

Programme C2D2

Convention de subvention n° 10 MGC S011

Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie

Coordination : Valérie Wathier

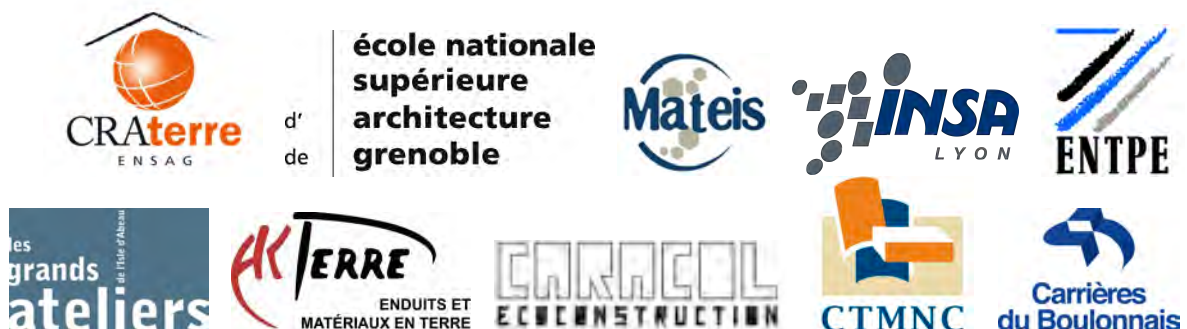


Projet :

Béton d'Argile Environnemental (B.A.E.)

RAPPORT FINAL

Novembre 2013



Résumé court

Le programme de recherche C2D2-Béton d'Argile Environnemental, subventionné par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, a rassemblé 8 partenaires pendant 3 ans autour de l'objectif de développer des bétons d'argile pour faciliter l'emploi de la terre dans la construction. Des chercheurs de 3 laboratoires (CRATERRE-ENSAG, MATEIS-INSA de Lyon, DGCB-ENTPE) ont travaillé en collaboration avec différents acteurs de la filière terre en France : des producteurs de matériaux (groupe CB, AKTERRE), des constructeurs (CARACOL), un centre technique (CTMNC), ainsi qu'avec les Grands Ateliers de Villefontaine, pôle d'enseignement, de recherche et d'expérimentation de la construction en France.

Le défi relevé dans ce projet a été de proposer des solutions innovantes pour transformer la terre crue, une matière première complexe et très variable, en véritables bétons d'argile environnementaux dont la mise en œuvre et les propriétés finales sont maîtrisées.

Pour commencer, un état de l'art des caractéristiques de la terre crue utilisée dans la construction a été réalisé à partir de données issues de la littérature scientifique. Ce travail sera publié à destination des concepteurs et leur donnera les éléments nécessaires au dimensionnement mécanique et énergétique des ouvrages en terre.

Les recherches en laboratoire ont porté sur le transfert des technologies du béton de ciment et des céramiques industrielles vers les bétons d'argile, avec notamment la maîtrise de la granulométrie, l'utilisation de dispersants et superplastifiants et les techniques de coagulation pour durcir le matériau et permettre un décoffrage rapide. Des avancées intéressantes, en cours de publication, ont été réalisées, notamment dans la compréhension de l'impact de dispersants sur la microstructure du matériau et ses propriétés finales.

Un autre axe de recherche a été celui de l'association d'un liant argileux avec des fibres végétales de chènevotte pour développer des matériaux à hautes performances hygrothermiques. Des essais réalisés sur des murs en pisé et en béton d'argile fibré ont permis de démontrer et mesurer l'importance des changements de phase de l'eau dans le comportement hygrothermique de ces matériaux. Ces résultats feront également l'objet d'une publication scientifique.

Pour les acteurs de la filière terre, l'objectif était de concrétiser les innovations proposées pour commercialiser de nouveaux produits et les mettre en œuvre sur des chantiers. Un béton d'argile fluide a été formulé à partir des fines argilo-calcaires issues du lavage des granulats ; une ressource abondante jusqu'à présent inutilisée. Ce nouveau béton d'argile environnemental a été mis en œuvre en octobre 2013 sur le chantier de la Maison des Marais à St Omer (Pas-de-Calais): 60m³ de béton d'argile ont été produits en centrale à béton, transportés en camion toupie, déversés dans des coffrages et vibrés, de la même manière qu'un béton de ciment. C'est une première en France, pour un béton à base de terre. Une ATE_x de type B a été obtenue auprès du CSTB pour valider la réalisation de murs porteurs avec ce même produit sur le chantier de la Maison intergénérationnelle de Manom (Moselle).

De nouveaux produits en béton d'argile allégé à base de fines argilo-calcaires et de chènevotte ont été proposés : des briques isolantes et des panneaux vissables que l'on peut couler et démouler aussitôt, sans stabilisant. Les produits obtenus sont très prometteurs. Ils pourront être produits industriellement et commercialisés.

Short summary

The C2D2- Environmental-Clay-based Concrete research program, funded by the Ministry of Ecology, Sustainable Development and Energy, brought together eight partners for 3 years around the goal of developing clay-based concretes in order to facilitate the use of earth for construction. Researchers from three laboratories (CRATERRE-ENSAG, MATEIS-INSA Lyon, DGCB-ENTPE) worked in collaboration with various players from the earth sector in France: material producers (CB group, AKTERRE), manufacturers (CARACOL), a technical center (CTMNC), as well as Grands Ateliers from Villefontaine which is an education, research and experimental construction center in France.

The challenge of this project was to propose innovative solutions to transform raw earth, a complex and highly variable raw material, in genuine environmental clay-based concretes whose implementation and final properties are controlled.

First, a state of the art of the characteristics of the raw earth used in construction was carried out using data from scientific literature. This work will be published for designers and will give them the necessary information for the mechanical and energy efficiency dimensioning of earthworks.

Laboratory research has focused on cement concrete and industrial ceramics technology transfer towards a clay-based concrete. In particular, the control of the granulometry, the use of dispersants and superplasticizers as well as coagulation techniques to harden the material and enable a rapid removal of the formwork. Exciting developments have been made which are in the process of being published. These include the understanding of the impact of dispersants on the microstructure of the material and its final properties.

Another line of research was that of the combination of a clay binder with hemp vegetable fibers in order to develop materials with high hygrothermal performance. Tests on rammed earth walls and fiber-clay-based concrete helped to demonstrate and measure the importance of phase changes of water in the hygrothermal behavior of these materials. These results will also be the subject of a scientific publication.

For the players of the earth sector, the goal was to achieve the proposed innovations in order to commercialize the new products and implement them on construction sites. A fluid clay-based concrete was formulated from argilo-calcareous fines derived from aggregate washing ; an abundant resource so far unused. This new environmental clay-based concrete was implemented in October 2013 on the site of the museum "Maison des Marais" in St Omer (Pas-de-Calais) : 60m³ clay-based concrete were produced in a batching plant, transported in a mixer truck, poured into molds and vibrated in the same way as cement concrete. This is a first experience in France for an earth based concrete. An ATEX type B has been obtained upon the CSTB to validate the implementation of load-bearing walls with the same product at the "Maison Intergénérationnelle" site in Manom (Moselle).

New lightened clay-based concrete products made out of argilo-calcareous fines and hemp have been proposed: insulating bricks and screwable panels that can be cast and unmold immediately without stabilizer. The obtained products are very promising. They can be industrially produced and marketed.

Projet C2D2 BAE
« Béton d'argile environnemental »
Compte-rendu synthétique des rapports d'expertise

Le projet BAE ambitionnait de développer des solutions innovantes pour la transformation du matériau terre crue en un « béton d'argile », matériau constitué exclusivement de grains (*e.g.* sables, graviers) et de liants (*e.g.* argile) naturels, dont la mise en œuvre sur chantier et les propriétés hygrothermo-mécaniques finales soient maîtrisées.

