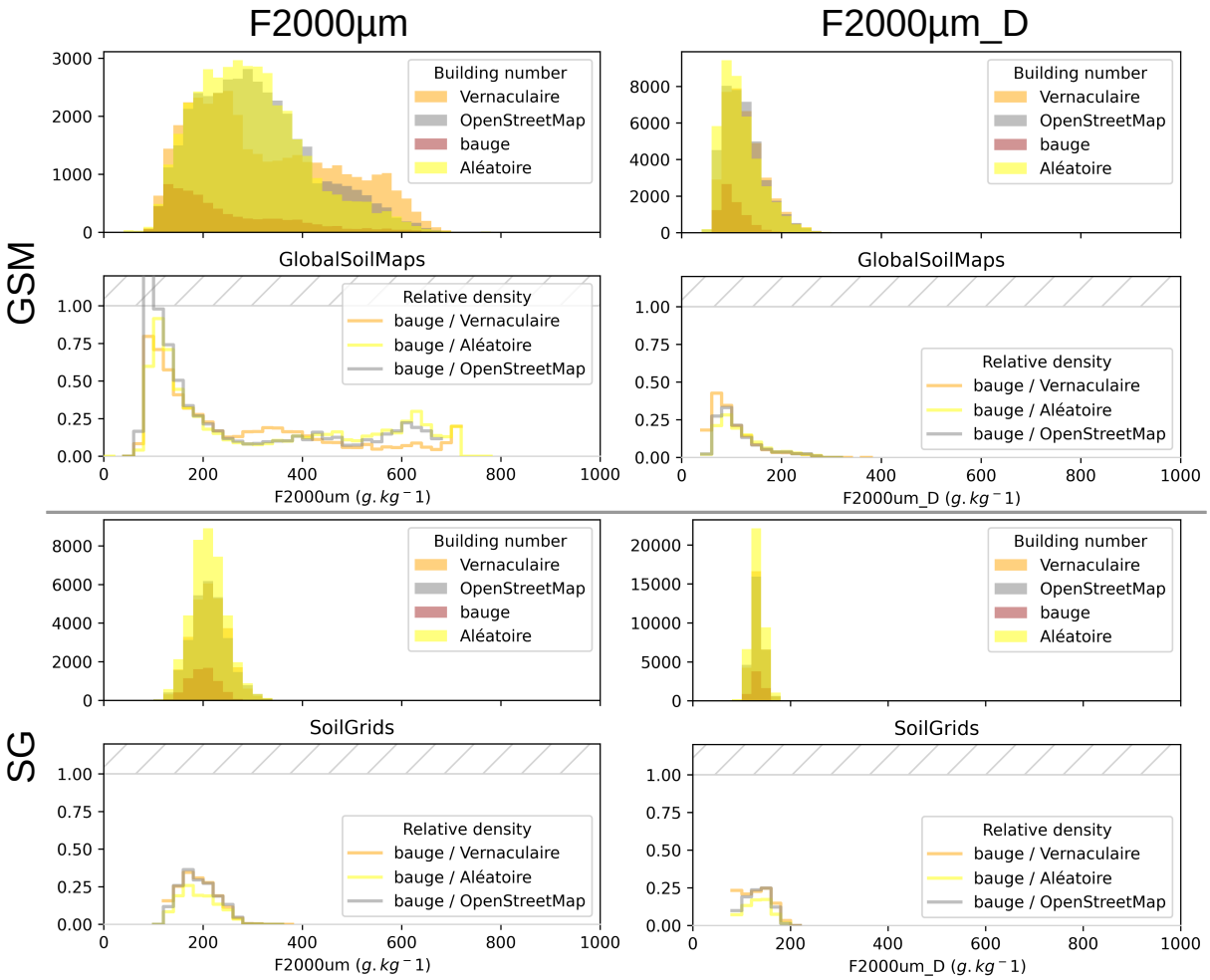


Figure 88

- CEC (fig. 89) : 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 100mmol+.kg^{-1}, ce qui est assez peu probable. Dans l'ensemble, on n'observe pas vraiment de tendance préférentielle sur les densités relatives. Il y a peut-être une légère baisse de densité visible pour Vecteur-STU et raster-STU autour de 50mm+.kg^{-1}.

- Activité (fig. 89) : L'activité est la CEC divisée par la fraction granulométrique argileuse. Elle est considérée comme indicateur potentiel de l'activité électronique des minéraux argileux du sol et donc de leur minéralogie (voir xxx CEC activité). 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 l'effet de la baisse de CEC observée. La baisse est également 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.

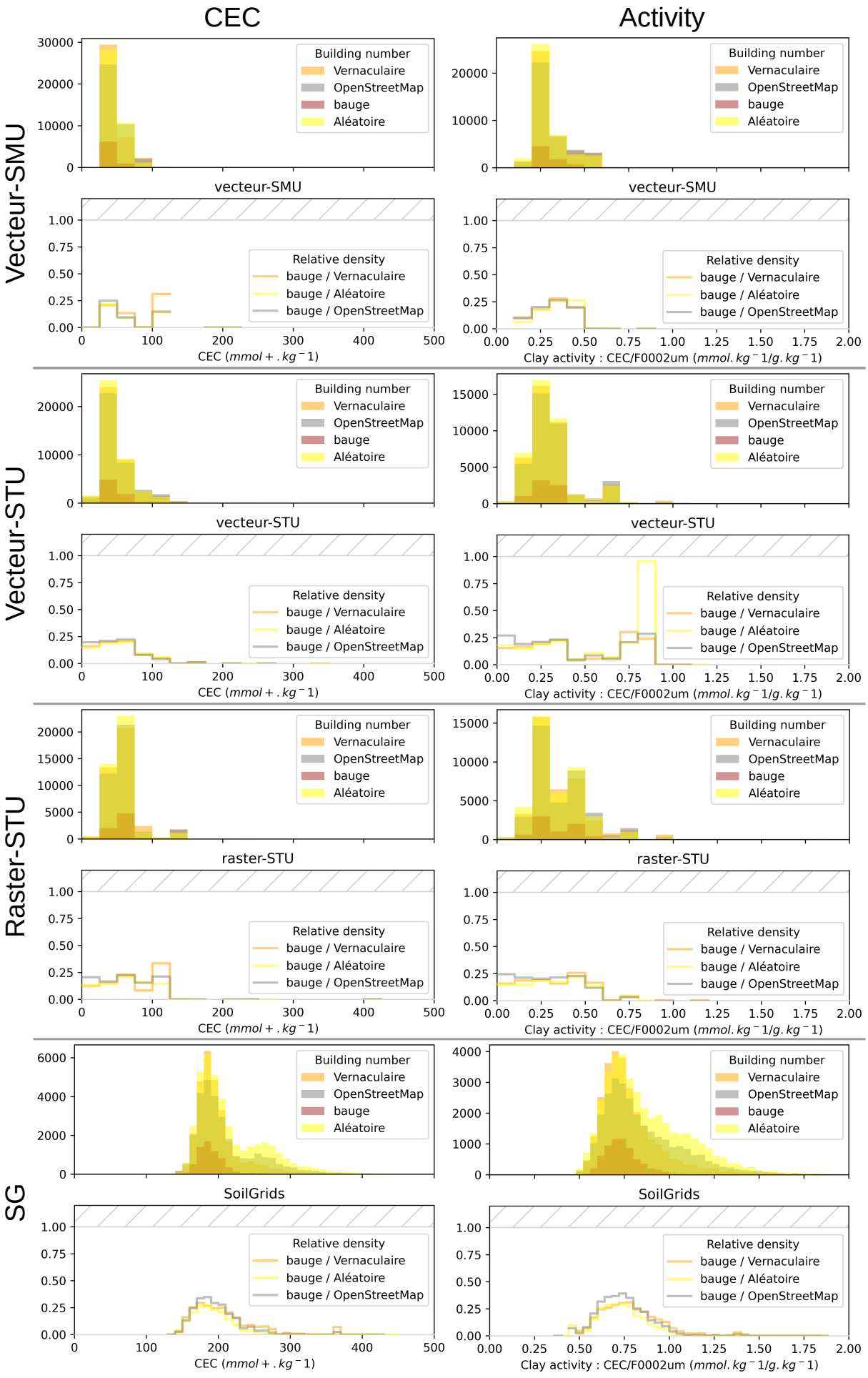

CEC
Activity
Vecteur-SMU
Vecteur-STU
Raster-STU
SG
Building number
Vernaculaire
OpenStreetMap
bauge
Aléatoire
vecteur-SMU
vecteur-STU
raster-STU
SoilGrids
Relative density
bauge / Vernaculaire
bauge / Aléatoire
bauge / OpenStreetMap
CEC (mmol + . kg ⁻ 1)
Clay activity : CEC/F0002um (mmol. kg ⁻ 1/g. kg ⁻ 1)

Figure 89

- Profondeur du sol (fig. 90) : La variable considérée comme représentant la « profondeur du profil de sol » est la profondeur connue pour chaque STU dans la base de données DoneSol.

[l'obtenir pour raster-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 (voix xxx chap prop sol pédogenèse). 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.

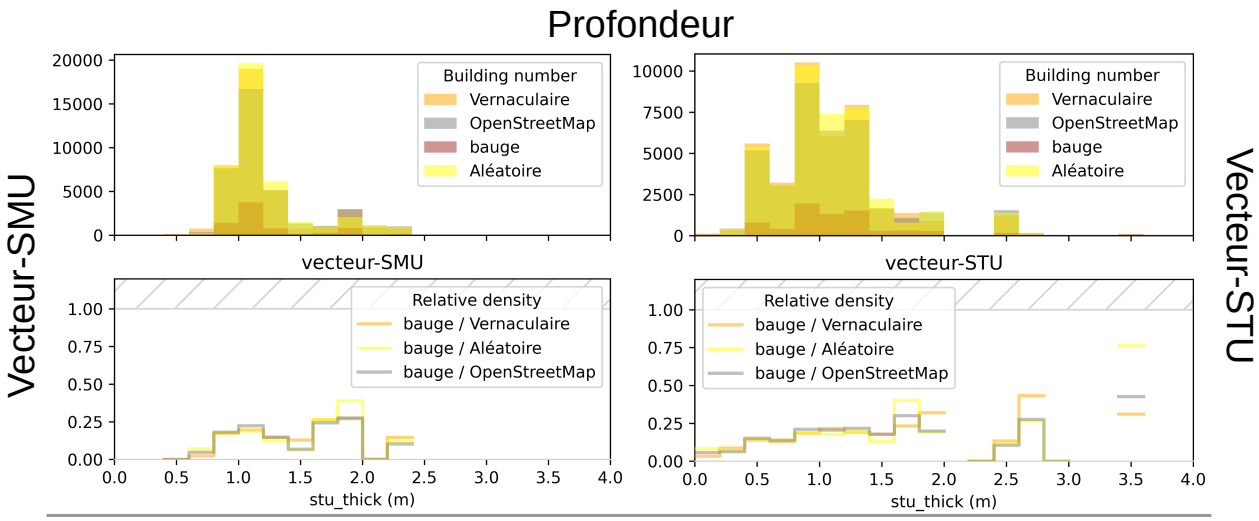


Figure 90

11.1.3 Résultats par source de données de densité : vernaculaire, OSM, Aléatoire

Sur les résultats de croisement, on remarque d'abord que les occurrences des données de densité se superposent relativement bien pour la plupart des variables pédologiques étudiées. Cependant, on observe que pour certaines variables comme GSM-F0050µm et GSM-F2000µm, les données extraites aux points-bâtiments Vernaculaires se superposent mal aux données OSM et Aléatoire. En effet, relativement à la densité Aléatoire, la densité Vernaculaire présente le biais d'*installation préférentielle* (xxx) : les bâtiments vernaculaires préindustriels ne sont pas disposés aléatoirement sur le territoire mais peuvent présenter des biais et aléas de distribution dont certain affectent leur distribution relativement à certains propriétés du sol (xxx). Les données OSM contiennent l'ensemble des bâtiments existants aujourd'hui : puisque l'installation préférentielle des sociétés industrialisées ne se fait plus relativement à son environnement (xxx), l'ensemble des

bâtiments est distribué plus aléatoirement relativement aux propriétés pédologiques. Ainsi, la distribution OSM est plus proche de Aléatoire que de Vernaculaire.

L'installation préférentielle impacte ainsi la densité relative de bauge par rapport à ces sources de données : dans les zones ou l'installation préférentielle augmente le rapport Vernaculaire/Aléatoire, par exemple pour GSM-F0050µm entre 500 et 700 $g.kg^{-1}$, la densité relative bauge/vernaculaire (ligne orange) est inférieure à bauge/aléatoire (ligne jaune).

11.1.3.1 Discussion

11.1.3.1.1 Qualité des données pédologiques

La donnée pédologique « de référence » sur la région Bretagne est le RRP rasterisé raster-STU (voir xxx présentation données). L'extraction vecteur-UTS semble avoir une assez bonne corrélation avec raster-STU : malgré un échantillonnage aléatoire des UTS dans l'UCS, la quantité de données permet un lissage convenable de l'aléa. GlobalSoilMaps montre également une bonne adéquation avec raster-STU, à l'exception de la teneur en EG, probablement plus variable et difficile à capturer par l'algorithme de prédiction qui a produit ces données en partie à partir des données de DoneSol3 (voir xxx prez données). Surtout, la forme rasterisée apporte un lissage des données qui dans notre cas a non seulement facilité le traitement mais facilite également la lecture des résultats.

