

Projet National Terre Crue

Étude d'opportunité

Comité de rédaction :

Jean-Emmanuel Aubert (LMDC/INSA)
Loïc Daubas (Atelier Belenfant Daubas)
Samuel Dugelay (Entreprise Makjo)
Antonin Fabbri (ENTPE)
Erwan Hamard (IFSTTAR)
Lauredan Le Guen (IFSTTAR)
Frédéric Loyau (Fiabibat)
Pascal Maillard (CTMNC)
Nicolas Meunier (Entreprise Meunier)
Stéphane Peignier (Cabinet Arketype)
Fabrice Rojat (Cerema)
Thibault Vialleton (Batiserf)

Relecteurs :

Julien Borderon (Cerema)
Arthur Helouin de Menibus (Eco Pertica)
Lamine Ighil Ameer (Cerema)
Karine Jan (Cerema)
Thierry Joffroy (Craterre)
Alain Marcom (Areso)
Michel Philipo (Lesa)
Sophie Popot (Arpe)
Lucile Saussaye (Cerema)
Julien Serri (FFB/UMGO)



Table des matières

| | |
|---|----|
| 1. Introduction | 2 |
| 2. Contexte et objectifs | 2 |
| 2.1 Contexte et enjeux | 2 |
| 2.2 Présentation des techniques de construction | 3 |
| 2.3 Besoins de la filière | 4 |
| 2.4 Objectifs principaux du projet..... | 5 |
| 3. Axes potentiels de recherche..... | 5 |
| 3.1 Comportement mécanique et sismique | 5 |
| 3.2 Comportement hygrothermique | 7 |
| 3.3 Résistance au feu | 7 |
| 3.4 Confort acoustique | 8 |
| 3.5 Redécouvrir et inventer une culture de la terre crue | 8 |
| 3.6 Formation..... | 8 |
| 3.7 Évaluation des impacts environnemental, social et sanitaire | 8 |
| 3.8 Essais de contrôle sur chantier | 9 |
| 4. Résultats attendus..... | 9 |
| 5. Références..... | 10 |
| 6. Partenaires potentiels..... | 11 |
| 7. Charte du projet..... | 12 |

1. Introduction

La France est riche d'un patrimoine important en terre crue, de l'ordre de 1 million de logements, âgés pour la plupart d'au moins un siècle [1]. Ce patrimoine apporte la preuve de la pérennité de ce type de construction, il nous renseigne sur les techniques de mise en œuvre adaptées localement, il est la mémoire des cultures constructives vernaculaires et participe à l'attractivité touristique de nos territoires. Ainsi l'entretien adapté de ce patrimoine est un enjeu important.

À cela s'ajoute un regain d'intérêt pour la construction neuve en terre du fait de son faible impact environnemental et du confort hygrothermique et acoustique qu'elle procure. Les parois en terre crue disposent d'une inertie thermique importante, renforcée par les changements de phases de l'eau et sont également capables de capter les apports solaires [2]. La forte inertie de ce matériau offre, entre autre, un confort d'été remarquable et son emploi peut être envisagé pour lutter contre les effets des îlots de chaleur urbains. En outre, l'énergie grise incorporée dans une paroi en terre crue locale est environ vingt fois inférieure à celle incorporée dans une paroi en matériau conventionnel [3-5]. Ce matériau constitue donc une alternative sérieuse pour atteindre les objectifs de la construction « bas carbone ». Enfin, la construction en terre est un débouché potentiel pour les terres de terrassements des ouvrages du BTP, considérées comme déchets inertes, et qui constituent la majorité des déchets produits par ce secteur.

Sous l'impulsion du Ministère en charge de l'Environnement, les filières terre se sont regroupées pour rédiger des référentiels de mise en œuvre, les Guides de Bonnes Pratiques. Ces guides faciliteront l'assurabilité des constructions et serviront de référence pour l'entretien du patrimoine et la formation des maîtres d'œuvre. Cependant, ils ne suffiront pas pour répondre aux contraintes réglementaires du secteur de la construction (réglementations thermique et sismique) ni pour valider son usage dans certains types de bâtiments (ERP, promotion immobilière, bâtiments de plusieurs étages). Dans la continuité du travail initié, il est nécessaire de développer des outils de dimensionnement des ouvrages à destination des bureaux d'études, des bureaux de contrôles, en lien étroit avec les assureurs.