Les objectifs plus spécifiquement visés au travers du projet étaient au nombre de six :

- 1) établir un état de l'art et une synthèse des caractéristiques mécaniques, thermiques et hygrométriques du matériau terre en vue de l'élaboration de règles professionnelles ;
- 2) étudier l'influence de la densité, de l'organisation spatiale du réseau poreux et de l'humidité relative sur les caractéristiques mécaniques et thermiques ;
- 3) transférer les technologies du béton de ciment et des céramiques industrielles vers les bétons d'argile (*e.g.* maîtrise de la granulométrie, utilisation de dispersants et de superplastifiants, développement de techniques de coagulation pour un durcissement et un démoulage rapides du matériau)
- 4) formuler de nouveaux composites argiles / biopolymères aux propriétés mécaniques améliorées ;
- 5) évaluer l'intérêt de l'ajout de particules végétales poreuses pour optimiser les performances thermiques de la terre ;
- 6) valoriser les coproduits de carrières de granulats en les transformant en matériaux de construction terre innovants.

Observations générales

- Le niveau d'atteinte des six objectifs initiaux est globalement satisfaisant, compte tenu des restrictions financières imposées aux partenaires.
- L'un des grands mérites du projet est d'avoir suscité des avancées très significatives dans le cadre d'un partenariat étroit entre laboratoires et entreprises.
- Il serait sans doute exagéré de dire que les travaux ont révolutionné la construction en terre crue. Néanmoins, il n'est pas exagéré de dire qu'ils l'ont placée dans une perspective totalement nouvelle. Mise en œuvre avec les adjuvants chimiques (fluidifiants), les ajouts (fines argilo-calcaires), et les outils (centrales, camions toupies, pompes, vibreurs...) adéquats, la terre est désormais un béton « comme les autres », pourrait-on dire. Les différentes étapes de formulation et de mise en œuvre proposées pour la fabrication d'un tel matériau constituent une première base de savoirs et savoir-faire tangible pour le développement de produits industriels novateurs. D'autre part, on peut désormais considérer comme acquis le fait que la terre fibrée, comme les bétons chaux-chanvre et probablement encore d'autres « écomatériaux », soit le siège d'échanges hydriques nous invitant à revoir notre manière de penser le confort thermique.

- Des résultats majeurs ont ainsi été obtenus en fin de projet à l'aide des murs-éprouvettes, qui montrent que la terre se comporte partiellement comme un matériau à changement de phase, grâce à sa porosité ouverte permettant des échanges hydriques et des changements de phase vapeur-liquide confinés. En d'autres termes, malgré une conductivité thermique médiocre, la terre possède un pouvoir d'amortissement des fluctuations thermiques extérieures nettement supérieur à ce que prévoit une modélisation ne prenant pas ces changements de phase en compte. Les conséquences de ce résultat sur la (non)pertinence des normes actuelles en matière d'isolation thermique pour un certain nombre de matériaux naturels déborderont largement du cadre temporel du projet.
- Des progrès notables ont aussi été réalisés en fin de projet sur la valorisation des fines argilo-calcaires (coproduits des carrières de granulats) dans le cadre de chantiers écoles mettant en pratique le concept de « béton de terre » grâce aux acquis scientifiques du projet. Des produits composites commercialisables – et, on peut l'espérer, commercialisés – ont été élaborés. L'investissement fort des entreprises partenaires est à saluer.
- L'ensemble des travaux entrepris a fait l'objet de publications présentées dans des congrès nationaux et internationaux. Une publication de rang A est par ailleurs en cours de rédaction.
- L'auto-évaluation conduite par les partenaires du projet et rattachée à la « synthèse à destination des responsables des politiques publiques » est particulièrement appréciable. En outre, la traduction qui est faite du rapport scientifique en anglais mérite d'être saluée ; elle devrait assurer une dissémination des résultats du projet au-delà du périmètre national.
- Le rapport scientifique gagnerait à inclure une conclusion générale synthétisant les principales contributions des travaux à l'état des savoirs et savoir-faire relatifs aux bétons en terre crue.

Remarques particulières

Sur l'atteinte de l'objectif 1

- Les remarques formulées à mi-parcours sur ce volet restent valables. La publication et la dissémination de la synthèse réalisée sont nécessaires si l'on veut que cette dernière soit utile.

Sur l'atteinte de l'objectif 3

- Peu de progrès supplémentaires sont à relever concernant la fluidification. L'utilisation de tannins, dispersants naturels – envisagée dans le programme – ne repose pas encore sur des bases suffisamment solides pour être mise en pratique. Il n'en reste pas moins que, grâce aux résultats acquis à mi-parcours, l'utilisation de fluidifiants industriels du type PAA ou HMP fait désormais partie de la boîte à outils du constructeur en terre crue. Les résultats acquis montrent que cette utilisation est robuste dans la mesure où l'effet fluidifiant est peu sensible au type de terre. C'est donc un progrès décisif pour la validation du concept de « béton de terre ».
- Le travail sur la coagulation a été arrêté faute de moyens suffisants, hélas...!

Sur l'atteinte de l'objectif 4

- Les remarques formulées à mi-parcours sur ce volet restent valables.

Sur l'atteinte de l'objectif 5

- Comme attendu et dans la continuité des résultats obtenus dans le cadre de l'objectif 2, l'introduction de chènevotte dans la terre améliore ses propriétés thermiques, non seulement en diminuant sa conductivité thermique mais aussi en renforçant son caractère de matériau à changement de phase et en renforçant son pouvoir de régulation hydrique. Sans pouvoir encore être réellement considérés comme de bons isolants, ces composites possèdent des propriétés qui s'en approchent. Un résultat non négligeable de l'étude est la mise au point de protocoles de préparation adaptés au type de terre.
- La modélisation du comportement thermo-hydrique de ces matériaux reste à faire.

Projet C2D2 BAE
« Béton d'argile environnemental »
Réponses apportées par les porteurs du projet aux observations des relecteurs

Pour chaque observation listée ci-après, précisez la réponse apportée par les partenaires du projet et, le cas échéant, les corrections opérées dans le rapport.

Observations générales

§ Le rapport scientifique gagnerait à inclure une conclusion générale synthétisant les principales contributions des travaux à l'état des savoirs et savoir-faire relatifs aux bétons en terre crue.

Une conclusion a été ajoutée dans cette dernière version du rapport scientifique.

Remarques particulières

Sur l'atteinte de l'objectif 1

§ Les remarques formulées à mi-parcours sur ce volet restent valables. La publication et la dissémination de la synthèse réalisée sont nécessaires si l'on veut que cette dernière soit utile.

Une publication des résultats du projet BAE est prévue d'ici la fin de l'année 2015 sous la forme d'un document vulgarisé, à destination des acteurs de la filière terre crue. Ce document inclut un chapitre sur les caractéristiques de la terre crue, qui est une synthèse de l'état de l'art réalisé. Il sera disponible en ligne et diffusé sous forme de livret.

En outre, l'état de l'art est accessible dans sa version complète sur le site Internet de CRAterre, comme première annexe du rapport du projet BAE. Les lecteurs du document vulgarisé qui souhaitent avoir plus de détails auront le lien, dans ce document, vers le rapport complet.

Sur l'atteinte de l'objectif 3

§ Peu de progrès supplémentaires sont à relever concernant la fluidification. L'utilisation de tannins, dispersants naturels – envisagée dans le programme – ne repose pas encore sur des bases suffisamment solides pour être mise en pratique. Il n'en reste pas moins que, grâce aux résultats acquis à mi-parcours, l'utilisation de fluidifiants industriels du type PAA ou HMP fait désormais partie de la boîte à outils du constructeur en terre crue. Les résultats acquis montrent que cette utilisation est robuste dans la mesure où l'effet fluidifiant est peu sensible au type de terre. C'est donc un progrès décisif pour la validation du concept de « béton de terre ».