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 (DneSol3) 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, respectivement aléatoirement dans l'UCS et directement dans la bonne UTS ; tandis que vecteur-UCS moyenne les valeurs des UTS 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 UCS théorique composée deux deux UTS 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-UCS) 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. Les résultats ne sont pas du tout les mêmes.

De plus, il est certain que les UCS (« pédopaysages-types », voir xxx def rrp) n'aggrègent pas des UTS de manière aléatoire mais plutôt de manière favorisant l'association de types de sols par série pédogénétique (par exemple, des brunisols). Des UTS aux valeurs de propriétés pédologiques « extrêmes » (p. ex. brunisols très peu profonds) sont donc très souvent associées à leurs homologues aux propriétés extrêmes inverses. L'ensemble donne donc toujours des propriétés moyennes.

De ces deux faits, la médiane d'une propriété pédologique pour un groupe de bâtiments (en terre, ou données de densité) est semblable, mais l'étalement des données est réduit.

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 du « 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 questionnons l'approche d'agrégation des propriétés à l'échelle des UCS consistant en un moyennage pondéré des propriétés des UTS (Lemercier et al. 2022) et suggérons qu'une extraction aléatoire pondérée est plus pertinente, du moins lorsque le nombre de données extraites tend vers l'infini ce qui lisse les biais liés à la composante aléatoire.

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 « condensation » des données.

Dans les deux cas, les données ne semblent pas adaptées à une évaluation des liens entre propriétés pédologiques et occurrence d'un phénomène spatial comme la densité relative bâtie en terre crue.

11.1.3.1.2 Choix technique

L'existence de corrélations marquées entre les densités relatives bâties en bauge et les propriétés pédologiques F0050 et F2000µm indiquent une vraie corrélation de ces variables sur les choix techniques. A ce stade, la compréhension de la causalité reste encore difficile, mais nous suggérons qu'elle peut être issue de :

- l'amélioration de la facilité de mise en œuvre de la bauge avec l'augmentation de la teneur en limons, matériau aisément modelable (xxx procédés)

- 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.

- la teneur en éléments grossiers n'étant pas considérée comme vraiment défavorable à l'emploi de la terre pour bâtir en bauge (xxx bauge conclusion procédés), la décroissance de la densité bâtie en bauge pourrait plutôt être liée à la réduction de l'accès aux « pierres volantes » pour bâtir en pierre (xxx pierre). 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.

- 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 fortement liées entre elles (voir statistiques xxx).

Notons 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 : il est probable que les corrélations entre variables pédologiques soient des variables de calcul dans les modèles employées pour produire les données GSM et de ce fait soient encore plus exacerbées dans les résultats ; là où la variabilité naturelle et « inexpliquée » soit encore présente pour les données directement issues de DoneSol3.

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 troisièmes hypothèses, selon lesquelles c'est l'accès à la pierre – au matériau parental du sol, ou la teneur en pierre des horizons de surface – qui gouverne le choix relatif de la technique de la bauge.

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 ne 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 D est peut-être trop grande, ajoutant un trop grand nombre de bâtiments vernaculaires en dehors de la zone de déploiement de la technique, ou peut-être qu'une meilleure sélection du nombre d'échantillons minimums pour afficher une densité relative dans un intervalle réduirait l'apparition de ce phénomène.

11.1.3.1.3 Installation préférentielle

La présence du biais d'installation préférentielle est confirmée sur la zone d'étude. Il n'est pas conséquent, mais en l'absence de données de densité Vernaculaire, il aurait été par exemple plus difficile d'interpréter les quelques pics de densité observés pour GSM aux faibles teneurs en limons et pour des fortes teneurs en sable.

[insérer carte représentation teneur en limon GSM dans l'espace : voir si ça coincide avec rennes, ou autre chose comme ça

carotgraphier la teneur en limons raster GSM et mettre en differente couleur la zone 300-500g.kg qui correspond au pic OSM-random. Rennes ?

]

L'installation préférentielle est peu visible pour les autres sources de données pédologiques. Peut-être que l'aléa déjà présent noie la lecture, ou peut-être est-ce un artefact liée à la qualité des données pédologiques.

Nous espérions que la donnée OSM soit un « intermédiaire » entre vernaculaire et Aléatoire relativement à l'effet de l'installation préférentielle. Cependant, ce résultat n'est pas vraiment observé. On remarque parfois que c'est le cas, comme pour GSM-F0050µm

ou F2000µm. Mais ce n'est pas aussi clair pour les autres sources de données et les autres propriétés pédologiques. Cependant, puisque c'est la propriété qui présente la meilleure corrélation avec la densité bâtie, le fait qu'OSM représente mieux la relation que Vernaculaire nous invite à penser que lorsqu'il existe une différence manifeste entre OSM et Aléatoire, la densité « réelle » pourrait être encore plus exagérée. 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 ».

11.1.4 Optimisation des paramètres de modélisation

La méthode d'extraction et de croisement des données patrimoniales et pédologiques est complexe et mobilise plusieurs hypothèses dans le choix des paramètres. Une analyse de sensibilité est donc nécessaire afin de s'assurer que la variation de ces paramètres a une influence négligeable sur les résultats d'analyse.

Lorsque l'on observe une influence des propriétés de la terre sur les choix techniques dans l'analyse visuelle des graphiques de densité relative bâtie en terre, un critère a retenu 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. La densité relative évolue lorsque sur le graphique supérieur d'occurrence du nombre de bâtiments, les courbes d'occurrence de la terre et de la source de densité ne sont pas proportionnelles. Par exemple, pour F0050µm, la courbe d'occurrence de bâtiments en terre est « décalée » vers les plus fortes valeurs que celle des autres sources, résultant en une densité relative plus forte lorsque F0050µm est maximale.

La présence d'un tel décalage montre que le modèle de croisement présente suffisamment peu d'aléas pour masquer cette dynamique et que les paramètres de modélisation sont 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 médiane des valeurs prises par la terre et la médiane des données vernaculaires. On normalise ensuite par l'intervalle contenant 90 % des valeurs des bâtiments en terre.

$$acuité = \frac{Q50_{terre} - Q50_{vernaculaire}}{Q95_{terre} - Q5_{terre}}$$

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 en terre, l'acuité sera positive, lorsqu'elle sera négativement corrélée, l'acuité sera négative.

11.1.4.1 BDD pédo

La variation de l'acuité est d'abord évaluée en fonction de la base de données pédologique, pour les fractions granulométriques et la VBS (Figure 91).

La variation d'acuité est très variable selon les propriétés. Comme observé sur les figures 87-90, ce sont les propriétés F0050µm 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 F0050µm qui favorise la densité bâtie en terre, négative pour F2000µm dont les fortes valeurs sont corrélées à une faible densité. Surtout, celle-ci 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 non adéquates pour ce traitement de données (xxx).

GSM présente également une acuité conséquente pour les éléments grossiers (F2000µm_D), également visible sur les figures de densité. Pour les autres variables (F0002µm, CEC), il n'y a pas de grand décalage entre les densités donc l'acuité est plus faible et peu différente selon les sources de données.

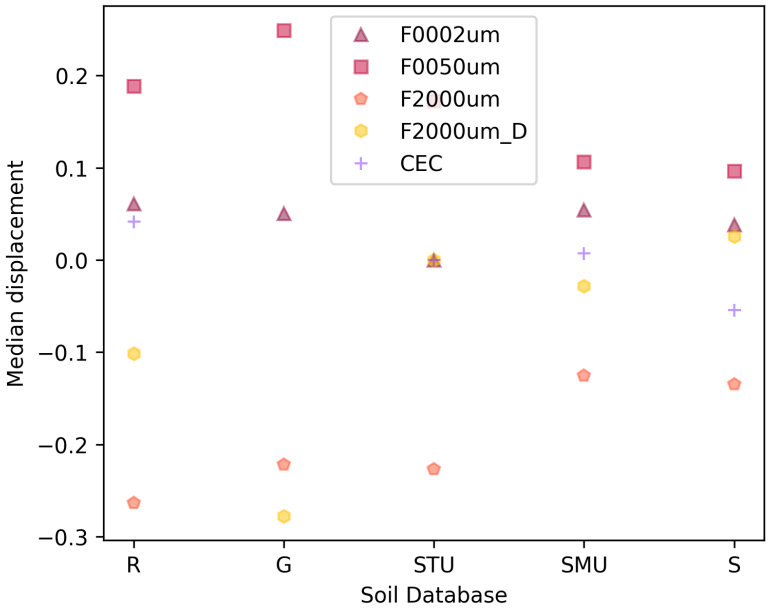


Figure 91 : Acuité de discernement de la corrélation « propriété pédologique-densité relative de bâtiments en bauge » (Median displacement) selon la base de données pédologiques et pour plusieurs propriétés pédologiques.

[refaire avec acuité en valeur absolue ? Relation plus claire, mais invisibilise le sens de la corrélation. Pour la distance par exemple, teneur en argile change de sens pour les faibles valeurs...]

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-UTS 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 (xxx).

Le fait que vecteur-STU présente une acuité strictement nulle pour CEC, F0002µm 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, et Raster-UTS sera la référence pour l'évaluation de l'acuité des autres paramètres d'optimisation.

11.1.4.2 Distance de connaissance

[illustration limitation des données buffer xxx petit et grand buffer]

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 verront 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 et le torchis, nous avons pris la distance de D=30km (xxx discussion distance?). Nous la faisons désormais varier et observons sont impact sur l'acuité des variables que nous avons relevées comme discriminantes. La variation s'effectue dans la liste suivante : [0.1, 1, 2, 5, 10, 30, 60, 100, 200].

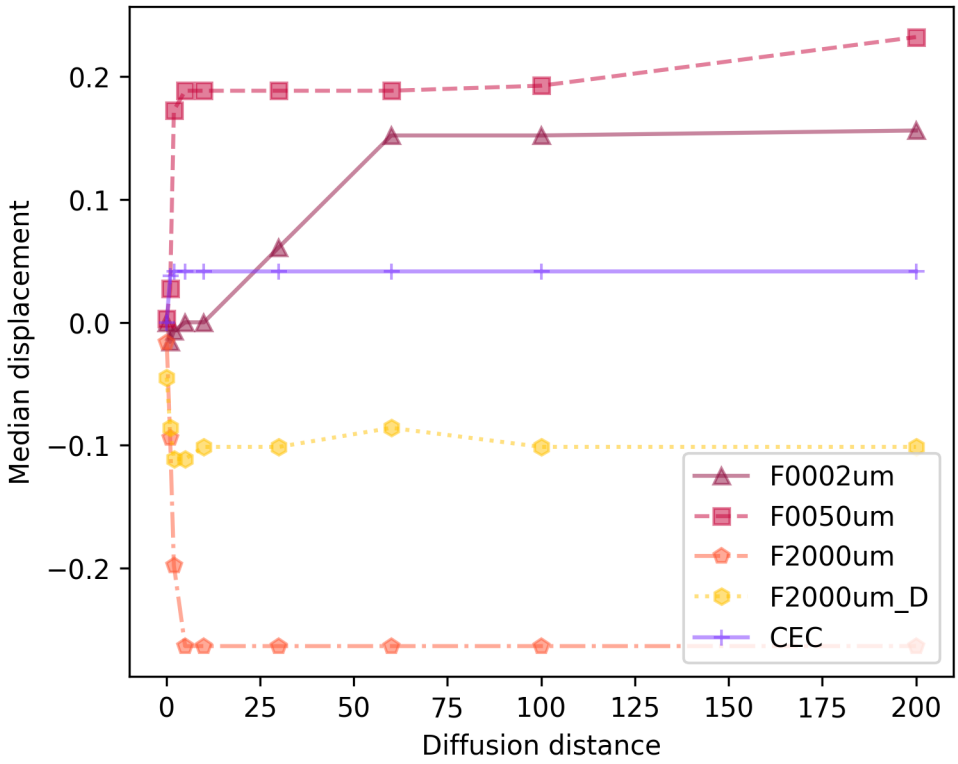


Figure 92 : Variation de l'acuité du discernement entre l'occurrence de la bauge et l'occurrence de bâtiments vernaculaires selon la distance maximale au bâtiments en bauge d'inclusion des données de densité vernaculaire. L'acuité de 5 variables pédologiques issue des données raster-STU est représentée.

La variation d'acuité est représentée sur la Figure 92 . 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 F0002µm, 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 : ces zones sont peut-être « peu convenables » pour bâtir en bauge.

- Mais également, si certaines zones où la terre pourrait être convenable sans présenter de bâtiments en terre sont intégrées, la relation perd en acuité. Nous avons fait l'hypothèse qu'à faible distance, ces zones sont moins importantes car la technique est connue donc des bâtiments seraient statistiquement plus présents que pour de grandes valeurs de D, où la technique n'est plus connue ce qui empêche le développement de la technique malgré des sols convenables. On aurait 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. Le reste du territoire Breton présentant des caractéristiques pédologiques effectivement défavorables à la bauge relativement aux autres techniques (p. ex. pierre), l'acuité ne varie pas lorsqu'on le prend en compte.

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 égalment 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 pourra peut-être être mieux perçue dans une analyse à l'échelle nationale (voir xxx).