Le projet proposé a pour objectif de permettre le déploiement, à plus grande échelle, de la construction en terre crue. Ce développement passe par la levée des freins réglementaires identifiés pour ce secteur. Afin de répondre le plus largement possible aux besoins des entreprises, quelle que soit l'approche constructive utilisée (valorisation des terres excavées, de gisements spécifiques, transformation sur le site d'extraction ou sur chantier) et de s'adapter à la variabilité des terres, il est proposé d'adopter une démarche de validation performantielle des ouvrages. Cette démarche ne valide pas, a priori, un élément d'ouvrage en fonction du matériau employé, mais un élément d'ouvrage en fonction d'essais de chantier ou de laboratoire réalisés sur l'élément constructif fini et en fonction des contraintes réelles qui seront appliquées à l'élément d'ouvrage durant la vie du bâti. Cette démarche requiert le développement d'essais de chantier ou de laboratoire ainsi que de loi de changement d'échelle permettant de définir la performance de l'ouvrage à partir des résultats d'essais. Le projet s'appuiera sur la capitalisation des données scientifiques déjà existantes ainsi que sur des recherches ciblées pour répondre aux manques identifiés.

2. Contexte et objectifs

2.1 Contexte et enjeux

Le secteur du BTP produit la moitié des déchets de l'Union Européenne et parmi ces déchets environ 75 % en masse sont des terres et des pierres [6]. La loi sur la Transition Énergétique fixe un objectif de recyclage de 70 % des déchets du BTP pour 2020. La valorisation des terres d'excavation est un enjeu fort pour participer à l'atteinte de cet objectif. La construction de bâtiments incorporant une part importante de terre crue est une des solutions. En Bretagne, la valorisation des terres convenant pour la construction en terre mises en décharge (environ 25 % des terres) permettrait de construire la moitié des logements individuels de la région [7]. Ceci montre le fort marché potentiel de ce secteur.

Les anciens bâtisseurs en terre crue ne disposaient que de l'énergie humaine ou animale et de matériaux de construction prélevés dans leur environnement immédiat pour construire. L'énergie grise incorporée dans de telles constructions est proche de 0. Aujourd'hui, des moyens mécanisés sont employés, ce qui a pour effet d'augmenter l'impact de ces procédés, mais l'emploi de terres locales, qui limite les transports, et de terre crue, qui ne nécessite ni cuisson ni ajout de liants hydrauliques, fait de ces techniques des procédés bas carbone. La substitution d'une partie des matériaux conventionnels par de la terre crue

permettrait d'améliorer les indicateurs environnementaux (notamment E+/C-) de certains projets de construction.

Si elle n'est pas stabilisée par un liant hydraulique, la terre est réemployable en fin de vie pour la construction [3]. La construction en terre valorise les terres d'excavations, considérées comme un des principaux déchets du secteur du BTP, à l'aide de procédés de construction bas carbone et produit un matériau qui est réemployable à l'infini. La terre peut donc être considérée comme un des matériaux de construction parmi les plus prometteurs pour répondre au mieux aux enjeux de l'économie circulaire.

Même si elles ne peuvent pas être considérées comme isolantes, les parois en terre crue bénéficient d'un pouvoir d'accumulation des apports solaires et d'une forte inertie thermique et hydrique qui procurent un confort intérieur reconnu par les habitants [2]. Le renforcement des réglementations thermiques a conduit à l'emploi de matériaux et de systèmes de plus en plus optimisés thermiquement réduisant ainsi l'énergie en vie de service des bâtiments, mais augmentant également leur dépense en énergie grise. Pour poursuivre cet effort de réduction des impacts environnementaux du secteur de la construction, le prochain défi est le recours à des matériaux à faible énergie grise, comme la terre crue par exemple.

Actuellement, la majorité des maçons travaillent sur de la restauration pour des clients particuliers. Il s'agit principalement de corrections thermiques mais également de création d'ouvertures, de restauration de parties dégradées et de rehausses. Une petite partie des maçons travaille également sur des projets neufs et/ou du bâtiment public, le plus souvent en relation avec une équipe de maîtrise d'œuvre.