Les recherches menées sur ce thème ont permis également de comprendre en quoi la fluidification permet d'optimiser la résistance du matériau, sur la base d'une analyse de la microstructure. Ces résultats font l'objet d'une publication scientifique :

M. Moevus, Y. Jorand, C. Olagnon, S. Maximilien, R. Anger, L. Fontaine, L. Arnaud. « Earthen construction: an increase of the mechanical strength by optimizing the dispersion of the binder phase ». *Materials and Structures*, 2015.

L'utilisation de fluidifiants dans le matériau terre permet d'envisager de nouveaux moyens de mise en oeuvre de la terre crue, plus modernes et mieux adaptés au contexte socio-économique actuel. Plusieurs chantiers ont été réalisés pendant le projet puis par la suite, dans lesquels des fluidifiants ont été utilisés pour mettre en oeuvre la terre coulée avec les outils utilisés classiquement pour le béton de ciment.

Sur l'atteinte de l'objectif 4

§ Les remarques formulées à mi-parcours sur ce volet restent valables :

L'addition à la terre de substances organiques naturelles est une pratique courante dans de nombreuses cultures constructives. L'idée développée dans le projet BAE est de mettre cette approche sur une base scientifique proche du développement récent (1990) des nanocomposites argile/polymère. Au stade actuel (mais il semble que l'étude n'ira pas plus loin), les résultats sont assez décevants dans la mesure où, avec les composés utilisés (des polysaccharides de la famille des galactomannanes, la caroube et la gomme de guar), on observe une baisse de la résistance en compression. L'effet est attribué à une baisse de la densité du matériau sec, consécutive à l'augmentation de consistance du matériau frais. Indépendamment du résultat final, l'étude est bien menée, avec une analyse fine des étapes depuis la mise en solution du polymère jusqu'aux propriétés finales en passant par la rhéologie de l'état frais.

De manière générale, on peut émettre des doutes sur la pertinence du concept de nano- ou micro-composite argile/polymère dans la terre, sans adaptation du procédé d'élaboration et de mise en forme.

Effectivement, le procédé d'élaboration choisi ne permet pas d'optimiser les interactions entre les argiles et les galactomannanes. Il est possible qu'en travaillant à teneur en eau fixe, de meilleures propriétés mécaniques puissent être obtenues grâce à ces biopolymères. Le choix des biopolymères est également à questionner : un biopolymère de masse molaire plus faible donnerait-il de meilleurs résultats ? Il existe sans doute une configuration idéale où les chaînes de polymère sont suffisamment courtes pour ne pas trop augmenter la demande en eau, mais suffisamment longues pour ponter les argiles entre elles et amener une cohésion.

Ce thème de recherche mériterait d'être traité de manière plus approfondie en mettant en relation les propriétés macroscopiques mesurées avec une analyse fine de la microstructure et des mécanismes physico-chimiques à l'oeuvre.

Sur l'atteinte de l'objectif 5

§ Comme attendu et dans la continuité des résultats obtenus dans le cadre de l'objectif 2, l'introduction de chènevotte dans la terre améliore ses propriétés thermiques, non seulement en diminuant sa conductivité thermique mais aussi en renforçant son caractère de matériau à changement de phase et en renforçant son pouvoir de régulation hydrique. Sans pouvoir encore être réellement considérés comme de bons isolants, ces composites possèdent des propriétés qui s'en approchent. Un résultat non négligeable de l'étude est la mise au point de protocoles de préparation adaptés au type de terre.

§ La modélisation du comportement thermo-hydrique de ces matériaux reste à faire.

Le partenaire du projet qui avait en charge l'analyse de ces résultats expérimentaux a changé de poste en cours de projet. Il n'a pas pu être remplacé, et les modélisations prévues n'ont pas pu être faites par manque de compétences disponibles. Les résultats expérimentaux bruts peuvent être mis à disposition de chercheurs qui souhaiteraient les exploiter. Nous sommes preneurs de toute proposition qui nous permettrait de valoriser ce travail.

SOMMAIRE

Synthèse à destination des responsables des politiques publiques

Rapport scientifique (FR)

Scientific report (EN)

ANNEXES :

- Livrable 1 – Etat de l'art des caractéristiques de la terre crue
- Livrable 2+3 – Caractérisations hygrométriques, mécaniques et thermiques des matériaux types
- Livrable 4 – Formulation et performances mécaniques et thermiques de composites terre – chanvre
- Livrable 5 – Couler la terre à l'aide de dispersants naturels
- Livrable 6 – Techniques de coagulation pour la construction en terre
- Livrable 7 – Elaboration de nouveaux liants argile / biopolymères
- Livrable 8 – Valorisation des fines argilo-calcaires
- Livrable 9 – Bétons d'argile : expérimentations et chantiers pilotes
- Caractérisations des matières premières et analyses (CTMNC)
- Expérimentations à l'échelle 1 (Grands Ateliers)
- Caractérisation mécanique de la terre (INSA)
- Rapport d'activités menées à MATEIS (INSA)
- Bibliographie de la thèse de Romain Anger
- Analyse des essais hygrothermiques (INSA-ENTPE)
- Mélanges AC0100-chênevotte (ENTPE-groupe CB-INSA)
- Rapport de stage de Joris Neysenssas (CARACOL)
- Rapport de stage de Lucile Couvreur (CARACOL)
- Fabrication d'un BAE en centrale pour le chantier pilote de St Omer (groupe CB)
- article pour la journée "Ecomatériaux pour la construction" (juin 2011)
- article 1 pour la conférence CIB-W107 (Hanoï, nov. 2011)
- article 2 pour la conférence CIB-W107 (Hanoï, nov. 2011)
- article 1 pour la conférence TERRA 2012 (Lima, avril 2012)
- article 2 pour la conférence TERRA 2012 (Lima, avril 2012)
- article pour les rencontres de l'AUGC à Cachan
- article publié dans *Materials and Structures*

Programme C2D2

Convention de subvention n° 10 MGC S011

Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie

Coordination : Valérie Wathier



Projet : Béton d'Argile Environnemental (B.A.E.)

Synthèse à destination des responsables des politiques publiques

Novembre 2013

Coordination : Mariette Moevus / Laetitia Fontaine /
Romain Anger / Patrice Doat – CRAterre-ENSAG



Le projet de recherche Béton d'Argile Environnemental (BAE) a été financé par le Ministère de l'Écologie, du Développement durable, et de l'Énergie dans le cadre du programme incitatif C2D2 (Concevoir et Construire pour le Développement Durable).

Ce projet, initié en décembre 2010, se termine en décembre 2013. Il a rassemblé 8 partenaires de recherche et industriels :

- le laboratoire CRATERRE de l'ENSAG (responsable scientifique)
- le laboratoire MATEIS de l'INSA de Lyon
- le département DGCB de l'ENTPE
- les Grands Ateliers (Villefontaine)
- le Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction (CTMNC)
- l'entreprise Carrières du Boulonnais
- l'entreprise AKTERRE (producteur de matériaux de construction)
- l'entreprise CARACOL (constructeur en terre crue)

Le présent document correspond à la synthèse finale à destination des responsables des politiques publiques.