La propriété F0002µm a une dynamique particulière. Elle oscille d'abord entre négatif et positif, une variation attendue du fait de la faible représentativité des données pour de faibles valeurs de D. En revanche, le plateau est atteint beaucoup plus tard que pour les autres variables. Cela peut s'expliquer à la fois par un biais s'installant avec la distance, avec des zones sans bauge de plus en plus argileuses vers l'Ouest breton, ou par le fait que la variabilité de cette propriété ne se laisse capturer qu'avec suffisamment de données. Dans cette deuxième hypothèse, D=60 pourrait représenter la distance de connaissance, au-delà de laquelle la variation d'acuité est nulle ou négative. Mais en l'absence de plus d'informations, il est difficile de conclure quant à la validité des observations de choix préférentiels sur les données F0002µm et sur l'activité des argiles présentées en xxx.

[vérifier sur carte?xxx]

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 est nécessaire pour conclure.

11.1.4.3 Conclusion optimisation

Pour optimiser un modèle, on peut employer des méthodes comme l'analyse de Monte Carlo (voir recartographie xxx) 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 algorythmes 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 ». (ils se révèlent acceptables?)

Les paramètres optimums pour le croisement des données pédologiques et vernaculaires 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.

La modélisation est relancée pour la bauge en Bretagne avec les paramètres D=10km plutôt que 30. Il n'y a pas de différence significative dans les résultats de densité relative. La variabilité semble un peu plus grande pour vecteur-STU. Les figures sont néanmoins disponibles en annexe (xxx).

12 Relation entre sol et densité bâtie pour la bauge, le pisé et les adobes : 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-UTS). 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 (voir xxx données terrain). La cartographie a été réalisée par « transects » en évoluant en « limite de zone d'occurrence » de bâtiments en terre crue.

12.1 Données de densité OSM : optimisation de la méthode d'analyse de visibilité

Un autre avantage des données issues du Service du Patrimoine de Bretagne était qu'on pouvait considérer que sur l'ensemble des données, les méthodes d'échantillonnage étaient relativement similaires entre les bâtiments « terre » et les bâtiments « vernaculaires ». Avec les données de densité OSM et Aléatoire, on ne peut éviter les biais liés à l'échantillonnage. 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 ou liée à son plus grand 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 (voir xxx méthode OSM visibilité). Ainsi, nous disposons d'une donnée de densité relative autour du transect, entre les bâtiments OSM « vus » et les bâtiments en terre « vus ».

12.1.1 Paramètres de l'analyse de visibilité et variables de réussite de l'optimisation

Cette analyse 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 : 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). Une fois cette distance définie, la *distance de connaissance* D=5km employée pour cette analyse n'a d'impact que dans la dimension de la longueur du transect : si aucun bâtiment n'est vu pendant 5km, la trace est coupée ; un cas rare en pratique du fait de la méthode de choix de parcours en « créneaux » (xxx).

- la hauteur supposée des bâtiments : 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 : 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.

Les 5 transects réalisés ont été présentés en xxx. Dans cette évaluation, on distingue le transect de Loire-Atlantique du transect Breton.

Les variables d'acuité du modèle sont définies dans la méthode de l'analyse de visibilité (xxx) :

- terre-captés-OSM : 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 vus sur le terrain.

- tous-matériaux-captés-OSM : 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 ne fait de « tri » dans la zone limitée par la distance maximale de visibilité.

- la performance du modèle, définie par le ration 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.

Une évaluation visuelle de quelques transects choisis au hasard permet 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. Il représente la lourdeur de l'analyse algorithmique de données topographiques précises, et peut être décisif dans le choix des paramètres.

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

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.

12.1.2 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 > Est > Limagne > Loire-Atlantique > Bretagne. 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.

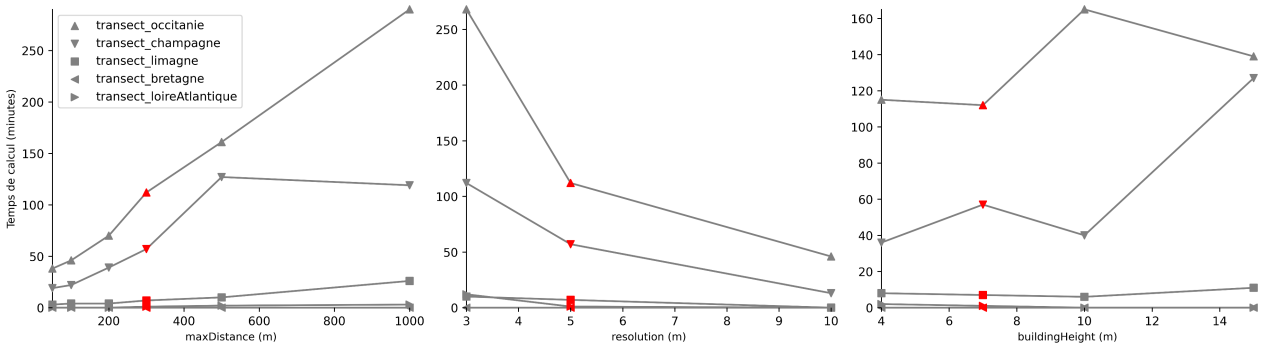


Figure 93: Sensibilité du temps de calcul aux paramètres de l'analyse de visibilité. (en rouge le aramétrage de base

12.1.3 Distance maximale

La Figure 94 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 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, et 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 puisque plus de bâtiments sont captés par l’analyse de visibilité. Elle croît plus rapidement pour les courtes distances. Deux raisons sont possibles : 1) plus on s’éloigne, plus le masquage topographique ou par les autres bâtiments augmente, et 2) plus on s’éloigne de la trace, plus on s’éloigne 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.

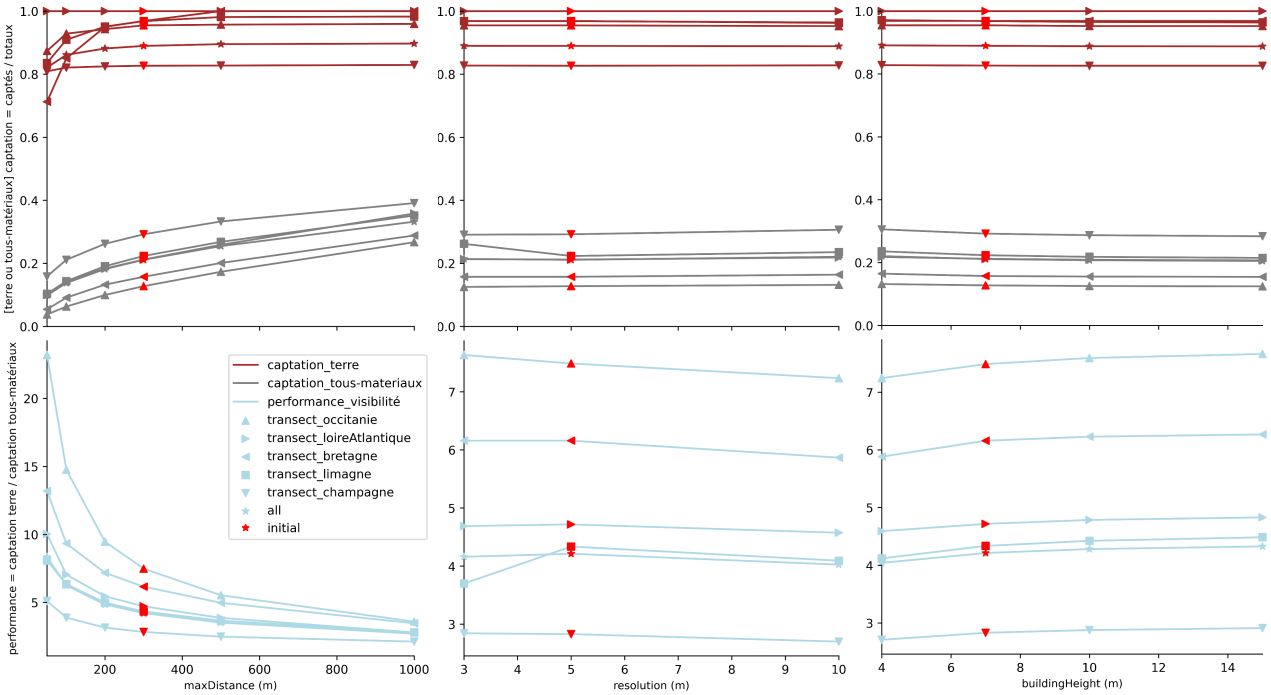


Figure 94: Sensibilité de l'analyse de visibilité aux paramètres "distance maximale", "résolution" et "hauteur bâti".

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 ». 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 ».

12.1.4 Résolution

Lorsque la résolution du raster topographique augmente, l'analyse de visibilité permet une meilleure acuité. Avec une résolution grossière, les bâtiments sont faussement détectés comme « visibles » ou « non visibles », ce qui finalement réduit le nombre de bâtiments en terre détectés comme visibles. On observe qu'entre 3 et 5m de résolution, il n'y a pas de différence d'acuité en général. En Occitanie, l'acuité 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 deça 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.

12.1.5 Hauteur des bâtiments

Pour prendre en compte l'impact des bâtiments sur la visibilité du paysage (par exemple, des bâtiments situés derrière), on modifie la donnée d'altitude au niveau des bâtiments en ajoutant une hauteur prédéfinie. Si l'on augmente cette hauteur au-delà de 1.60m (hauteur de l'analyse de visibilité), sur terrain plat, les bâtiments situés derrière les autres ne sont pas visibles. Seulement, sur terrain d'altitude variable, si les bâtiments situés derrière les autres sont situés un peu plus en altitude, alors ils deviennent « visibles ». En réalité, il peuvent effectivement être visibles, mais il ne s'agit souvent que du haut du bâtiment, donc le toit : on ne voit pas les murs. Dans ce cas, l'analyse ajouterait des bâtiments *tous matériaux* alors qu'en réalité ils sont potentiellement en terre, mais nous ne l'avons pas vu car nous n'avons vu que le toit: cela réduit l'acuité de l'analyse. Considérer cela dans l'analyse la complexifierait fortement et nous n'avons pas trouvé de solution simple. On choisira donc d'augmenter considérablement la hauteur des bâtiments : lorsqu'elle tend vers l'infini, on considère qu'on ne voit plus du tout les bâtiments au dessus des autres. Les paysages traversés étant relativement peu accidentés, nous n'avons jamais vraiment bénéficié de « vue d'ensemble » aérienne, au-dessus des bâtiments.

On voit que 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 ». L’acuité est alors optimale pour des hauteurs de bâtiments tendant vers l’infini, plutôt que pour des hauteurs « réalistes ».

Le temps de calcul évolue peu selon ce paramètre. On peut donc aisément choisir une **hauteur de 15m** pour optimiser le paramètre.

12.1.6 Résultats finaux

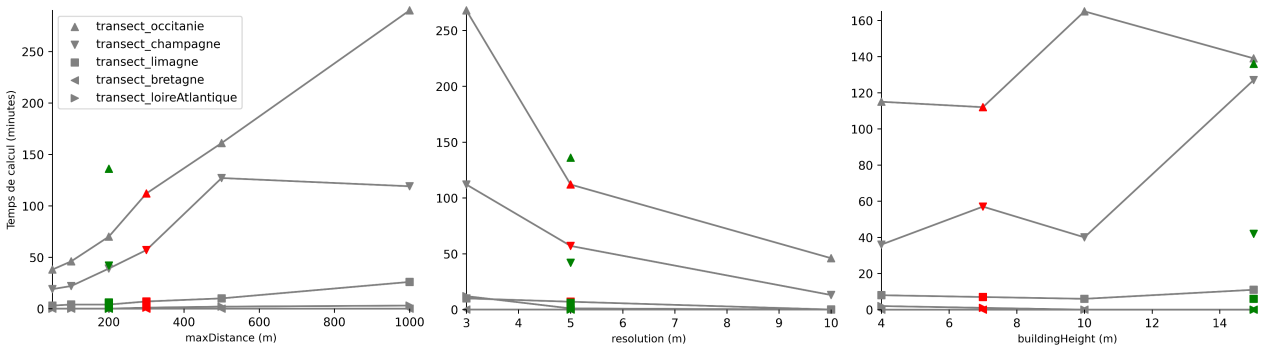


Figure 95: Sensibilité du temps de calcul aux paramètres de l'analyse de visibilité.