2.2 Présentation des techniques de construction

La terre est un des premiers matériaux employé par l'Homme pour la construction. Au fil des siècles différentes techniques de mises en œuvre ont été développées. Le Tableau 1 présente les techniques de constructions modernes en terre couramment rencontrées en France.

| | |
|--|---|
|  <p><i>Crédit photo : Nicolas Meunier</i></p> | <p><u>Pisé</u></p> <p>Terre compactée dans un coffrage pour former un mur monolithique porteur.</p> |
|  <p><i>Crédit photo : IFSTTAR</i></p> | <p><u>Bloc de Terre Comprimée (BTC)</u></p> <p>Blocs de terre compactés dans une presse, maçonnés après séchage pour former un mur porteur.</p> |
|  <p><i>Crédit photo : IFSTTAR</i></p> | <p><u>Bauge</u></p> <p>Terre malaxée à l'état plastique, modelée puis empilée pour former un mur monolithique porteur.</p> |

| | |
|--|--|
|  <p><i>Crédit photo : IFSTTAR</i></p> | <p><u>Adobe</u></p> <p>Briques de terre moulées maçonnées après séchage pour former un mur porteur.</p> |
|  <p><i>Crédit photo : Vincent Doussinault</i></p> | <p><u>Torchis</u></p> <p>Mélange de terre à l'état plastique et de fibres utilisé comme remplissage d'une structure porteuse, souvent en bois.</p> |
|  <p><i>Crédit photo : Inventerre</i></p> | <p><u>Terre allégée</u></p> <p>Mélange de terre et de fibres, mis en œuvre dans un coffrage, ayant généralement une densité sèche inférieure à 900 kg/m³, utilisé comme remplissage d'une structure porteuse.</p> |
|  <p><i>Crédit photo : Triphine Duvauferrier</i></p> | <p><u>Enduit</u></p> <p>Mélange de terre à l'état plastique mis en œuvre humide pour enduire la surface des murs.</p> |

Tableau 1. Présentation des techniques de construction en terre

2.3 Besoins de la filière

Malgré ses forts atouts environnementaux, la construction en terre reste aujourd'hui en manque de visibilité. Les raisons en sont multiples, la construction en terre rencontrant un certain nombre de besoins :

- Assurabilité : l'absence de document de référence validé par l'Agence Qualité Construction (à l'exception des enduits) fait de la construction en terre une technique non courante au regard des assureurs. Les guides de bonnes pratiques en cours de rédaction doivent permettre d'avancer sur ce sujet,
- Réglementation (thermique, sismique, feu, acoustique),
- Calcul de structure : au-delà du fait que très peu de données soient disponibles pour réaliser les contrôles réglementaires pour la terre, la variabilité de ce matériau naturel est peu compatible avec la démarche prescriptive généralement employée dans le bâtiment qui impose de connaître a priori les performances des produits. Or ces performances dépendent de la nature de la terre et de sa mise en œuvre qui varient pour chaque chantier.

- Image de la terre : le matériau terre est souvent ignoré ou souffre d'une image rétrograde auprès du grand public et des professionnels de la construction. Il n'est donc pas ou mal pris en considération dans les appels d'offres, les formations et les réglementations.
- Formation : les référentiels de formations pour les maçons, les architectes, les ingénieurs et les maîtres d'ouvrage ne prennent que rarement en compte les matériaux naturels et abordent quasi-uniquement les matériaux conventionnels. Il en résulte un manque de compétence important pour l'entretien du patrimoine et la construction neuve.
- Coûts : bien que le matériau terre puisse être considéré comme gratuit, le besoin en main d'œuvre est plus important sur un chantier en terre que sur un chantier conventionnel, et la main d'œuvre étant plus taxée que les produits, ceci induit un surcoût qui pénalise le développement de la filière.

2.4 Objectifs principaux du projet

Sous l'impulsion de la DHUP du Ministère en charge de l'Écologie, les professionnels de la construction en terre se sont regroupés pour rédiger des guides de bonnes pratiques pour chacune des techniques de construction en terre. Ces guides faciliteront l'assurabilité des constructions et serviront de référence pour l'entretien du patrimoine et la formation des maîtres d'ouvrage. Cependant de nombreux freins comme l'assurabilité, les obligations réglementaires, le calcul des structures, l'image du matériau, la formation et le coût restent à traiter.

Dans la continuité du travail initié, ce projet a pour objectif de permettre le déploiement, à plus grande échelle, de la construction en terre crue. Ce développement passe, entre autres, par le développement d'outils permettant la validation des ouvrages d'un point de vue structurel et réglementaire en lien avec les assureurs, l'analyse des origines de l'image négative que renvoie ce matériau, la mise en place de formations et l'évaluation des coûts. Afin de répondre le plus largement possible aux besoins des filières, quelle que soit l'approche constructive utilisée (valorisation des terres excavées, de gisements spécifiques, transformation sur le site d'extraction ou sur chantier) et de s'adapter à la variabilité des terres, il est proposé d'adopter une démarche de validation performantielle des ouvrages. Cette démarche ne valide pas, a priori, un élément d'ouvrage en fonction du matériau employé, mais un élément d'ouvrage en fonction d'essais de chantier ou de laboratoire réalisés sur l'élément constructif fini et en fonction des contraintes réelles qui seront appliquées à l'élément d'ouvrage durant la vie du bâti.