PROBLÉMATIQUE	4
OBJECTIFS	4
PRINCIPAUX RÉSULTATS	5
GROUPE DE TRAVAIL 1 - CARACTÉRISTIQUES THERMIQUES ET MÉCANIQUES DE LA TERRE CRUE	5
GROUPE DE TRAVAIL 2 - INNOVATION	5
GROUPE DE TRAVAIL 3 ET 4 - VALORISATION DE CO-PRODUITS DE CARRIÈRES / TRANSFERT DE TECHNOLOGIE	6
VALORISATION	7
CONSÉQUENCES ET APPLICATIONS CONCRÈTES	7
COMMUNICATION DES RÉSULTATS	8
BILAN ET PROPOSITIONS	9
LA DEMANDE SOCIALE À L'ORIGINE DU PROJET	9
BILAN COLLECTIF	10
<i>Un programme ambitieux pour des moyens revus à la baisse</i>	10
<i>Collaboration entre les acteurs du projet</i>	10
<i>Capitalisation de données scientifiques</i>	10
<i>Production scientifique et publications</i>	10
<i>Nouveaux produits / nouvelles techniques</i>	11
PROPOSITIONS	11
<i>Un consortium d'acteurs pour le développement des bétons d'argile environnementaux</i>	11
<i>Des collaborations plus ciblées</i>	11
<i>Une recherche à inscrire dans la durée</i>	11

Problématique

La terre est un matériau à changement de phase naturel, localement disponible, à faible énergie grise et recyclable. Ces qualités en font un matériau de construction d'avenir. La physique et la mécanique de la matière divisée (et ultra divisée) sont des domaines en plein essor. L'éclosion des nanosciences offre un nouvel éclairage sur les comportements mécaniques, thermiques, hygrométriques et rhéologiques du matériau terre, en particulier aux échelles physico-chimiques les plus fines des argiles.

A cet apport de connaissances théoriques s'ajoute un savoir-faire industriel très élaboré pour la mise en oeuvre de matériaux offrant de nombreux points communs avec la terre, véritable béton d'argile. Ainsi, les méthodes appliquées à la confection de bétons de ciment toujours plus performants d'une part et celles appliquées au coulage des crus des céramiques industrielles d'autre part sont transférables au matériau terre.

D'autre part, le marché spécialisé de la construction en terre s'organise et se développe rapidement. A cela s'ajoute une demande sociétale toujours plus forte qui conduit par exemple les industriels de la brique cuite à proposer des briques crues. Les carrières de granulats souhaitent quant à elles valoriser leurs importants volumes de coproduits de carrières (fines argilo-calcaires). Les conditions sont donc réunies pour mettre en place à l'échelle nationale, à l'instar de la filière bois, une filière terre qui s'appuie sur des bases scientifiques et techniques approfondies.

L'enjeu scientifique réside notamment dans une meilleure compréhension des propriétés mécaniques et thermiques du matériau terre en liaison avec son comportement hygrométrique d'une part et une meilleure connaissance des systèmes argile/eau en vue du coulage du matériau terre à l'état liquide d'autre part. Il réside également dans une meilleure compréhension de la cohésion du matériau et de l'amélioration de cette cohésion par ajout de polymères : les nanocomposites argile/polymère sont, de ce point de vue, exemplaires.

Dans ce contexte, le programme de recherche C2D2-Béton d'Argile Environnemental a pour objectif de développer des bétons d'argile pour faciliter l'emploi de la terre dans la construction. Le projet a rassemblé des chercheurs de 3 laboratoires (CRATERRE-ENSAG, MATEIS-INSA de Lyon, DGCB-ENTPE), et différents acteurs de la filière terre en France, avec des producteurs de matériaux (groupe CB, AKTERRE), des constructeurs (CARACOL) et un centre technique (CTMNC). La plateforme des Grands Ateliers de Villefontaine a permis de faciliter le transfert des nouveaux matériaux développés et de leurs procédés de mise en oeuvre vers le terrain, grâce à des expérimentations à l'échelle 1.

Objectifs

Les bétons d'argile, à l'instar des bétons de ciment, sont des matériaux constitués d'un liant (ici, l'argile) et de grains (sables, graviers,...). La principale matière première utilisée pour formuler ces bétons d'argile est la terre crue, qui contient déjà par nature un liant argileux plus ou moins cohésif, et des grains de différentes tailles et en proportions variables. Le défi relevé dans ce projet a été de proposer des solutions innovantes pour transformer cette matière première complexe et variable en véritables bétons d'argile dont la mise en oeuvre et les propriétés finales sont maîtrisées : des bétons fluides et décoffrables après coulage dans des banches ; des bétons terre-chanvre à hautes performances hygro-thermiques ; des enduits, mortiers ou bétons d'argile-biopolymères aux propriétés mécaniques et hydriques maîtrisées.

Les recherches en laboratoire ont porté sur le transfert des technologies du béton de ciment et des céramiques industrielles vers les bétons d'argile, avec notamment la maîtrise de la granulométrie, l'utilisation de dispersants et superplastifiants, les techniques de coagulation utilisées dans le domaine des céramiques pour durcir le matériau et permettre un démoulage rapide. Un autre axe de recherche a été celui de l'association d'un liant argileux avec des fibres végétales de chènevotte. Les bétons terre-chanvre obtenus couvrent une large gamme de comportements hygro-thermiques.

Pour les partenaires acteurs de la filière terre, l'objectif était de concrétiser les innovations proposées pour commercialiser de nouveaux produits et les mettre en oeuvre sur des chantiers. Les Carrières du Boulonnais avaient également l'objectif de valoriser 8 000 000 de tonnes de fines argilo-calcaires (FAC) issues du lavage des granulats en carrière et jusqu'à présent inutilisées.

Le rôle des Grands Ateliers a été de faciliter le transfert entre les partenaires, en leur donnant la possibilité d'expérimenter à l'échelle du chantier les dernières innovations, pour confronter les avancées faites en laboratoire à la réalité de la mise en oeuvre sur le terrain.

Principaux résultats

Ce projet était ambitieux dans sa forme autant que dans le fond : faire travailler ensemble des partenaires aux compétences et centres d'intérêt très divers, attendre des laboratoires des avancées significatives sur plusieurs axes de recherche différents, transférer les innovations prometteuses à l'échelle du chantier, mettre au point des produits commercialisables, et tout cela en 3 ans avec des moyens limités... le pari était de taille. Bien que tous les objectifs n'aient pas été atteints, des résultats significatifs ont été obtenus, ouvrant la voie à de futurs travaux de recherche et développement.

Groupe de travail 1 – Caractéristiques thermiques et mécaniques de la terre crue

La première tâche effectuée dans le projet est un **état de l'art des caractéristiques de la terre crue dans la construction**, réalisé à partir de données issues de la littérature scientifique. Ce travail sera publié à destination des concepteurs, et leur donnera les éléments nécessaires au dimensionnement des ouvrages en terre, à la fois d'un point de vue mécanique et énergétique. Il est déjà utilisé par les groupes de rédaction de règles professionnelles au sein de la filière terre crue.

L'influence de la teneur en eau sur les performances mécaniques de la terre crue a été caractérisée par des essais de résistance à la compression sur des éprouvettes en pisé. La résistance à la rupture augmente depuis l'état humide (juste après la mise en oeuvre) jusqu'à l'état sec (après traitement à 105°C), en raison d'une teneur en eau de plus en plus faible et des forces capillaires de plus en plus fortes qui contribuent à la cohésion du matériau. Aux forces capillaires s'ajoutent les forces de frottement entre les grains, sensibles également à la teneur en eau, et vraisemblablement une cristallisation des sels dissous.

Des essais hygrothermiques réalisés sur d'un muret en pisé, représentatif du pisé traditionnel de la région dauphinoise, ont permis de mettre en évidence **l'importance capitale des changements de phase dans le comportement hygrothermique de la terre crue et des bétons d'argile, alors que les calculs réglementaires actuels l'ignorent et considèrent ces effets négligeables**. Le comportement hygrothermique d'un muret à l'échelle 1 en pisé a été caractérisé dans un dispositif à double enceinte. Un écart important est mis en évidence entre les résultats expérimentaux et une simulation simple négligeant le caractère hygroscopique du matériau. Cet écart est attribuable aux changements de phase de l'eau contenue dans la terre.