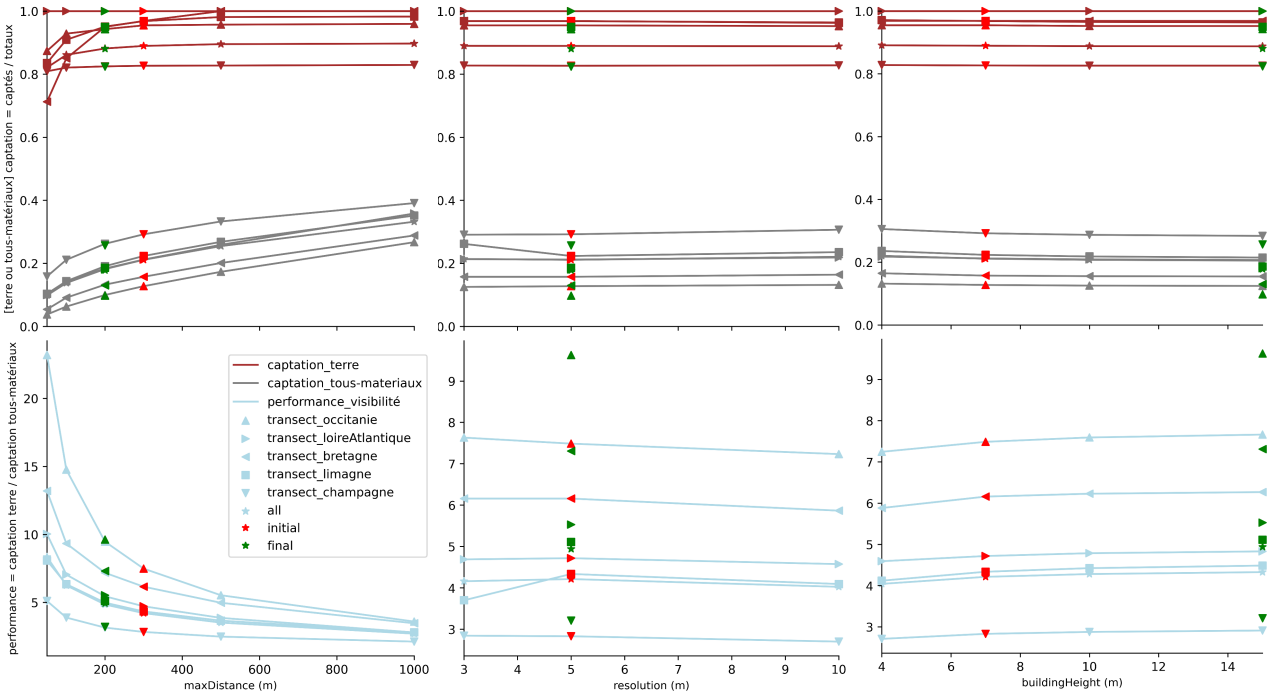


Figure 96: Sensibilité de l'analyse de visibilité aux paramètres "distance maximale", "résolution" et "hauteur bâti".

Le modèle est relancé avec les paramètres sélectionnés : distanceMax = 200m, resolution = 5m, hauteurBati = 15m. Sur la Figure 95, on ajoute à la Figure 93 les temps de calculs du modèle final. Sur la Figure 96, on ajoute à la Figure 94 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.

12.2 Propriétés pédologiques et densités relatives

12.2.1 Densité relative par technique-type et par région

Au cours des transects de collecte de données, nous avons recensé un ensemble de 409 bâtiments en bauge, 770 composés de pisé, et 4119 composés d'adobes. Si dans la plupart des zones d'étude il y avait généralement plusieurs techniques différentes représentées, leurs proportions étaient généralement assez inégales. Aussi, certaines régions ne présentent que quelques bâtiments de chaque technique. Analyser directement l'occurrence relative à l'échelle nationale invisibiliserait les résultats des zones à faible occurrence, aussi nous préférons entamer l'analyse par une décomposition des résultats par région : Ouest (Bretagne, Loire-Atlantique) ; Champagne-Ardennes ; Occitanie ; Limagne.

Pour chaque technique, on présentera les résultats en commençant par les régions avec le plus d'échantillons, car on s'attend à des résultats moins clairs lorsque les données sont plus rares.

Pour l’ensemble des graphiques, la densité relative est calculée à partir de 2 échantillons de points-bâtiments « terre » et de 5 points-bâtiments « OSM » dans l’intervalle de propriété pédologique. Le nombre de bâtiments « terre » est souvent multiplié, par 10 ou 100 afin que son nombre soit dans l’ordre de grandeur des bâtiments de densité ce qui améliore la lecture graphique. Des puissances de 10 sont choisies pour pouvoir facilement recalculer le nombre d’échantillons par intervalle si nécessaire.

12.2.1.1 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. Malgré tout, on retrouve quelques tendances observées précédemment pour la région Bretagne : l’augmentation de la densité relative avec la fraction F0050µm pour GSM, non confirmée par vecteur-STU ; la baisse de teneurs en EG pour GSM, non confirmée par vecteur-STU, et 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.

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 soient liées à chacune des deux zones de transect.

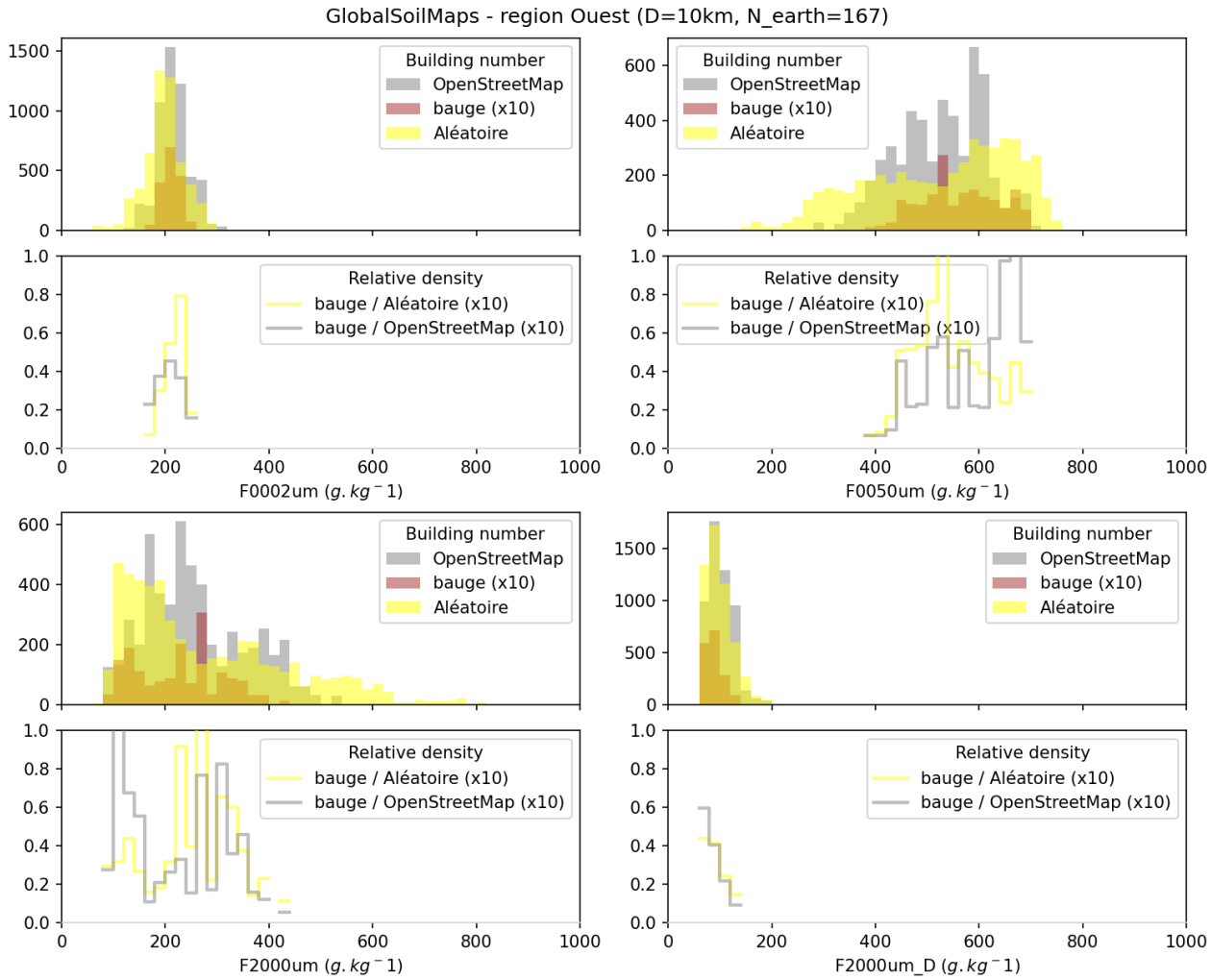


Figure 97 : Bauge – transect – Ouest - GSM

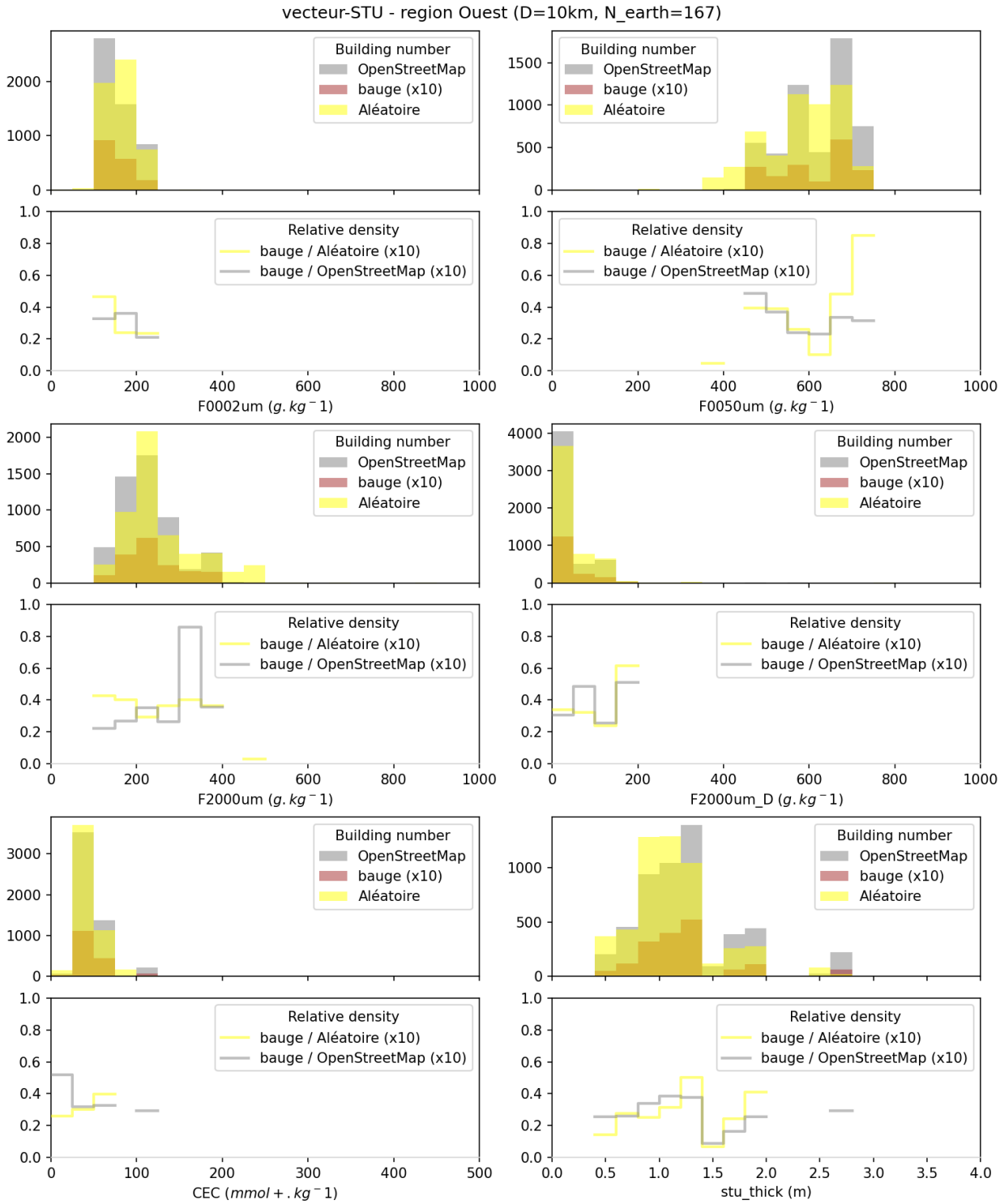


Figure 98 : bauge – transect – Ouest - STU

12.2.1.2 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-F0050µm et la densité bâtie en terre, ainsi qu'encore une fois une relation décroissante de teneurs en éléments grossiers pour GSM. Pour F2000µm_D, la tendance n'est toutefois pas validée par vecteur-STU.

D'autre part, l'augmentation de la densité bâtie en bauge avec la profondeur du sol est également manifeste pour ce transect.