3. Axes potentiels de recherche

Afin de lever les verrous identifiés pour la filière terre, les axes de recherche suivants sont proposés. Ces axes de recherche concernent l'ensemble des techniques constructives, à savoir, le Pisé, les BTC, la Bauge, les Adobes, le Torchis, la Terre Allégée et les Enduits.

3.1 Comportement mécanique et sismique

Les principales contraintes rencontrées sont les garanties demandées par les bureaux de contrôle et des difficultés à obtenir une garantie décennale pour certains. La principale réponse apportée actuellement est l'Atex qui est coûteux, propriétaire et valable pour une seule méthode de construction. Il y a donc un besoin en données validées permettant de faire un dimensionnement des éléments porteurs en terre qui soit reconnu par les assureurs et bureaux de contrôle. Le passage par l'intermédiaire du bureau d'études structure ne se justifiant pas pour tous les projets, les éléments doivent pouvoir être exploités par les maçons dans le cas de projets simples. Des abaques simples recouvrant les situations courantes indiqueront les performances nécessaires pour les matériaux. Lorsqu'il est fait appel à un bureau d'étude, dans la plupart des cas, une approche manuelle du comportement structurel peut être menée. Cependant, en complément, pour valider l'approche manuelle ou dans certains cas de figure à géométrie complexe ou sollicitations importantes, une modélisation numérique aux éléments-finis peut être souhaitée. Les avancées scientifiques du projet ANR « Terre Durable » (<http://www.agence-nationale-recherche.fr/Projet-ANR-11-VILD-0004>) et les résultats attendus du projet ANR « Vulnérabilité du bâti en terre vis-à-vis des conditions hydriques » contribuent au développement de loi de comportement prenant en compte la non saturation et la zone de l'air occlus ainsi que la sensibilité hydrique du matériau terre. Les outils à disposition de l'ingénieur sont nombreux et performants, cependant le caractère non linéaire des constructions en terre, ne travaillant qu'à la compression avec un comportement complexe (élasto-plastique, non-saturation, couplage hydro-mécanique, etc.) rend la modélisation plus délicate et le nombre d'outils pertinents plus restreints. Les différents outils existants doivent être comparés et confrontés à des

résultats d'essais réels, afin de proposer une sélection d'outils validés. En parallèle, une démarche d'étude validée, accompagnée d'un guide de modélisation, doit être mise au point.

Le comportement mécanique d'éprouvettes de terre est étudié par de nombreux laboratoires mais sans qu'il existe d'essais de référence permettant de comparer les résultats. Une réflexion internationale est en cours pour définir des protocoles de production d'éprouvettes et d'essais standard pour l'ensemble des techniques de construction en terre dans le cadre du comité technique de la RILEM (*Testing and characterisation of earth-based building materials and elements*). Le Projet National pourra s'inspirer des résultats de ces travaux pour proposer des protocoles d'essais adaptés à notre contexte national. Cependant, un travail important de changement d'échelle reste à réaliser pour permettre de déduire le comportement mécanique statique des murs d'un bâtiment à partir des résultats d'essais sur éprouvettes de laboratoire et ce pour les différents types de murs (maçonnerie et monolithiques). Ce point est identifié comme un enjeu fort du Projet National. Le développement d'essais de contrôle d'ouvrage, par indentation (marteau à rebond) par exemple, est également une piste intéressante à développer.

Un travail de compilation exhaustive, de synthèse et de vulgarisation de la recherche scientifique doit également être réalisé. Il semble opportun que ce travail soit effectué par des ingénieurs en bureaux d'étude, intermédiaire habituel entre approche scientifique et mise en œuvre sur le terrain, ayant une approche pragmatique et connaissant au mieux les rouages et réalités d'un projet de construction. Ce travail doit permettre d'identifier et lister les paramètres significatifs entrant en jeu dans le comportement du matériau dont il faut tenir compte lors des études et la mise en évidence des paramètres constants ou quasi-invariants de chaque technique de construction en terre crue. Pour les paramètres présentant une variabilité non négligeable, cette variabilité devra être caractérisée, par une étude bibliographique si possible, sinon par une campagne d'essais, en déterminant des valeurs enveloppes.