Groupe de travail 2 – Innovation

La tâche 4, intitulée « **élaboration de nouveaux matériaux composites terre / fibres végétales** », a permis de déterminer précisément le mode d'élaboration des éprouvettes ainsi que les formulations terre / chènevotte types en fonction des terres types. Le suivi des teneurs en eau pendant le séchage et les isothermes de sorption ont été effectués. Les propriétés mécaniques et thermiques ont été caractérisées en fonction de différents dosages en terre et chanvre et pour différents types de mise en oeuvre. L'influence de l'hygrométrie sur les caractéristiques mécaniques et thermiques des mélanges a été étudié grâce à une caractérisation de la sensibilité des matières premières à l'humidité relative. Des essais hygrothermiques ont été menés sur des murs-éprouvettes dans une double-enceinte, ce qui a permis de simuler le comportement de murs soumis à des variations de conditions climatiques (température et humidité) extérieures. Ces essais ont permis de mettre en évidence le rôle primordial des changements de phase de l'eau au sein de la terre crue (pisé) et des composites terre / chènevotte : cela confère aux murs un comportement qui approche celui d'un mur isolant, alors que les conductivités thermiques de ces matériaux sont bien supérieures à celles de matériaux isolants.

La tâche 5, intitulée « **dispersion et coagulation des boues d'argile** », a permis d'établir dans un premier temps **une bibliographie détaillée relative au comportement viscoélastique et rhéologique des systèmes argile/eau**. Dans un deuxième temps, l'influence du pH sur la viscosité de matériaux types a été étudié en détail, et l'effet de plusieurs dispersants des argiles sur la viscosité d'une boue de terre naturelle (dispersant et dosage optimal) a été comparé. **Quel que soit le dispersant industriel utilisé, les réductions de viscosité obtenues sont importantes. Une**

conséquence pratique de la dispersion des argiles est l'augmentation d'un facteur compris entre 1,5 et 2 des résistances mécaniques en compression. Des recherches ont commencé sur l'utilisation des tanins comme dispersants des argiles. Ces molécules ne sont pas encore suffisamment maîtrisées pour permettre un transfert de leur utilisation dans la construction.

La problématique de la coagulation, ou transition liquide-solide, a été abordée sous le seul aspect de la gélification physique, i.e. variation du pH et de la force ionique. Les variations de viscosité et surtout de seuil d'écoulement restent modestes. L'objectif de produits débanchables sur quelques jours semble donc peu réaliste en utilisant cette méthode seule. Ce constat est renforcé par la très grande variabilité des matières premières. La voie de la polymérisation / réticulation in situ d'une boue d'argile dispersée prévue initialement dans le projet n'a pas pu être explorée par manque de moyens financiers et humains. Elle fait l'objet d'un doctorat financé par ailleurs qui a débuté en novembre 2013.

La tâche 6, intitulée « **élaboration de nouveaux liants argiles / biopolymères** », a permis d'établir les conclusions suivantes. L'étude rhéologique s'est révélée très utile pour préparer la mise au point de protocoles d'élaboration de composites. La caroube et la gomme de guar diminuent la fluidité des suspensions. Cette diminution est quasiment proportionnelle à la quantité de biopolymère. Cela se traduit par une augmentation de la demande en eau pour la mise en oeuvre de composites à consistance fixe. Les dispersants sont compatibles avec la caroube dans la mesure où ils conservent leur efficacité en présence du biopolymère ; ils n'annulent pas non plus l'effet gélifiant de la caroube. Les caractérisations des différents composites élaborés montrent que la densité sèche est un paramètre déterminant pour les propriétés mécaniques, et qu'elle dépend principalement de la demande en eau des mélanges à la mise en oeuvre. Comme il a été montré précédemment que les biopolymères étudiés (caroube, gomme de guar) font augmenter la demande en eau lors de la mise en oeuvre, ils conduisent logiquement à une diminution de la densité finale des composites, ce qui est préjudiciable pour les propriétés mécaniques.

Groupes de travail 3 et 4 – Valorisation de co-produits de carrières / Transfert de technologie

Plusieurs bétons d'argiles ont été formulés dans le cadre de ce projet pour différentes applications : murs porteurs, dalles non porteuses, briques allégées, panneaux, etc.

Le produit phare du projet est un **béton d'argile formulé à partir des fines argilo-calcaires** des Carrières des Boulonnais, qui a donné lieu à la réalisation d'un chantier pilote représentant un volume de 60m³ de matériau. Ce béton a une consistance à la mise en oeuvre similaire à celle d'un béton de ciment, ce qui lui permet de passer en centrale à béton, d'être transporté en camion toupie et déversé dans des banches grâce à une pompe de levage. **Le matériau est donc fluide, aisé à mettre en oeuvre avec des moyens courants et bien maîtrisés, et ne fissure pas au séchage.** C'est une première en France, pour un béton à base de terre. Les clés : une granulométrie optimisée, un dispersant adapté et bien dosé, et un faible pourcentage de ciment pour permettre le décoffrage. **Si les principes de formulation des bétons de ciment ont été appliqués avec succès** pour atteindre une consistance cible maîtrisée, les pistes envisagées pour durcir le matériau par coagulation ne sont pas assez mûres pour être transférées à l'échelle du chantier, ce qui justifie l'utilisation d'un faible pourcentage de ciment (3%) pour permettre un décoffrage rapide.

Ce béton d'argile a été mis en oeuvre au mois d'octobre 2013 sur le chantier pilote de la Maison des Marais, un nouveau musée à St Omer (Pas-de-Calais) qui ouvrira ses portes en 2014. Le matériau a permis de réaliser des modules qui contiendront des aquariums, des maquettes des écrans, etc. dans la salle principale d'exposition. **Une ATEx a été obtenue auprès du CSTB pour valider la réalisation de murs porteurs** avec ce même produit dans le projet de maison intergénérationnelle de Manom (57).

D'autres formulations de béton d'argile pour murs porteurs ont été mises au point lors de ces trois années. L'utilisation de la terre à pisé de Brézins (AKTERRE) et des FAC (CB) ont donné de bons résultats avec une très faible stabilisation au ciment (3%). Plusieurs chantiers ont été réalisés par CARACOL avec ces produits innovants, avec l'outillage et la technologie de mise en oeuvre des bétons de ciment (aiguille vibrante, coffrages à béton, etc.). **Les formulations se sont affinées au cours du projet BAE, avec notamment une meilleure prise en compte de la granulométrie, l'utilisation de dispersants et de plus faibles teneurs en eau à la mise en oeuvre.** La liste des chantiers réalisés est donnée dans la partie Valorisation.

Les recherches sur les composites terre–chanvre menées à l'ENTPE ont abouti à **différents produits comme la brique de terre–chanvre ou le mégabloc**. Ces matériaux, réalisés avec des dosages de l'ordre de 10% de chanvre pour 90% de terre, donnent de bons résultats mécaniques et sont surtout d'excellents régulateurs hygrothermiques. La taille des briques peut varier pour donner naissance à d'autres produits comme le mégabloc qui serait le cousin des grosses bottes de pailles ou des pierres du Gar sorties brutes de carrière. **Ce mégabloc pourrait être utilisé comme élément porteur tout en ayant de très bonnes performances d'isolation et de régulation hygrothermique**. De la même manière, la taille de cette brique peut réduire pour être utilisée comme des hourdis sur plancher bois.

L'entreprise AKTERRE commercialise actuellement un produit à base de chaux–chanvre qui est projeté sur des ossatures bois ou en isolation (intérieur/extérieur). Les formulations de terre–chanvre mises au point lors du programme de recherche BAE sont tout à fait adaptées à ce type de mise en oeuvre. L'utilisation de dispersant diminue la quantité d'eau utilisée lors de la pose et favorise donc un séchage plus rapide.