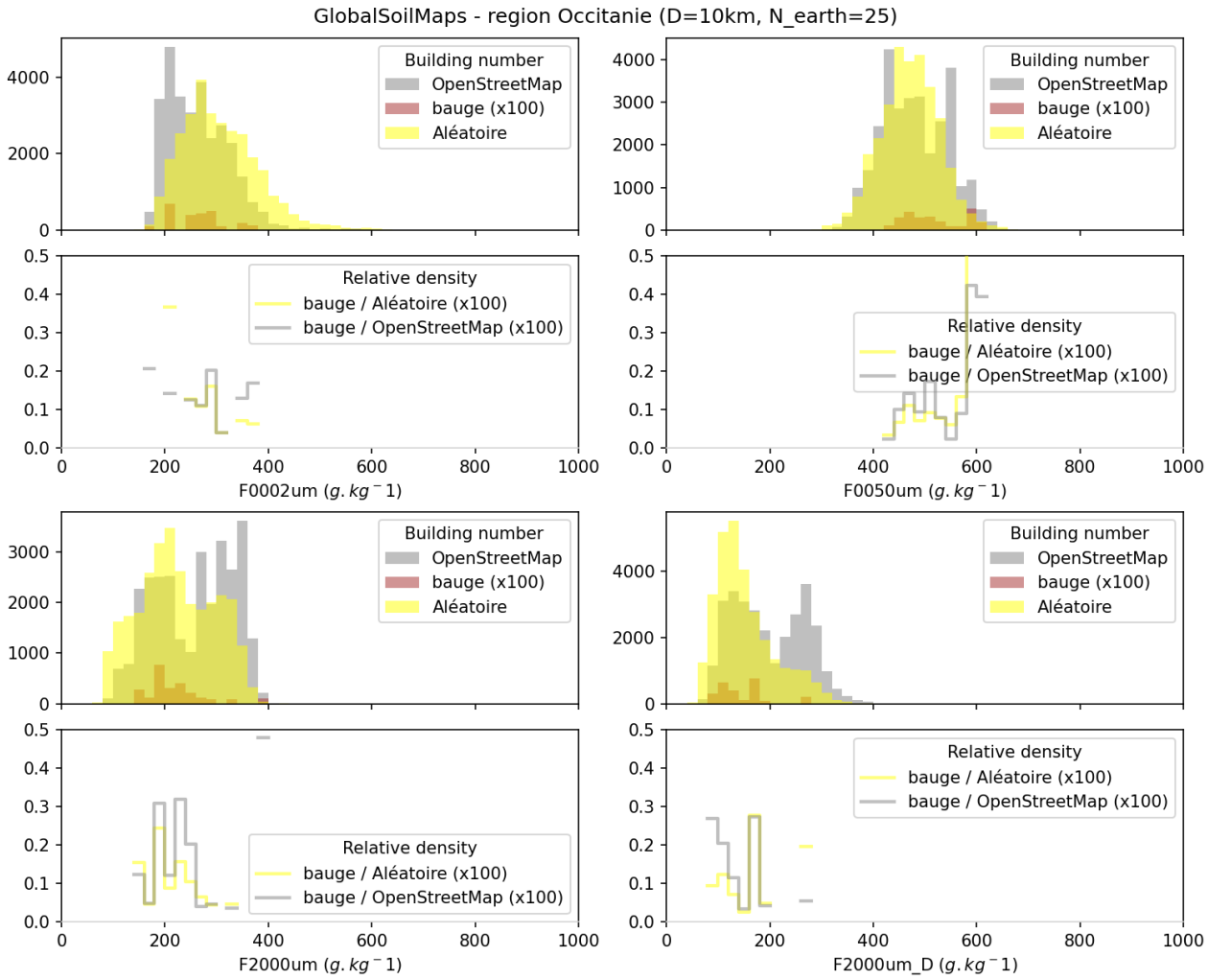


Figure 99 : Bauge – transect – Occitanie - GSM

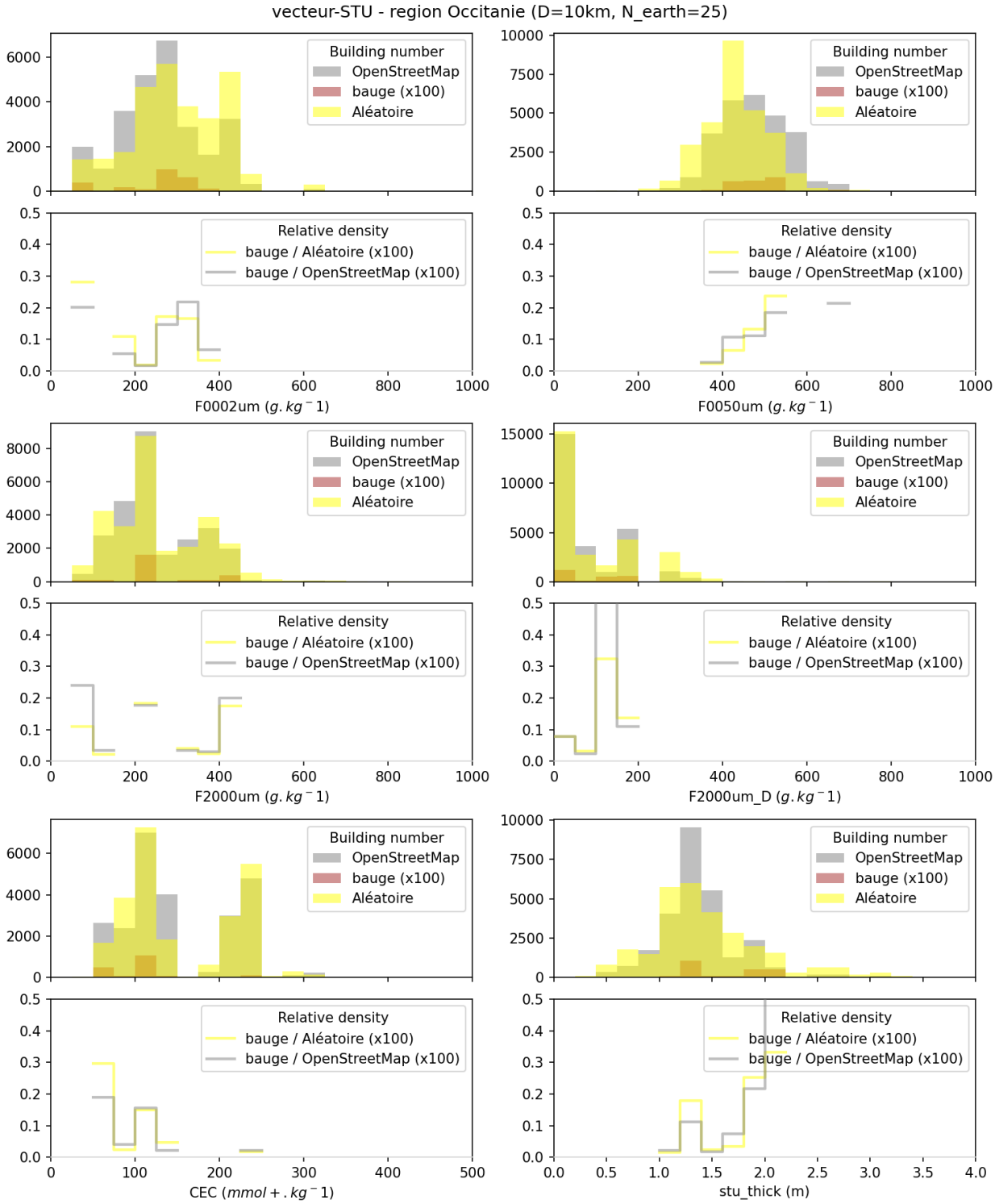


Figure 100 : bauge – transect – Occitanie - STU

12.2.1.3 Bauge : Champagne-Ardennes

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, l'Yonne et l'Aube. La

variabilité des sols étant très faible, le graphique de répartition des données n'était pas intéressant à montrer pour GSM. Pour vecteur-UTS, les données n'ont pas été extraites correctement, probablement lié au fait que la base de données DoneSol3 de l'Ile de France a été rajoutée spécialement pour cette petite zone et la réussite du croisement de données n'a pas pu être vérifiée pour l'instant. Les représentations sont cependant disponibles en annexe xxx.

12.2.1.4 Bauge : limagne

Pour ce transect également, seuls 11 points ont pu être croisés avec les bases de données, ce qui n'a pas permis l'observation de résultats concrets. Cependant, il est utile de mentionner que malgré cela, on observe tout de même la tendance croissante de densité bâtie selon la teneur en limons observée dans l'ensemble des autres analyses de densité relative pour cette propriété.

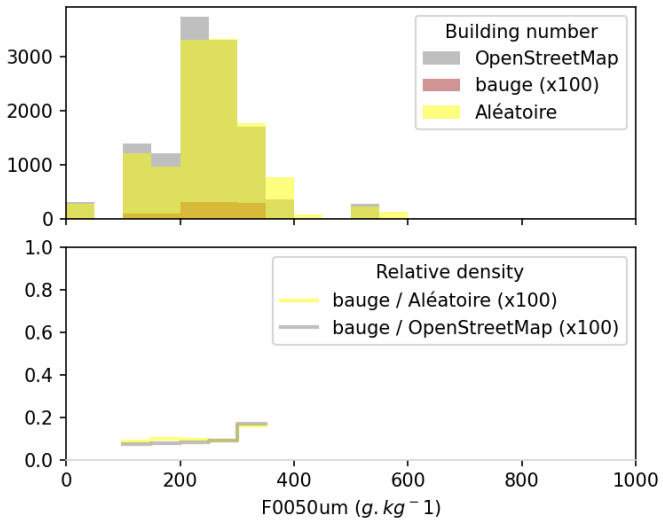


Figure 101 : Influence de la fraction F0050µm (limons) sur la densité relative bâtie en bauge pour les données issues du transect en Limagne.

12.2.1.5 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 F0002µm pour GSM, mais la tendance n'est pas confirmée pour vecteur-STU. 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-F0050µm pour 100-200g.kg^{-1}), mais non partagés entre les deux sources de données.

La plupart des sols français présentent des CEC inférieures à 300 mmol+.kg^{-1} (voir xxx graphique chap 2). Malgré les aléas liés à la modélisation, à la différence entre terre employée et propriétés pédologiques extraites, la quantité d'échantillons présentant des CEC supérieures à 300 mmol+.kg^{-1} montre que ce n'est pas une propriété qui semble vraiment limitante pour les sols de l'hexagone.

On note également l'absence de corrélation explicite entre la profondeur du sol et la densité bâtie, contrairement aux observations pour la bauge.