Les coefficients de sécurité employés dans les calculs de structures ont pour but principal de tenir compte des irrégularités et défauts de mise en œuvre. C'est la raison pour laquelle un processus de fabrication mieux contrôlé et maîtrisé permet de réduire la valeur du coefficient de sécurité appliqué sur le matériau (notion de niveau de contrôle d'exécution). En s'inspirant de l'Eurocode 6, il est envisagé de proposer 3 valeurs de coefficients de sécurité en fonction du niveau de contrôle d'exécution de l'ouvrage. La validation des coefficients retenus doit être débattue, chiffres et études à l'appui, et aboutir à un consensus, afin d'être reconnue par tous les acteurs de la construction.

La terre crue est un matériau hygroscopique et la teneur en eau des parois en terre peut donc varier en fonction des conditions du milieu. La résistance mécanique des murs est directement impactée par ces variations. Des études doivent être menées afin de connaître l'évolution de la résistance et de la raideur du matériau, en fonction de sa teneur en eau et définir une courbe ou formule « type » de montée en résistance avec le séchage naturel à l'air libre.

La mise en œuvre de murs en terre crue associe souvent d'autres matériaux comme le bois, la pierre voire le béton et le métal. Les conditions d'exposition à l'environnement (température, charge, humidité) peuvent induire des variations dimensionnelles et de transferts hydriques. Une étude des conditions d'emploi des différents matériaux associés à la terre crue est à réaliser.

La résistance des constructions en terre crue sous sollicitation sismique reste mal connue. Des travaux de recherche sont à envisager sur l'étude du comportement sous sollicitations horizontales cycliques. En fonction des résultats d'essais, un coefficient de comportement pour la terre crue pourra être proposé. À partir d'une série d'essais de caractérisation, ciblés et prédéfinis, une loi de comportement permettant la modélisation de bâtiments en terre crue au moyen d'une analyse modale spectrale tridimensionnelle, pouvant intégrer les différents matériaux entrant dans la fabrication du bâtiment, pourra être proposée.

Le matériau disposant d'une résistance mécanique limitée, les conceptions parasismiques traditionnelles ont été développées à travers le monde à l'aide d'éléments architecturaux permettant de renforcer la structure. L'étude et la modélisation de ces dispositifs est une piste d'amélioration des ouvrages en terre crue. Les différentes techniques de construction en terre crue sont rattachées à l'Eurocode 6 «Maçonneries» ainsi qu'aux dispositions constructives prévues pour les maçonneries dans l'Eurocode 8 «Parasismique». Les dispositions parasismiques généralement imposées aux maçonneries sont la mise en place d'un chaînage périphérique vertical et horizontal en béton-armé. Or, ce type de dispositions ne semble pas adapté aux ouvrages en terre crue. Des dispositions spécifiques à la terre crue doivent être imaginées, testées, validées et intégrées au corpus réglementaire.

3.2 Comportement hygrothermique

Le comportement thermique des murs en terre met en jeu des phénomènes couplés complexes (inertie, changement de phase de l'eau, apports solaires) difficiles à prendre en compte dans un calcul réglementaire et d'ingénierie. Les travaux de l'ANR Primaterre (<http://www.agence-nationale-recherche.fr/?Projet=ANR-12-VBDU-0001>) ont permis des avancées significatives dans la modélisation de ces phénomènes pour le pisé mais le déploiement de ce modèle à destination des bureaux d'études ainsi que son adaptation à d'autres techniques constructives n'ont pas encore été traités. Le problème de l'identification et de la mesure pour chantier des grandeurs requises pour alimenter un futur modèle ingénierie reste posé.

Le calcul réglementaire ne prend pas en considération la complexité du comportement des murs en terre crue. Une première action pourrait être une comparaison entre des mesures de consommations réelles et des calculs réglementaires sur un échantillon de logements suffisamment conséquent.

Afin d'améliorer le calcul réglementaire, il semble pertinent que des recherches soient menées afin d'actualiser les données des systèmes constructifs en terre, la valeur utilisée dans les calculs RT2012 semblant fortement préjudiciable. Par ailleurs, les systèmes constructifs en terre étant très divers, il semble pertinent de proposer non plus une unique valeur mais des valeurs multiples, selon le système et des fourchettes d'employabilité (comme pour le bois). A minima, pour le calcul thermique, il faudrait rassembler les valeurs de conductivité thermique, masse volumique, chaleur spécifique, absorptivité solaire et émissivité infrarouge, et, pour favoriser la connaissance du comportement hygrothermique, les valeurs de diffusion de vapeur d'eau et de porosité. Les systèmes constructifs en terre ne disposent d'aucun jeu de ponts thermiques par défaut dans le calcul réglementaire, ce qui constitue un frein pour le bureau d'études qui doit justifier de la performance thermique d'un bâtiment incluant des parois en terre sans isolant complémentaire.