Un dernier produit a été testé lors du festival Grains d'Isère 2013 : **le placoterre**. Ce type de matériau est actuellement produit et commercialisé par l'entreprise allemande CLAYTEC. Dans notre cas, l'innovation se trouve dans le mélange de terre–chanvre à différents dosages et dans l'utilisation de dispersant afin de faciliter la production de ce matériau. **Différents panneaux vissables peuvent être produits avec des dosages en chanvre adaptés pour apporter soit de la résistance thermique soit de l'inertie thermique**. Ces panneaux de terre sont simplement vissés sur une ossature (doublage, cloison...) et prêts à recevoir un enduit ou une plaque de plâtre.

Valorisation

Conséquences et applications concrètes

Le projet BAE a permis aux entreprises partenaires de formuler plusieurs bétons d'argiles pour différents chantiers, avec suivant les cas une meilleure prise en compte de la granulométrie, l'utilisation de dispersants et des formulations de BAE à faible teneur en eau et non stabilisés :

- Modules d'exposition à la Maison des Marais, St Omer (Pas–de–Calais) : environ 60m³ de béton d'argile à base de FAC, stabilisé à 3% de ciment, fabriqué en centrale de préfabrication, transporté en camion toupie, déversé dans des coffrages à béton grâce à une pompe de levage et vibré à l'aiguille vibrante.
- Dalle chauffante, Haute–Luce (Savoie) : réalisée en 3 couches de bétons d'argiles stabilisés formulé à partir de FAC et de terre de Brézins, avec un traitement de surface à l'huile de lin. Les tuyaux du réseau de chauffage sont noyés dans la première couche.
- Dalle à forte inertie thermique, Lausanne (Suisse) : réalisée en trois couches de béton d'argile stabilisé formulé à partir d'une terre locale, avec un traitement de surface à l'huile de lin.
- Chantier de rénovation de murs en pisé, Vinay (Isère) : reprise de fissures en béton d'argile environnemental non stabilisé à base de terre locale, coulé dans les fissures fermées par un coffrage.
- Chantier de rénovation d'une ferme en pisé, Paladru (Isère) : réalisation d'arases en béton d'argile environnemental à base de terre de Brézins, coulé dans des coffrages et vibré.
- Murs porteurs pour pavillons, St Didier s/ Aubenas (Ardèche) : béton d'argile formulé avec la terre locale et des granulats de pouzzolane, stabilisé à 3% de ciment. Ce chantier a permis de tester différents moyens de production (mini–centrale de chantier, godet malaxeur, malaxeur planétaire, tractopelle, grue, etc.).
- Murs porteurs dans un bloc ferme–habitation, Sassenage (Isère) : béton d'argile à base de terre de Brézins et sable à béton.
- Projet de maison intergénérationnelle, Manom (Moselle) : une demande d'ATEX de type B est en attente de validation auprès du CSTB pour la réalisation de murs porteurs avec le BAE mis au point pour la Maison des Marais.

Communication des résultats

Les résultats de recherche ont été présentés et publiés à plusieurs occasions depuis le début du projet:

- **Article dans une revue scientifique à comité de lecture** : « Earthen construction: an increase of the mechanical strength by optimizing the dispersion of the binder phase », *Materials and Structures*, 2015, auteurs : M. Moevus, Y. Jorand, C. Olagnon, S. Maximilien, R. Anger, L. Fontaine, L. Arnaud.
- **Communication orale** : « Axes de recherche, projet BAE (Béton d'Argile Environnemental) » présentée par Romain Anger (CRAterre-ENSAG) lors de la "Journée terre crue – Les conditions de réussite de la terre crue – Caractérisation et règles professionnelles" organisée par le CTMNC à Ester Technopole, Limoges, le 18 octobre 2010.
- **Communication orale et article** : « Béton d'argile environnemental : un matériau innovant » (auteurs : B.T. Truong, L. Ronsoux, M. Moevus, L. Fontaine, R. Anger, Y. Jorand, S. Maximilien, C. Olagnon) présenté lors de la journée thématique « Ecomatériaux pour la construction » organisée le 30 juin 2011 à l'INSA de Lyon par Mecamat (groupe français de mécanique des matériaux), Amac (association pour les matériaux composites) et l'INSA de Lyon.
- **Article, présentation orale et publication dans les actes de la conférence** (Ed Ben Obinero Uwakweh, 2011) : « Environmental clay concrete: an innovative material » (auteurs : B.T. Truong, L. Ronsoux, M. Moevus, L. Fontaine, R. Anger, L. Arnaud, Y. Jorand, S. Maximilien, C. Olagnon) présenté lors de la conférence internationale « CIB-W107, innovation and sustainable construction in developing countries », organisée du 1er au 4 novembre 2011 à Hanoi (Vietnam) par International council for research and innovation in building and construction (CIB), working commission 107 in developing countries.
- **Article, présentation orale et publication dans les actes de la conférence** (Ed. Ben Obinero Uwakweh, 2011, pp. 127-131) : « Building material based on earth and plant particles » (auteurs : L. Arnaud, C. Barras) et présenté lors de la conférence internationale « CIB-W107, innovation and sustainable construction in developing countries », organisée du 1er au 4 novembre 2011 à Hanoi au Vietnam sous les auspices du International council for research and innovation in building and construction (CIB), working commission 107 in developing countries.
- **Poster** : « environmental clay concrete » (auteurs : M. Moevus, L. Ronsoux, Y. Jorand, S. Maximilien, C. Olagnon, L. Fontaine, R. Anger) présenté lors du « workshop on ceramic processing science » entre le laboratoire MATEIS-INSA de Lyon et le STEPS – Politecnico di Torino, et soutenu par le JECS TRUST (fond européen créé par la Société Européenne de Céramiques, le Journal of the Europ. Ceram. Soc. et Elsevier) à Bardonecchia en Italie les 19 et 21 janvier 2012.
- **Article, présentation orale et publication dans les actes de la conférence** : « poured earth as a concrete » (auteurs : L. Ronsoux, M. Moevus, Y. Jorand, S. maximilien, C. Olagnon, R. Anger, L. Fontaine) présenté lors de la 11ème conférence internationale sur l'étude et la conservation des architectures de terre Terra 2012 à Lima au Pérou du 22 au 27 avril 2012.
- **Article, poster et publication dans les actes de la conférence** : « hygro-thermo-mechanical properties of earthen materials for construction : a literature review » (auteurs : M. Moevus, R. Anger, L. Fontaine) présenté lors de la 11ème conférence internationale sur l'étude et la conservation des architectures de terre Terra 2012 à Lima au Pérou du 22 au 27 avril 2012.
- **Communication orale** : « Environmental Clay Concrete : an innovative material » présentée par Anne-Monique Bardagot (CRAterre-ENSAG) lors de la Conférence on Earth Architecture à Hangzhou (Chine), en décembre 2011.
- **Article, poster et publication dans les actes de la conférence** : « Comportement de murs en pisé soumis à une compression localisée » (auteurs : T.T. BUI, S. MAXIMILIEN, R. ANGER, A. LIMAM) présentée par Sandrine Maximilien (INSA de Lyon) lors des 31èmes rencontres universitaires de l'AUGC du 29 au 31 mai, Cachan.

Bilan et propositions

Les partenaires se sont réunis le 14 novembre 2013 pour la dernière réunion de coordination du projet. Ils ont établi ensemble un bilan du projet.