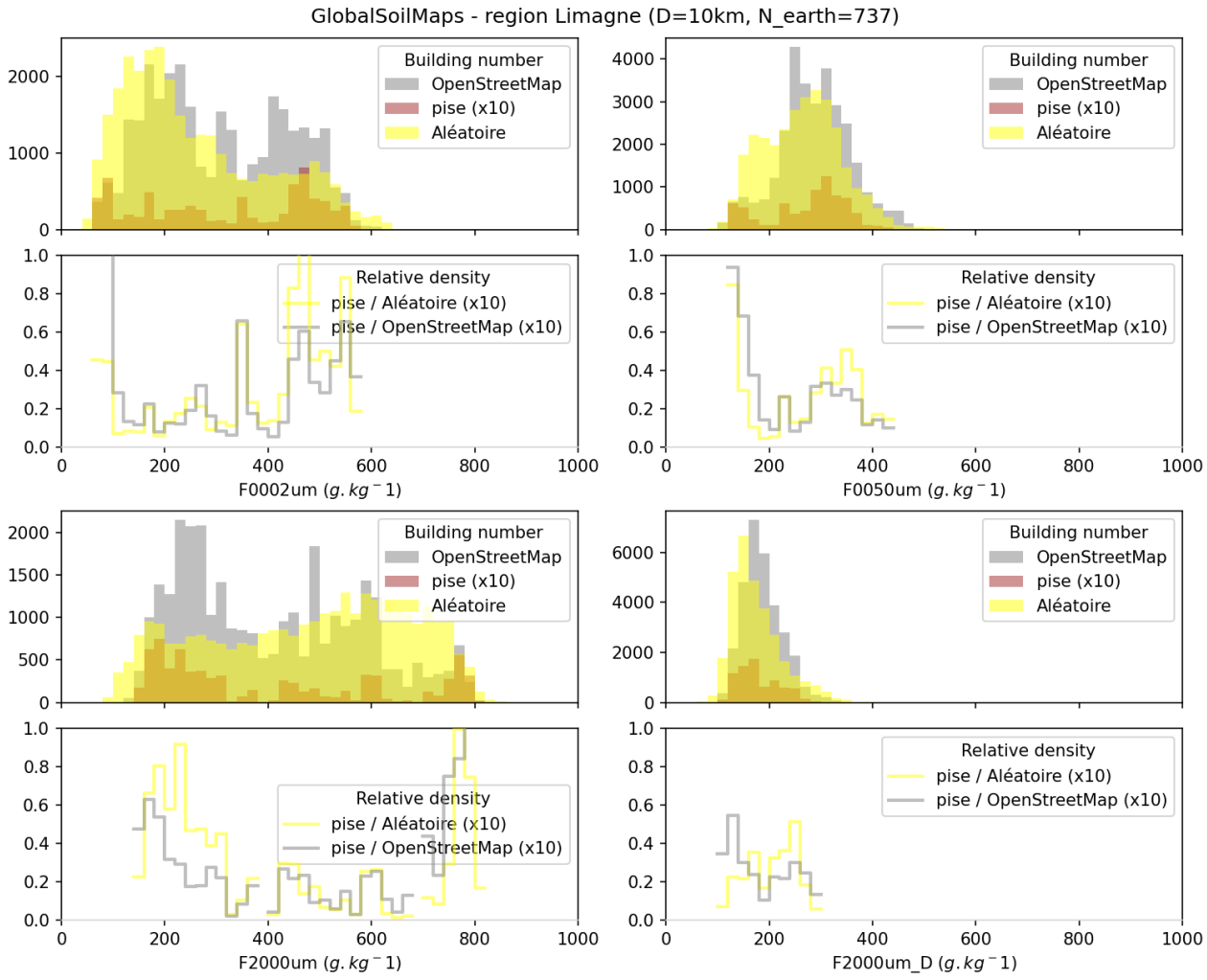


Figure 102 : Pisé – transect – Limagne - GSM

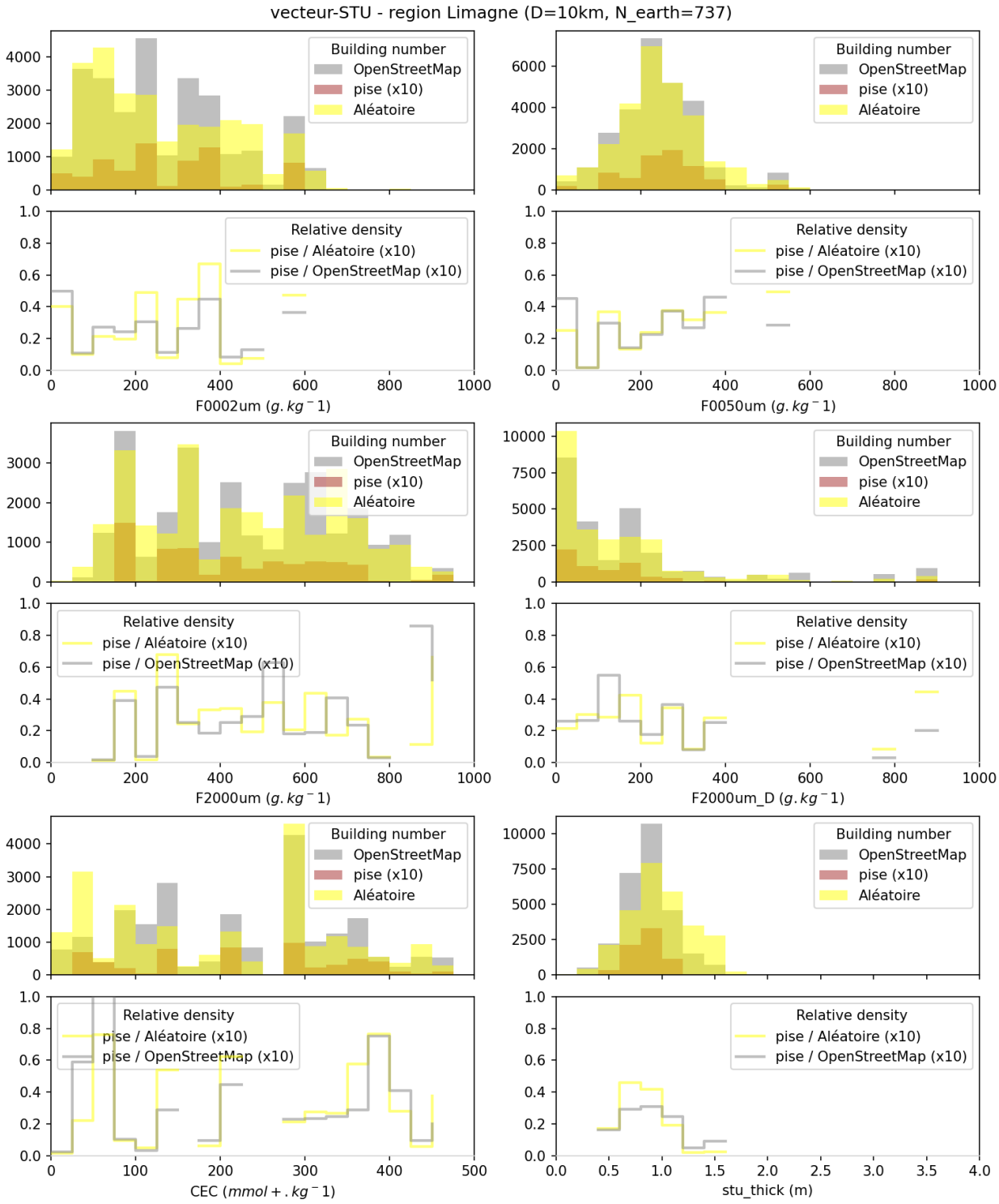


Figure 103 : pisé – transect – Limagne - STU

12.2.1.6 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.

La densité relative est peut-être légèrement croissante avec la fraction F0002µm, assez explicitement pour GSM, pas vraiment pour vecteur-STU, comme observé en Limagne.

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. 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 et aléatoires.

L'épaisseur du profil de sol ou la fraction F0050µm, ne montrent pas de tendances particulières, mais on manque d'informations pour les faibles épaisseurs de sols (0-1m).

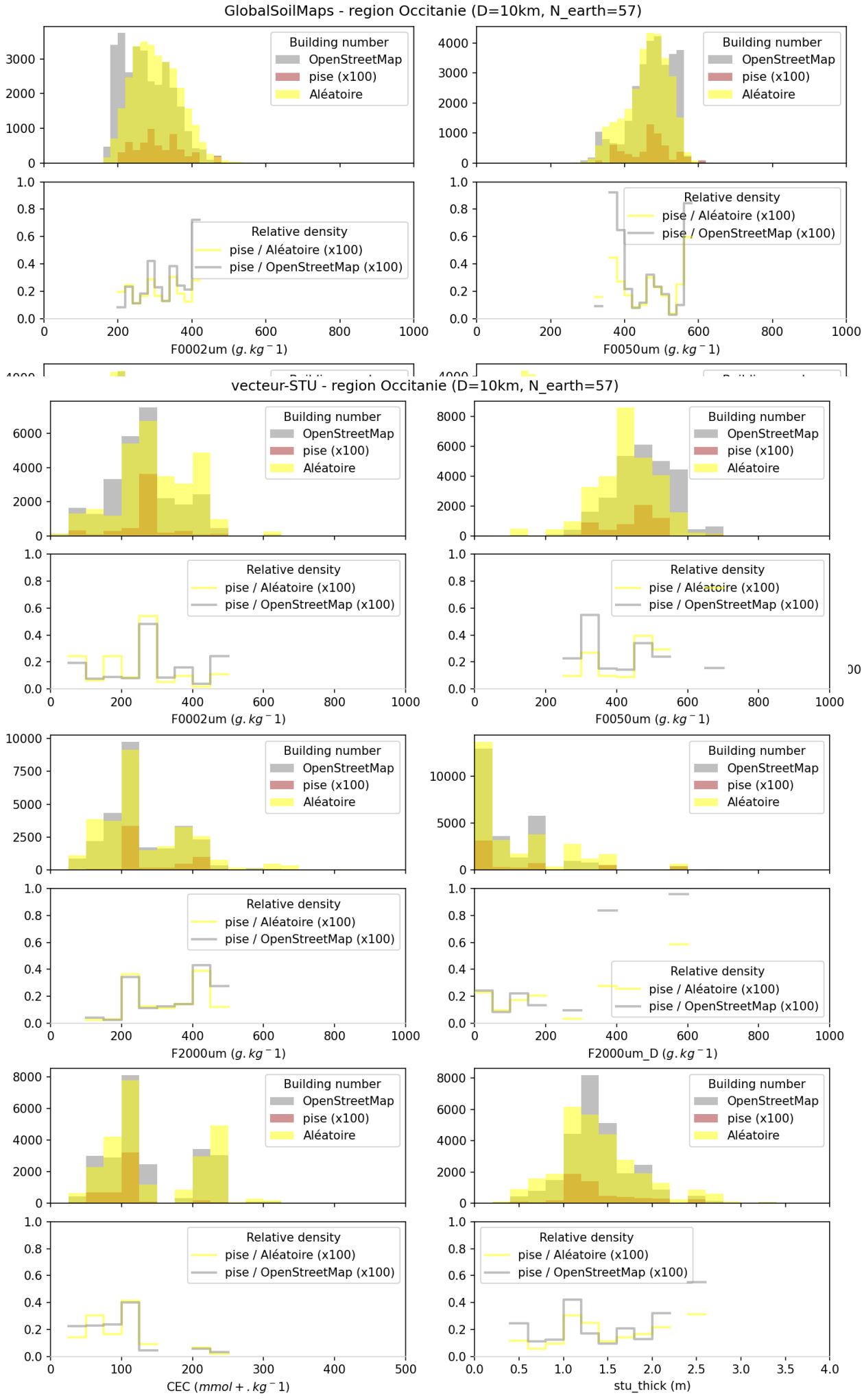


Figure 105 : pisé – transect – occitanie - STU

12.2.1.7 Adobe: Occitanie

407 bâtiments sont identifiés pour cette section. La densité relative OSM semble légèrement croissante avec la fraction F0002µm pour GSM, mais la tendance n'est pas confirmée pour vecteur-STU. Il y a une différence marquée entre OSM et aléatoire pour cette propriété via GSM : la densité relative Aléatoire est relativement constante. Est-ce la marque d'une installlation préférentielle ? 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 F0002µm serait encore plus forte.

Pour F0050µm, 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 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 pour observé pour les techniques de bauge.