Les logiciels de calculs thermiques conventionnels ne tiennent, à ce jour, pas compte des mouvements d'humidité dans les parois. Il ne nous apparaît pas spécialement pertinent d'aller vers une complexification des outils numériques pour vérifier la réglementation. En revanche, en fonction de recherches qui permettraient de quantifier la chaleur latente moyenne produite par le changement d'état de l'eau dans la paroi au cours de l'année, il pourrait être envisagé d'implémenter un facteur correctif dans le calcul réglementaire qui permettrait de corriger la surestimation de la déperdition de chaleur de la paroi et d'ajuster le coefficient de résistance surfacique actuellement identique pour tous les matériaux.

La question de l'isolation ou de la mise en place de correcteurs thermiques sur les murs en terre, notamment les murs orientés au nord, se pose. La mise en place d'isolants ou de pare-vapeurs peut perturber les migrations d'eau sous forme liquide ou vapeur et peuvent être source de pathologie. L'isolation peut également avoir un impact non négligeable sur les apports solaires et l'inertie des murs. Une étude sur ce sujet est à envisager.

Une approche alternative consiste à travailler sur le confort des occupants. L'isolation rapportée peut créer des accumulations d'eau et créer de l'inconfort thermique, donc produire l'effet inverse de celui désiré. L'inconfort entraîne des comportements non souhaitables mais inévitables. Un espace avec des caractéristiques trop humides, avec des courants d'air ou des effets de paroi froide pousse l'occupant à modifier son environnement et à agir sur les facteurs dont il dispose, à savoir, dans la majorité des cas, la température de l'air. Il est impératif, avant tout travail de dimensionnement, de définir ce qu'est le confort. Interviennent dans le confort des notions telles que l'inertie, l'effusivité, la conductivité, la température surfacique, la résistance thermique superficielle, la température de rayonnement des parois, le coefficient d'émissivité, la masse volumique, la capacité thermique. Ainsi, hiérarchiser ces notions et rechercher celles qui ont le plus d'effets leviers sur le confort en impliquant des spécialistes du ressenti s'avère nécessaire.

3.3 Résistance au feu

Les constructions en terre crue ne font pas appel aux couches superficielles de terre végétales ou polluées et sont donc purement minérales, inertes, imputrescibles et incombustibles. Le caractère incombustible de la terre crue permet de le classer M0 (A1 ou A2-s1-d0) et peut aisément être étayé par l'emploi de l'annexe 3 « classements conventionnels » de l'arrêté du 21/11/2002 concernant la réaction au feu des produits de construction et d'aménagement. Cependant, cet argumentaire n'est communément admis que pour des techniques de construction en terre n'employant pas de fibres végétales ou autres matériaux organiques : le classement M0 n'est admis que pour une teneur en matières organiques inférieur ou égal à 1%, en poids ou en volume (selon la valeur la plus faible). Par conséquent, des essais de détermination de la résistance au feu (essai feu) pour classer la réaction au feu des parements issus de

techniques constructives en terre crue amendée de fibres végétales, devraient être menés afin de valider le classement Mo pour toutes les parois contenant majoritairement de la terre

Bien qu'incombustible, la terre crue peut présenter une perte de résistance dans les conditions d'incendie, entre autres, par dessiccation du matériau et perte de l'eau liée aux argiles assurant la cohésion du matériau, avant transformation en terre cuite et remontée en résistance. De plus, la vaporisation de l'eau contenue dans le matériau peut créer des poches de vapeur sous pression que le matériau n'arriverait pas à évacuer assez rapidement et pourrait entraîner le délitement, le feuilletage et l'éclatement progressif des parements de terre crue. Ce dernier phénomène pourrait s'avérer préjudiciable dans le cas des jeunes structures en terre crue, occupées peu de temps après fabrication, n'ayant pas encore totalement séchées et présentant donc une teneur en eau plus importante que la normale. La tenue au feu des structures en terre crue doit être quantifiée et attestée par le biais d'essai feu.

3.4 Confort acoustique

Le comportement acoustique fait également partie des obligations réglementaires du secteur de la construction. A l'heure actuelle, très peu d'éléments permettent de les appréhender. Des études devront être menées sur ce sujet.

3.5 Redécouvrir et inventer une culture de la terre crue

La modernisation a souvent dénaturé les habitations dans leurs aspects positifs. Les enduits intérieurs ou isolation forte ont supprimé la régulation hygrométrique, le confort de l'inertie ou la faible effusivité des parois. En plus de cela, l'adjonction de matériaux industriels et l'utilisation de techniques modernes ont souvent déstabilisé les structures physiques. Ces méconnaissances du matériau terre dégradent fortement son image aux yeux du grand public ainsi que des professionnels non (in)formés.