La demande sociale à l'origine du projet

Les attentes de chaque partenaire dans ce projet Béton d'Argile Environnemental ont été réexprimées. Elles illustrent une demande sociale à l'origine du projet BAE. Pour les acteurs de la filière terre (CRATERRE-ENSAG, CARACOL, groupe CB, AKTERRE), les attentes peuvent se regrouper en quatre points:

- **contribuer à une structuration de la filière terre crue¹** en faisant collaborer différents acteurs (entreprises, laboratoires, centre technique, ...)
 - + proposer des sujets de recherche en accord avec les problématiques des professionnels
 - + faire bénéficier les professionnels de la filière des avancées scientifiques
 - + faire travailler ensemble des producteurs de matériaux et des constructeurs
- **capitaliser les connaissances scientifiques sur les propriétés de la terre crue**, pour que ce matériau soit mieux accepté et pris en compte dans la conception des ouvrages :
 - + besoin de valeurs fiables de propriétés mécaniques, thermiques et hygroscopiques ;
 - + besoin de données scientifiques mettant en évidence le comportement hygrothermique particulièrement intéressant de la terre crue ;
- **développer de nouveaux produits** pour enrichir l'offre de produits à base de terre crue sur le marché de la construction écologique :
 - + des bétons à faible impact environnemental pour murs et dalles ;
 - + des produits préfabriqués (briques allégées, plaques pour ossatures, ...) ;
- **baisser les coûts de production** pour démocratiser la construction en terre :
 - + faciliter les mises en œuvre pour réduire les coûts de main d'œuvre, en développant notamment des bétons d'argile coulables et décoffrables, ou en proposant des produits préfabriqués ;
 - + valoriser des co-produits de carrières disponibles en grande quantité.

Ces attentes font appel à une forte implication des laboratoires de recherche, d'une part pour enrichir la compréhension scientifique de la terre crue dans le domaine de la construction, un sujet quasiment absent des recherches en sciences de matériaux jusqu'à présent ; et d'autre part pour proposer des innovations permettant de développer des produits faciles à utiliser et performants.

Pour les laboratoires de recherche impliqués, les attentes principales sont :

- **produire des résultats scientifiques permettant de mieux maîtriser le matériau terre :**
 - + faire un bilan des connaissances actuelles ;
 - + caractériser le liant de la terre crue composé principalement d'argiles et d'oxydes ;
 - + caractériser et modéliser le comportement hygrothermique ;
- **creuser des pistes d'innovation :**
 - + transfert de connaissances des domaines du béton de ciment et des céramiques industrielles vers la construction en terre ;
 - + nouveaux liants argiles / biopolymères ;
- **publier les résultats de recherches :**
 - + articles dans des revues scientifiques ;
 - + mémoire de doctorat ;

¹ Lire à ce sujet : "La filière terre crue en France : enjeux, freins et perspectives" par Elvire LEYLAVERGNE, mémoire du DSA-Architecture de terre, ENSA-Grenoble, 2012.

Disponible en ligne : <http://www.asterre.org/component/attachments/download/98>

Bilan collectif

Un programme ambitieux pour des moyens revus à la baisse

☺ Le programme proposé lors de la définition du projet était vaste et ambitieux, faisant intervenir de nombreux partenaires aux activités différentes et visant de nombreux objectifs. Le projet ainsi défini a suscité beaucoup d'intérêt chez les partenaires qui se sont fortement impliqués, et beaucoup d'attentes de leur part.

☹ Malheureusement les moyens alloués ont été revus à la baisse, d'abord parce que le budget alloué par le ministère a été réduit, ne permettant pas le financement de deux thèses de doctorat comme cela était prévu ; ensuite parce que le responsable du projet à l'ENTPE/DGCB, qui est aussi spécialiste du comportement hygrothermique de matériaux à fibres végétales, a quitté son poste en cours de projet et n'a pas pu être remplacé.

Collaboration entre les acteurs du projet

☺ Les résultats du projet ont été présentés dans ce rapport et montrent que les collaborations entre les différents acteurs ont porté leurs fruits. Le chantier pilote de St Omer en est un bel exemple : la formulation du béton d'argile utilisé pour ce chantier a été mise au point conjointement par l'entreprise CARACOL et le groupe CB sur la base d'une meilleure compréhension du rôle des argiles, de la granulométrie et de l'utilisation de dispersants grâce aux études menées à l'INSA, à l'ENTPE et au CTMNC. Des prototypes réalisés aux Grands Ateliers ont permis d'affiner et de valider la formulation.

☹ Les partenaires reconnaissent une certaine difficulté à travailler avec des acteurs de métiers différents, qui fonctionnent avec des échelles de temps différentes : les chercheurs ont besoin de temps pour produire des résultats scientifiques et des analyses fiables qui amènent de nouveaux éléments de compréhension ; les producteurs de matériau et les constructeurs ont besoin de mettre au point des bétons d'argile et des techniques de mise en oeuvre rapidement pour répondre à des cahiers des charges bien précis en temps limité. Les différents acteurs ont mis du temps à se connaître et se comprendre. Ils ont la sensation en fin de projet que de nouvelles collaborations intéressantes pourraient voir le jour, maintenant qu'une certaine reconnaissance mutuelle est établie.

Capitalisation de données scientifiques

☺ L'état de l'art réalisé sur les propriétés de la terre crue dans la construction est considéré par les partenaires comme un résultat important pour la filière terre et qu'il faut valoriser. Il doit être repris et simplifié pour être diffusé auprès des constructeurs et des bureaux d'étude. Ce travail est prévu par le laboratoire CRAterre et sera financé par ailleurs.

☹ Peu de nouvelles données scientifiques ont été produites pour enrichir et compléter cet état de l'art. Le besoin d'avancer dans la compréhension scientifique du rôle de l'eau et du réseau poreux sur les différentes propriétés du matériau reste entier.

Production scientifique et publications

☺ Pour pallier le manque de ressources humaines et financières, le laboratoire MATEIS de l'INSA a proposé plusieurs sujets de stages et de projets de fin d'étude à des élèves ingénieurs. Cela a permis d'entamer des travaux sur les différents sujets de recherche proposés dans le projet BAE. Quelques résultats scientifiques intéressants ont été obtenus et présentés dans différents congrès (voir plus haut la liste des communications effectuées). Deux publications dans des revues scientifiques à comité de lecture sont en cours de rédaction.

☹ Les chercheurs impliqués dans le projet (doctorant, post-doc et chercheurs en poste) sont déçus de n'avoir pu que survoler les différents sujets de recherche. Cela est en grande partie dû au manque de ressources humaines : le doctorant a dû s'impliquer dans 2 laboratoires (INSA / ENTPE) sur des thématiques différentes, alors qu'il était prévu 2 sujets de thèse ; les chercheurs ont encadré plusieurs étudiants pour faire avancer leurs recherches, mais les résultats obtenus sont de moins bonne qualité et moins approfondis que s'ils avaient été traités par une personne ou une équipe à plein temps. Cette manière de travailler n'est pas satisfaisante pour les chercheurs.

Nouveaux produits / nouvelles techniques

☺ De nouveaux bétons d'argile ont été formulés dans le cadre du projet BAE (dont un qui pourrait bientôt être validé par une ATEX du CSTB) et des produits préfabriqués ont été proposés. Les acteurs de la filière terre crue ont acquis une expertise et des connaissances utiles pour la formulation de nouveaux produits. L'entreprise CARACOL est de plus en plus sollicitée pour réaliser des chantiers avec des bétons d'argile.

☹ A la fin du projet, aucun dispersant ni coagulant vraiment naturel n'a été identifié pour répondre aux besoins de mise en oeuvre. Les bétons d'argile formulés utilisent des dispersants de l'industrie chimique et des liants minéraux comme le ciment pour durcir le matériau après coulage.

Propositions

Il est important pour les partenaires du projet BAE de maintenir et faire vivre les liens qu'ils ont établi au cours de ces 3 ans. Ils souhaitent trouver de nouvelles opportunités pour travailler ensemble, mais envisagent de fonctionner différemment.

Un consortium d'acteurs pour le développement des bétons d'argile environnementaux...

Ils souhaitent faire vivre un consortium avec des rencontres annuelles et une diffusion d'informations sur les avancées respectives des différents acteurs, plutôt que de monter des projets larges et ambitieux mais ponctuels, comme cela a été le cas avec le C2D2. Ils ont besoin pour cela de financements pour l'organisation de ces rencontres, les déplacements des acteurs, la participation à des congrès, la publication et la diffusion des avancées scientifiques et techniques au sein de la filière des matériaux biosourcés.

Des collaborations plus ciblées...