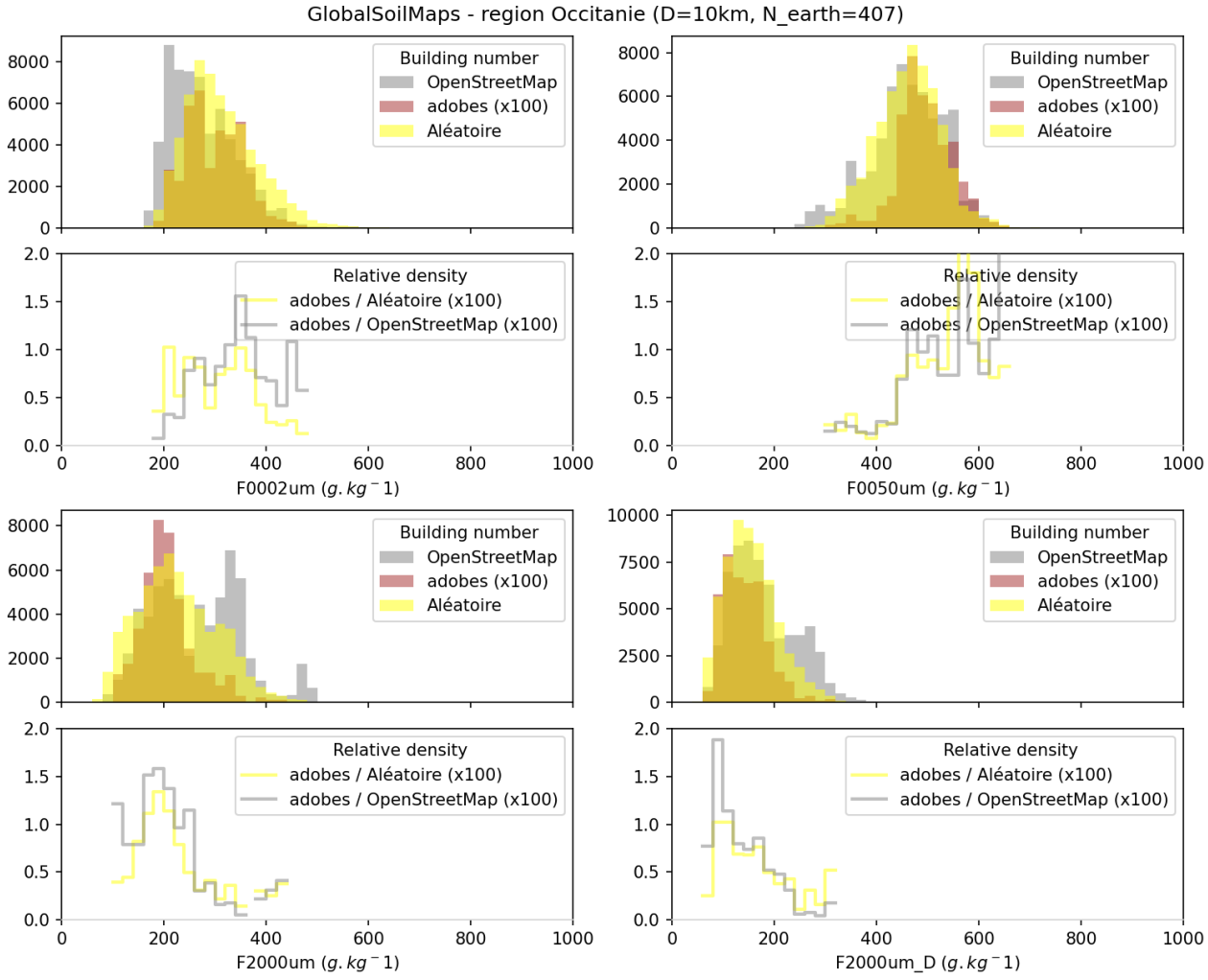


Figure 106 : Adobe – transect – occitanie - GSM

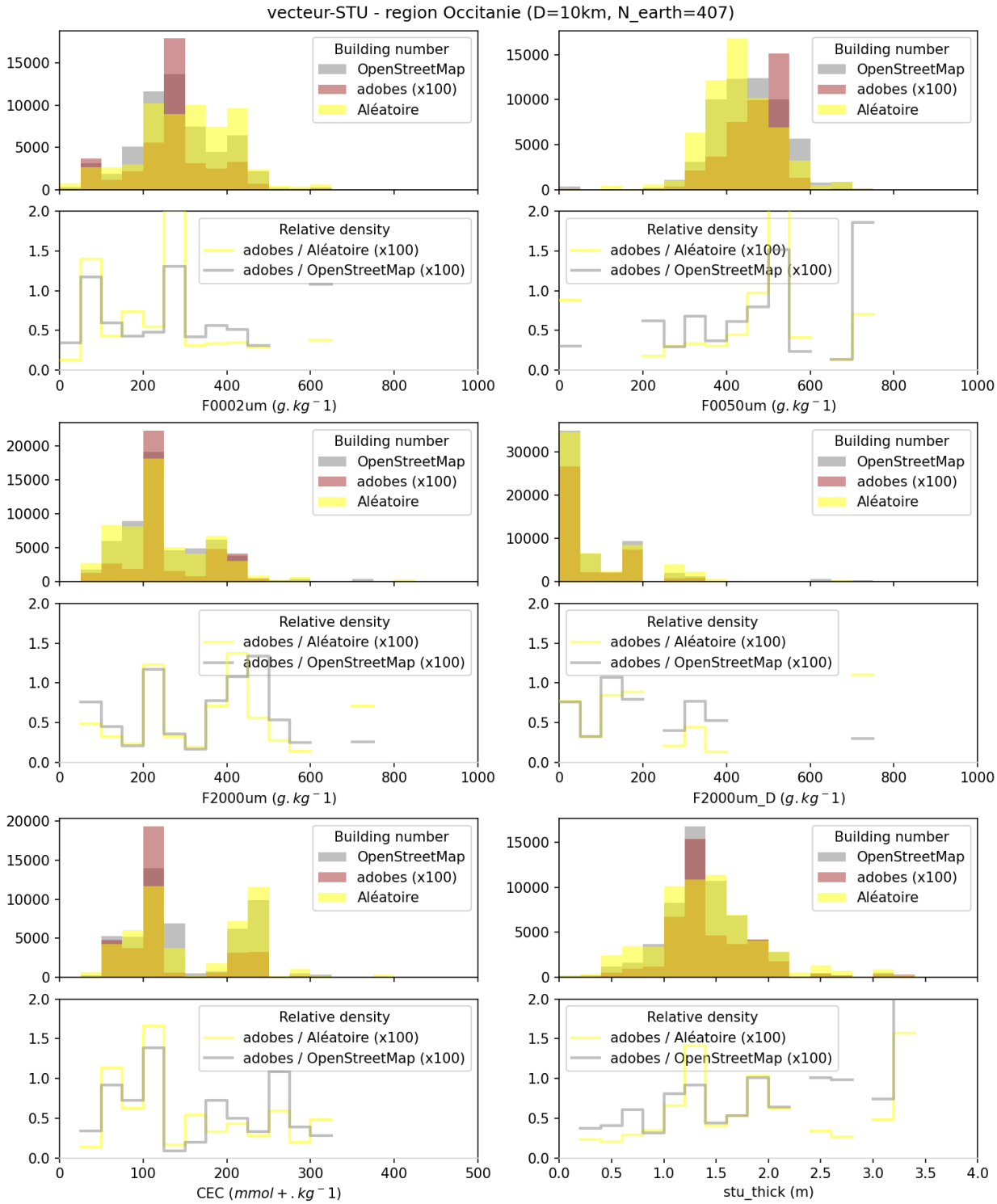


Figure 107 : adobe – transect – occitanie - STU

12.2.1.8 Adobes : Champagne-Ardennes

3415 bâtiments en adobe ont été repérés et croisés avec les bases de données. Les résultats pour cette section sont remarquables par l'absence de corrélation entre les propriétés étudiées et la densité relative en carreaux de terre. Seule peut-être la teneur en éléments grossier F2000µm_D semble défavorable à la densité bâtie, car elle baisse faiblement mais assez régulièrement pour vecteur-STU. Les données issues de GSM s'accordent sur cette conclusion mais semblent n'avoir capturé qu'une faible variabilité de la propriété. Contrairement au transect d'Occitanie et aux observations pour la bauge (Bretagne, Occitanie), la densité relative baisse avec l'augmentation de la profondeur. Les autres propriétés montrent des variations complexes ou des tendances constantes marquées.

Dans les plages les plus représentatives des données de F0002µm, il pourrait y avoir une décroissance progressive de la densité avec l'augmentation de la teneur en argile, pour GSM comme pour vecteur-UTS, ce qui est contraire à l'observation pour l'Occitanie pourtant sur les mêmes plages de valeurs. Mais la relation n'est pas très claire, d'autant plus que les données GSM subissent probablement l'« effet de bord » décrit en xxx.

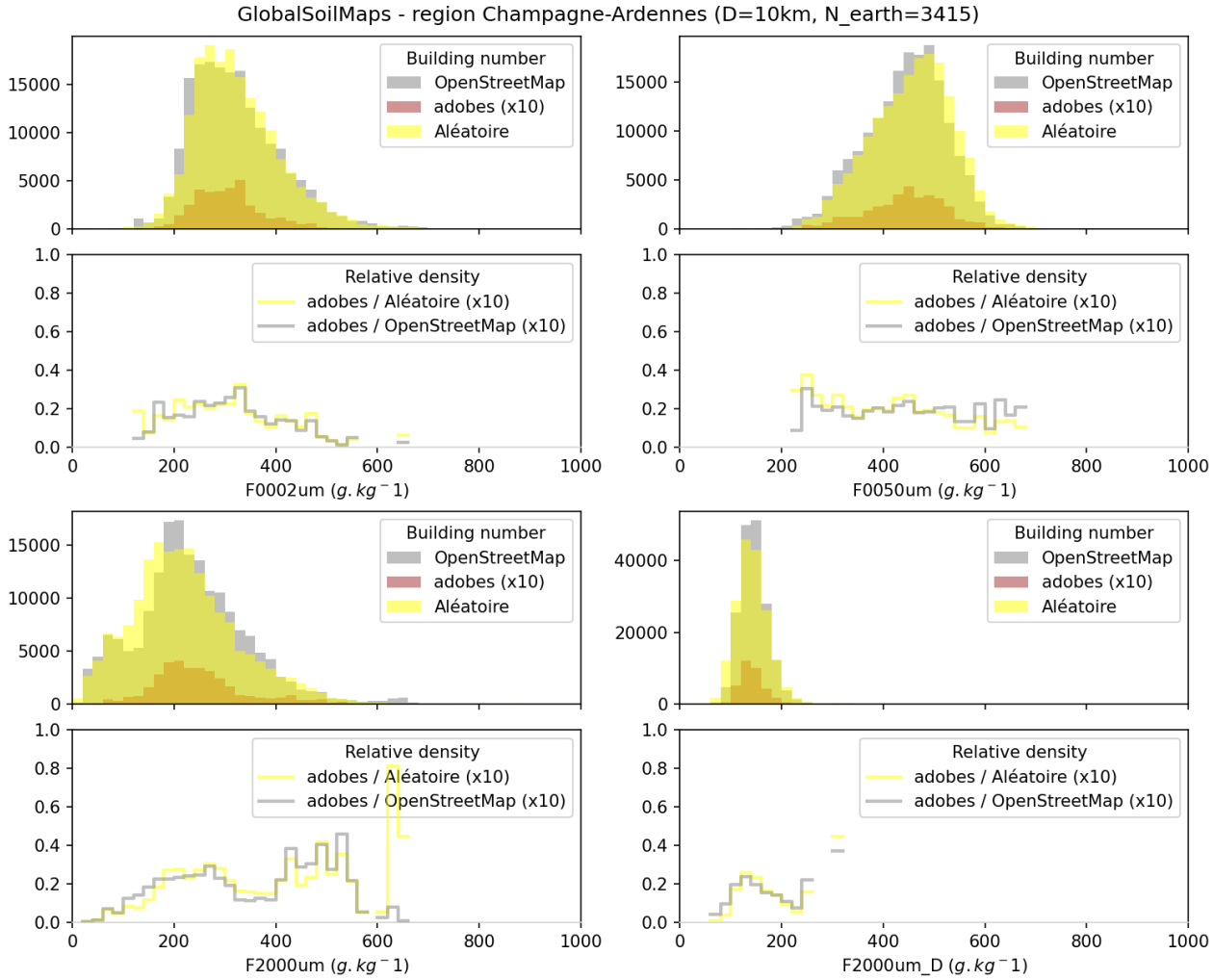


Figure 108 : Adobe – transect – champagne-Ardennes - GSM

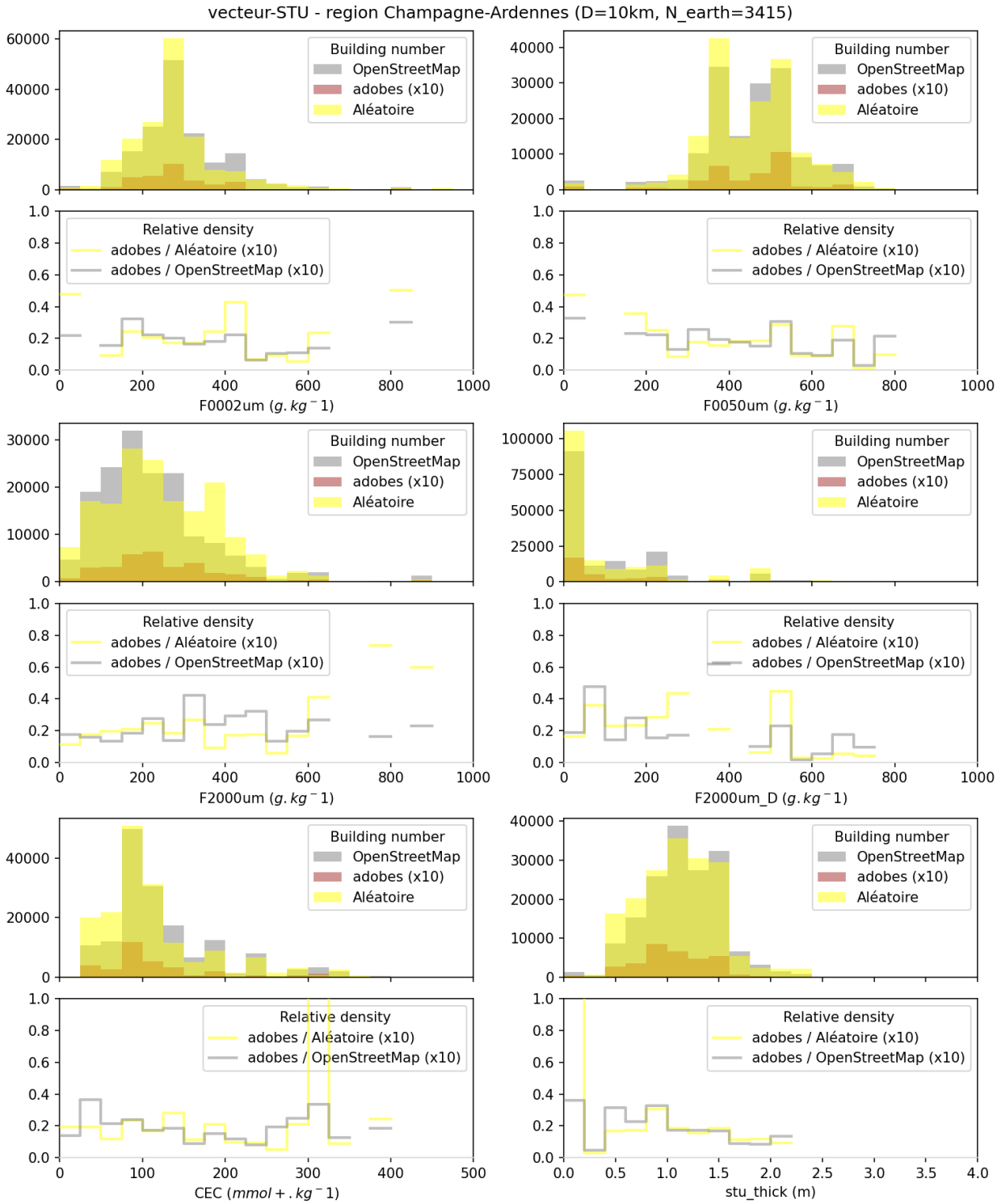


Figure 109 : adobe – transect – champagne-Ardennes - STU

12.2.1.9 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. 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 F0002µm pour les deux sources de données, et peut-être une décroissance pour F0050µm.

Avec également une forte variabilité dans la tendance, la densité augmente avec l'augmentation de la profondeur des sols. Le reste des propriétés ne montre pas de tendance particulière. On note cependant la grande dispersion des valeurs granulométriques pour l'ensemble des propriétés, qui ne peut être liée qu'à de l'erreur statistique.