Autre point indéniable de sa décrédibilisation quotidienne, la terre est masquée dans les bâtiments de qualité et bien entretenus. Elle n'est visible que dans les bâtiments en ruine. D'autre part, notre patrimoine en terre est essentiellement ancien (généralement plus de 70 ans, parfois 300) et participe à la notion de matériau obsolète. De plus, les conceptions ont été réalisées à une époque où la dimension des surfaces vitrées était un véritable frein à la conception. Ces habitats anciens sont alors synonymes de faible ensoleillement naturel.

Un travail transdisciplinaire impliquant des historiens, des archéologues, des sociologues, des ethnologues et des ergonomes est nécessaire afin d'identifier les racines de l'image de matériau pauvre, obsolète et peu fiable dont souffre la terre crue. Cette étude permettra d'identifier les mécanismes de construction de la culture terre crue et de construire un discours crédible mettant en valeur les points forts de ces techniques.

3.6 Formation

La mise en œuvre d'un matériau naturel comme la terre crue requiert un savoir-faire important. Dans ce contexte, la formation joue un rôle majeur pour assurer la qualité des ouvrages. Le Projet National réunira l'ensemble des professionnels du secteur et servira de lieu pour initier une réflexion sur les formations initiales et continues des acteurs de la construction ainsi que sur la vulgarisation des résultats de la recherche.

3.7 Évaluation des impacts environnemental, social et sanitaire

L'Analyse du Cycle de Vie est un des outils permettant d'évaluer l'impact environnemental des procédés constructifs en terre crue. La faible énergie grise consommée pour ces procédés étant un argument majeur du secteur, une évaluation de ces impacts est nécessaire. Une analyse de l'impact social, par analyse de l'intensité sociale par exemple, est également envisagée.

La qualité d'air intérieur est un sujet d'importance pour le secteur de la construction en terre. L'ANR Bioterra (<http://www.agence-nationale-recherche.fr/?Projet=ANR-13-VBDU-0005>), en cours, permettra d'apporter des réponses quant à l'impact de l'humidité relative de l'air et au développement fongique et microbien. Cependant, d'autres sujets d'importance restent peu étudiés comme le comportement des murs en présence de composés organiques volatils ou de radon et vis-à-vis des éléments traces métalliques naturellement présents dans les sols. Ces sujets peuvent faire l'objet d'une étude dans le cadre du Projet National.

3.8 Essais de contrôle sur chantier

La variabilité de la ressource peut entraîner des hétérogénéités de performance des éléments d'ouvrages en terre crue. Il est donc souvent exigé de mettre en place un contrôle qualité renforcé pour ce type de construction. L'objectif de cet axe de recherche est de proposer des protocoles de contrôle qualité pertinents et adapté au matériau terre crue.

4. Résultats attendus

L'atteinte de ces objectifs est dépendante des moyens dont disposera le projet. Toutefois, les attentes du secteur sont nombreuses. Les résultats attendus sont organisés en 5 thématiques :

- **Performances hydro-mécaniques** : définition d'essais de laboratoires normalisés pour la détermination de la résistance à la compression et de la rigidité des parois en terre en intégrant les effets de changements d'échelles entre éprouvette et mur ; définition de coefficients de sécurité adaptés pour la construction en terre ; développement d'une démarche d'étude pour la modélisation des éléments d'ouvrage en terre crue ; analyse bibliographique de la variabilité des paramètres significatifs entrant dans le comportement mécanique de la terre crue ; étude et modélisation de l'impact des variations de teneurs en eau des murs sur leur comportement mécanique ; étude de la compatibilité de la terre crue avec d'autres matériaux ; mesure de la contribution du torchis au contreventement d'une paroi ; étude du comportement sous sollicitations horizontales cycliques et définition de coefficients de sécurité ; établir une loi de comportement permettant la modélisation de bâtiments intégrant de la terre crue sous sollicitation sismique ; analyse des dispositifs architecturaux vernaculaires de renforcement parasismique afin de proposer des solutions de renforcement des structures anciennes et neuves.
- **Performance hygro-thermo-acoustique** : comparaison entre calcul réglementaire thermique et consommation réelle de bâtiments en terre et en conventionnel pour estimer les effets réglementaires de la non prise en compte des spécificités de la terre crue ; définition d'un jeu de données thermiques pour chacune des techniques de construction en terre permettant d'alimenter des modèles thermiques ; définition d'un facteur correctif permettant de prendre en compte les effets des changements de phase de l'eau dans le calcul réglementaire ; étude de l'impact de la mise en place d'isolant ou de pare-vapeur sur les transferts hydriques des parois en terre crue ; étude de la notion de confort dans les habitats en terre crue par le croisement d'une approche sensible et d'une approche physique afin d'identifier les critères de confort de ce type d'habitation ; étude du comportement au feu des parois en terre afin d'identifier les critères de risques (effet de la teneur en fibres, type de terre, teneur en eau) ; étude de la convenance des parois en terre vis-à-vis de la réglementation acoustique ; étude concernant l'impact de la qualité des terres sur la qualité de l'air intérieur.
- **Développement d'une culture de la terre crue** : Mise en place d'une démarche pluridisciplinaire permettant de redécouvrir et inventer une culture de la terre crue et construction d'un discours crédible autour de ces architectures.
- **Développement d'outils à destination des professionnels** : proposer un « carnet type » d'usage et d'entretien, à remettre au MOA, aux propriétaires et aux usagers, pour éviter la dégradation de l'ouvrage à terme par mauvais usage, entretien ou des aménagements incompatibles ; développement d'outils de vulgarisation scientifique à destination des professionnels de la terre crue ; développement d'un outil d'aide à la décision sur la convenance des terres ; développement d'un outil de mise en relation entre terrassiers et entreprises.
- **Étude des impacts de la construction en terre crue** : d'un point de vue économique, environnemental, sanitaire et social

- **Action de formation** : développement de formations initiales et continues ainsi que d'actions de sensibilisation à destination de l'ensemble des professionnels de la construction.

5. Références

- [1] P. Michel, F. Poudru, Le patrimoine construit en terre en France métropolitaine, in: Le Patrim. Eur. construit en terre sa réhabilitation, ENTPE, Vaulx en Velin (France), 1987: pp. 529-551.
- [2] L. Soudani, M. Woloszyn, A. Fabbri, J.-C. Morel, A.-C. Grillet, Energy evaluation of rammed earth walls using long term in-situ measurements, Sol. Energy. 141 (2017) 70-80. doi:10.1016/j.solener.2016.11.002.
- [3] U. Röhlen, C. Ziegert, Construire en terre crue - Construction - Rénovation - Finition, Le Moniteur, Paris, 2013.
- [4] L. Keefe, Earth Building - Methods and materials, repair and conservation, Taylor & Francis Group, Abingdon (UK), 2005.
- [5] K. Ghavami, Introduction to nonconventional materials and an historic retrospective of the field, in: K. Harries, S. Bhavna (Eds.), Nonconv. Vernac. Constr. Mater., Woodhead P, Elsevier, 2016: pp. 37-61. doi:10.1016/B978-0-08-100038-0.00002-0.
- [6] S.O. Ajayi, L.O. Oyedele, Policy imperatives for diverting construction waste from landfill: Experts' recommendations for UK policy expansion, J. Clean. Prod. 147 (2017) 57-65. doi:10.1016/j.jclepro.2017.01.075.
- [7] E. Hamard, B. Lemerrier, B. Cazacliu, A. Razakamanantsoa, J.-C. Morel, A new methodology to identify and quantify material resource at a large scale for earth construction - Application to cob in Brittany, Constr. Build. Mater. 170 (2018) 485-497. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.03.097.

6. Partenaires potentiels



ARPE Normandie



7. Charte du projet

§ Le projet concerne l'étude de la terre crue, c'est-à-dire d'un matériau naturel issu du sol ou du sous-sol, utilisé cru, pour la construction et la rénovation de bâtiments, et dont la cohésion est assurée majoritairement par la présence d'argiles.

§ Les partenaires s'engagent à favoriser les pratiques permettant de valoriser les savoir-faire de chantier et d'atelier ainsi que d'assurer un niveau de qualification élevé pour les professionnels de la terre crue.

§ Les procédés de construction étudiés dans le cadre de ce projet devront permettre une réduction significative des impacts environnementaux par rapport aux procédés conventionnels ainsi que la réversibilité du matériau.

§ Le projet se positionne dans une démarche d'obligation de résultat pour les éléments d'ouvrage. Les outils d'ingénierie développés dans le cadre de ce projet s'appuieront sur des essais réalisés sur des éléments d'ouvrage produits sur le site de fabrication afin d'en déterminer la performance.

§ Les matériaux et adjuvants utilisés dans le cadre des actions de recherches du projet devront être d'origine et de composition connues, libres d'utilisation sur le territoire national et ne pas nuire à la réversibilité du matériau.