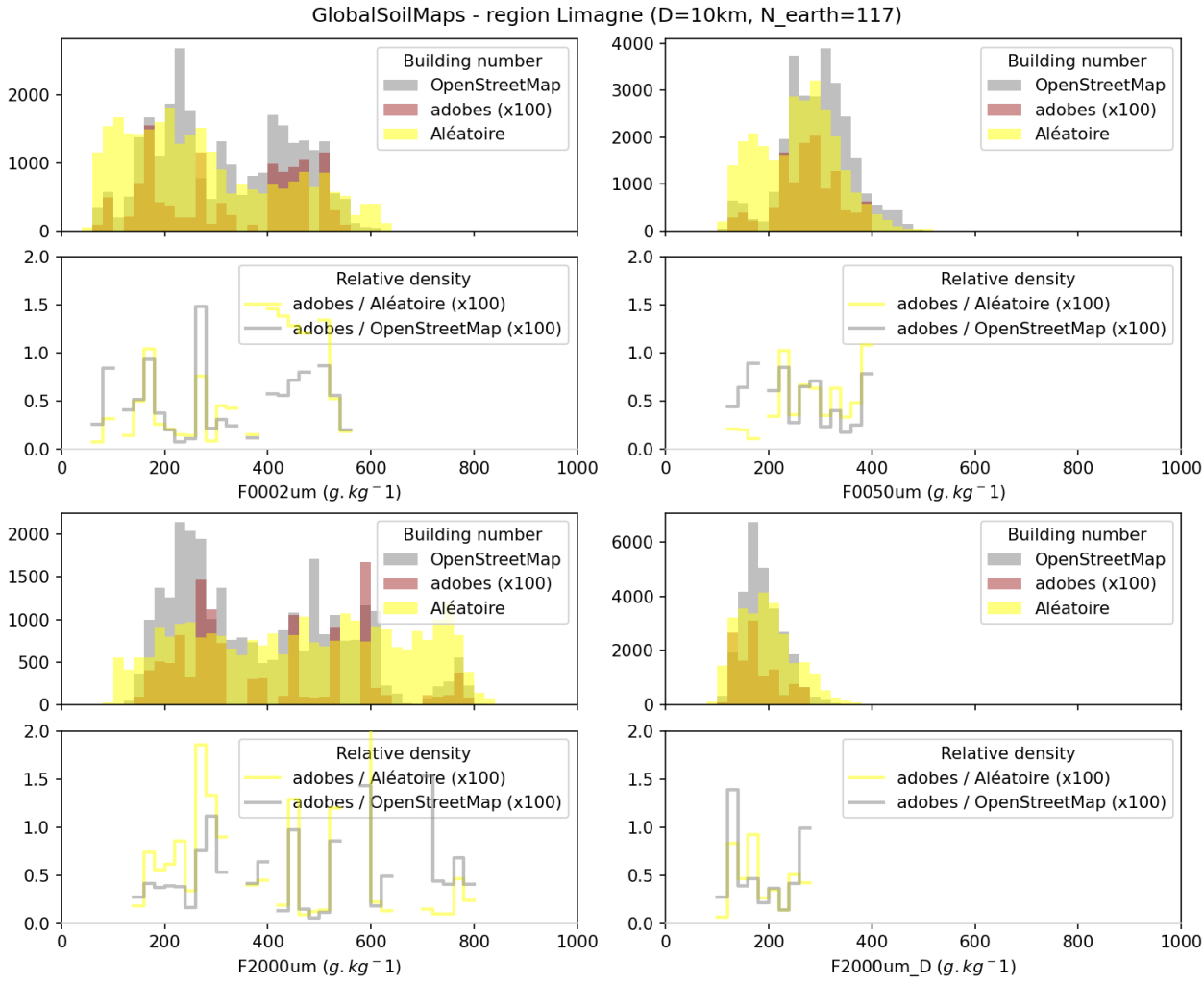


Figure 110 : Adobe – transect – limagne - GSM

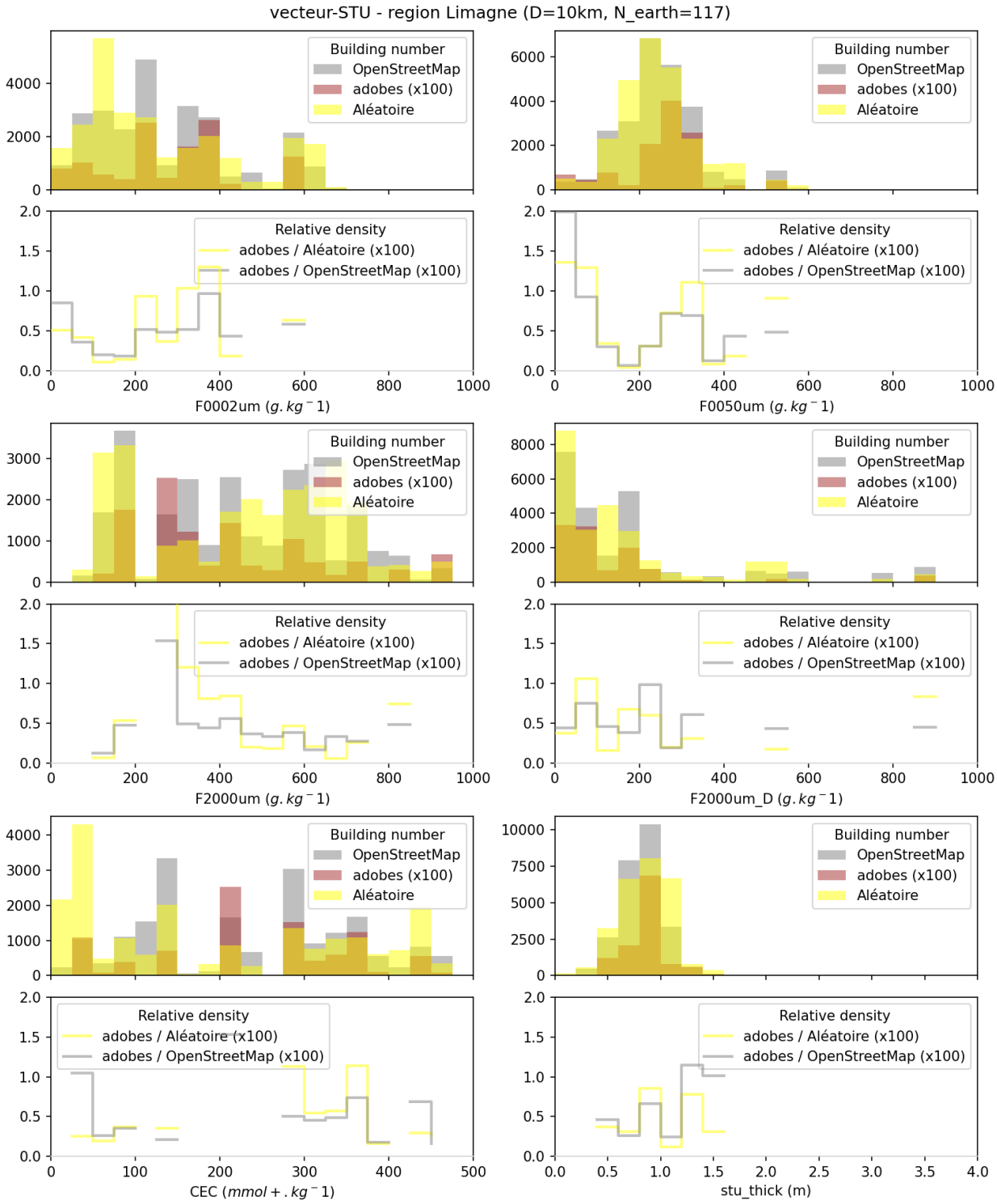


Figure 111 : adobe – transect – limagne - STU

12.2.1.10 Discussion

12.2.1.10.1 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, l'analyse des autres transects peut être employée en comparaison à celle-ci 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 peut être observée ailleurs que sur le territoire Breton (Occitanie, Limagne), tout comme l'augmentation de la densité avec la profondeur du sol (Occitanie). En effet, 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). Si l'on fait l'hypothèse que en dehors de limons éoliens, il n'y a pas de corrélation marquée entre la teneur en limons et la profondeur du sol, on peut on peut supposer que la proportion croissante de bâtiments en terre au regard de ces deux propriétés est liée à leur action conjointe et non à l'action de l'une impactant l'autre par corrélation. Il est donc possible que la teneur en limons soit favorable à la facilité de mise en œuvre de la technique de la bauge, et que la profondeur du sol est favorable à l'emploi d'autres techniques (comme la pierre). Ces deux facteurs pouvant jouer conjointement sur le choix technique comme en Bretagne, ou de manière décorrélée sur d'autres territoires. Néanmoins, une compréhension plus détaillée des dynamiques de corrélations entre propriétés des sols en Occitanie et Limagne serait adéquate pour conclure sur ces hypothèses.

12.2.1.10.2 Pisé

Le pisé n'a été rencontré qu'en Limagne et en Occitanie, et de manière anecdotique en Champagne-Ardennes (un bâtiment). De ce fait, nous ne disposons que de deux zones de comparaisons.

Les données GSM suggèrent une croissance de densité bâtie en pisé avec la fraction F0002µm, mais dans les deux cas, ce n'est pas confirmé par vecteur-STU. 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. Peut être que les granulométries grossières sont plus favorables aux techniques compactées, comme suggéré en xxx (partie procédés). 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). 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.

12.2.1.10.3 Adobes

Les résultats de l'analyse des bâtiments composés d'adobes auraient pu être remarquables 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 F0002µm (argile) semble faiblement favorable à la densité bâtie en Occitanie et Limagne, en Champagne-Ardennes la corrélation éventuelle serait plutôt négative.

Finalement, nous pouvons émettre quelques hypothèse face au manque de corrélation observé malgré la quantité de données mobilisées :

- pour les techniques-types d'adobe, préfabriquées, le matériau est peut-être souvent transporté et le bâtiment ne serait pas construit fréquemment avec les terres sous-jacentes aux bâtiments

- autres ?

12.2.1.10.4 Remarques générales

Les données de densité issues de l'analyse de visibilité OSM présentent dans l'ensemble moins de variabilité que les points Aléatoires. Cela confirme l'intérêt de ne pas employer uniquement des données pédologiques pour ce type d'analyse. Mais la donnée aléatoire permet de percevoir quelques tendances et lorsque le nombre d'échantillons est conséquent, elle permet au moins de connaître la différence entre les types de sols peu ou pas échantillonnés et les types de sols échantillonnés où aucun bâtiment en terre n'est présent ; ce qui est indispensable à la compréhension de la distribution des bâtiments en terre selon les variables pédologiques étudiées.

Avec des corrélations lisses et claires, nous nous serions attendus a voir des *optimums* plutôt que des formes de corrélations linéaires. Mais les optimums sont difficiles à valider pour si peu de données, car ils peuvent être liés à « l'effet de bord » décrit en xxx. De plus, on n'observe souvent qu'une petite partie de la distribution granulaire possible des sols. Peut-être que, pour chaque région, on a une partie de la tendance globale ; mais dans l'ensemble c'est surtout un manque de représentativité des données ou une absence de forte corrélation qui se dégage des résultats de cette analyse.

Conclusion

Les propriétés de composition de la terre affectent les choix techniques dans un système d'interactions complexes.

Depuis la pédogenèse qui conditionne la composition des sols, peuvent être définies plusieurs échelles de description des propriétés du sol : les composants solides et liquides, leurs interactions relatives à l'échelle élémentaire, les propriétés macroscopiques des mélanges et leurs réactions aux contraintes.

Ces propriétés macroscopiques de la matière sont « mobilisées » ou « subies » dans les procédés de construction en terre crue. Selon les gestes et techniques employées, la facilité de transformation, qui peut intégrer des notions de temps de travail, de pénibilité, de liberté créative, etc., sera plus ou moins impactée par les propriétés du sol. C'est ainsi que dans une technique-type, c'est à dire un « bouquet » de gestes et techniques pouvant s'enchaîner de manière cohérente, se compose une facilité de mise en œuvre globale qui inévitablement, impacte la sélection ou non de cette technique-type.

Mais ces interactions entre matière et procédés de transformation ne sont pas les seules facteurs à entrer en jeu dans les choix techniques. Le « déterminisme » des sols sur les choix des techniques de construction en terre crue s'effectue au sein d'un écosystème sociotechnique complexe, qui a toujours eu une importance capitale même au sein de sociétés paysannes de subsistance, que l'on aurait pu identifier comme dépendantes de leur écosystème matériel. Inévitablement, dans un système technique mondialisé et perfusé à l'énergie illimitée, le choix technique lié à la facilité de mise en œuvre n'est même plus perceptible : seul la tenacité de constructeur.ices se positionnant dans un imaginaire de responsabilité sociétale permet de maintenir une certaine « rationalité paysanne » et donc un lien entre technique et propriétés des sols.

De ce fait, appréhender la « convenance des terres » comme un sujet de mécanique des sols peut divertir l'ingénieur sur ses questionnements de physique granulaire fondamentale, mais ne permet pas d'appréhender de manière holistique ce qui définit une « bonne » technique de construction en terre, pour qui, pour quoi, bref, dans quel contexte. Même à l'échelle mécanique, la modélisation des propriétés de la terre semble loin de permettre une prédiction des propriétés au-delà de contextes de laboratoire normalisés. Après cent ans de sciences géotechniques, comment espérer que le déploiement de la filière terre crue soit aidé par la recherche académique dans les temps impartis de l'urgence écologique ?

D'autre part, les chercheur.euses ne peuvent plus désormais considérer le sujet de l'épanouissement de la construction en terre crue comme un sujet technique. S'il s'agit de l'accélérer, les freins sont avant tout politiques et sociaux. S'il s'agit de la déployer de manière équilibrée, maximisant ses potentiels sociaux et environnementaux, il s'agit d'une question d'organisation collective des systèmes de formation, de partage de bonnes pratiques, de discernement sur ces performances environnementales et sociales. N'oublions pas que 3 millions de logements sont vides en France hexagonale. Déployer la construction en terre crue, de logements neufs en particulier, n'est-pas avant tout un désir

de performance esthétique collective, plutôt qu’un vrai besoin technique ? Peut-être devrions-nous prendre le temps d’en discuter.