Les prochaines collaborations entre partenaires sont envisagées sur des projets ciblés avec un nombre réduit de partenaires, pour une coordination plus efficace. Ces projets pourraient, par exemple, voir le jour autour d'un sujet de thèse avec pour objectif de mieux comprendre le matériau pour développer des innovations, ou bien s'orienter sur le développement d'une gamme de produits par les professionnels avec une implication limitée des laboratoires.

Une recherche à inscrire dans la durée...

Pour les laboratoires de recherche, il est important à l'issue du projet BAE de développer une ligne scientifique qui s'inscrive dans la durée, pour qu'un travail de fond puisse se faire et amener de nouvelles connaissances scientifiques qui répondent aux besoins exprimés par les professionnels (par exemple : compréhension du rôle de l'eau sur les différentes propriétés du matériau, maîtrise de produits naturels dispersants ou coagulants). Ils ont besoin pour cela de financements de thèses de doctorat et d'équipements de laboratoire.

Programme C2D2

Convention de subvention n° 10 MGC S 011

Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie

Coordination : Valérie Wathier

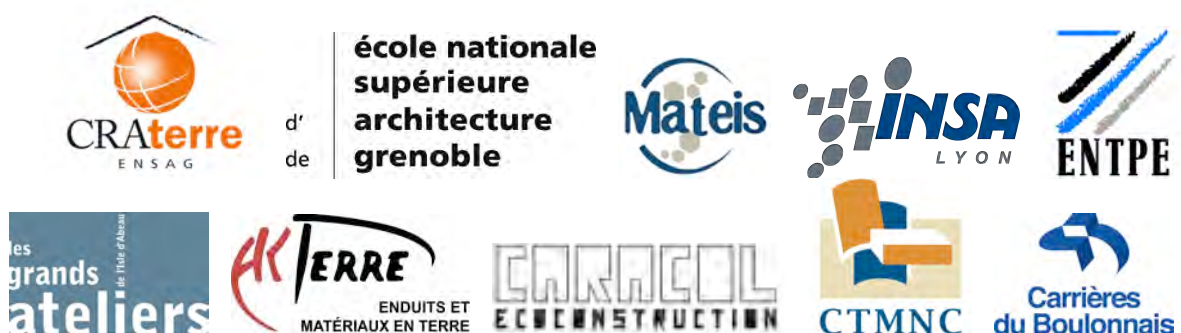


Projet : Béton d'Argile Environnemental (B.A.E.)

Rapport scientifique
(EN FRANÇAIS)

Décembre 2013

Coordination : Mariette Moevus / Laetitia Fontaine /
Romain Anger / Patrice Doat – CRAterre-ENSAG



Le projet de recherche Béton d'Argile Environnemental (BAE) est financé par le Ministère de l'Écologie, du Développement durable, et de l'Énergie dans le cadre du programme incitatif C2D2 (Concevoir et Construire pour le Développement Durable).

Le présent document correspond au rapport scientifique du projet de recherche.

Le projet Béton d'Argile Environnemental, initié en décembre 2010, a rassemblé 8 partenaires de recherche et industriels pour un programme de 3 ans :

- le laboratoire CRAterre de l'ENSAG (responsable scientifique)
- le laboratoire MATEIS de l'INSA de Lyon
- le département DGCB de l'ENTPE
- les Grands Ateliers de Villefontaine
- le Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction (CTMNC)
- le groupe Carrières du Boulonnais
- l'entreprise AKTERRE (fabricant de matériaux écologiques à base d'argile)
- l'entreprise CARACOL (constructeur en terre crue)

INTRODUCTION	3
<i>Problématique</i>	3
<i>Objectifs</i>	3
<i>Acteurs partenaires</i>	4
<i>Méthodologie</i>	4
<i>Liste des annexes</i>	5
GT1 - CARACTÉRISTIQUES THERMIQUES ET MÉCANIQUES	6
TÂCHE 1 - ETAT DE L'ART DES CARACTÉRISTIQUES DE LA TERRE CRUE.....	7
TÂCHE 2 - INFLUENCE DE LA DENSITÉ, DE L'ORGANISATION DU RÉSEAU POREUX ET DE L'HYGROMÉTRIE SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES ET THERMIQUES.....	9
<i>Choix et caractérisation des matériaux types (JALON 1)</i>	9
<i>Comportement hygrométrique du matériau terre (JALON 2)</i>	9
<i>Comportement mécanique en fonction de l'humidité (JALON 3)</i>	10
TÂCHE 3 - TESTS HYGROTHERMIQUES À L'ÉCHELLE 1.....	12
GT2 - INNOVATION	13
TÂCHE 4 - ELABORATION DE COMPOSITES TERRE / FIBRES VÉGÉTALES.....	14
<i>Formulation et caractérisation de composites terre-chênevotte (JALONS 4 et 5)</i>	14
<i>Comportement hygrothermique</i>	16
TÂCHE 5 - DISPERSION / COAGULATION DES BOUES D'ARGILE.....	18
<i>Bibliographie relative au comportement rhéologique et viscoélastique des systèmes argile-eau (JALON 6)</i>	18
<i>Effet du pH sur la viscosité de matériaux types (JALON 7)</i>	18
<i>Effet de dispersants sur la viscosité de suspensions d'argile (JALON 8-a)</i>	19
<i>Effet de la dispersion sur la microstructure et les propriétés mécaniques</i>	19
<i>Les tanins, dispersants naturels ? (JALON 8-c)</i>	20
<i>Coagulation par décalage du pH et modification de la force ionique (JALON 9)</i>	20
TÂCHE 6 - ELABORATION DE NOUVEAUX LIANTS ARGILES / BIOPOLYMÈRES (JALONS 12, 13, 14).....	22
<i>Effet de galactomannanes sur la consistance et la rhéologie de boues d'argile</i>	22
<i>Effet de galactomannanes sur les propriétés mécaniques de la terre</i>	22
GT3 - VALORISATION DES COPRODUITS DE CARRIÈRES DE GRANULATS	24
TÂCHE 7 - MISE AU POINT DE PRODUITS TERRE INNOVANTS.....	25
<i>Formulation d'un béton d'argile coulable à base de fines argilo-calcaires</i>	25
<i>Produits terre-chanvre à base de fines argilo-calcaires</i>	26
GT4 - TRANSFERT DE TECHNOLOGIE	27
TÂCHE 8 - EXPÉRIMENTATIONS À L'ÉCHELLE 1.....	28
TÂCHE 9 - CHANTIERS PILOTES.....	30
TÂCHES 10 ET 11 - PRODUCTION ET DIFFUSION DE PRODUITS TERRE INNOVANTS.....	31
<i>Dalles non porteuses</i>	31
<i>Murs porteurs</i>	31
<i>Bétons d'argile allégés</i>	31
VALORISATION ET COMMUNICATION DES RÉSULTATS	33
CONCLUSION	34

Introduction

Problématique

La terre est un matériau à changement de phase naturel, localement disponible, à faible énergie grise et recyclable. Ces qualités en font un matériau de construction d'avenir.

La physique et la mécanique de la matière divisée (et ultra divisée) sont des domaines en plein essor. L'éclosion des nanosciences offre un nouvel éclairage sur les comportements mécaniques, thermiques, hygrométriques et rhéologiques du matériau terre, en particulier aux échelles physico-chimiques les plus fines des argiles.

A cet apport de connaissances théoriques s'ajoute un savoir-faire industriel très élaboré pour la mise en oeuvre de matériaux offrant de nombreux points communs avec la terre, véritable béton d'argile. Ainsi, les méthodes appliquées à la confection de bétons de ciment toujours plus performants d'une part et celles appliquées au coulage des crues des céramiques industrielles d'autre part sont transférables au matériau terre.

D'autre part, le marché spécialisé de la construction en terre s'organise et se développe rapidement. A cela s'ajoute une demande sociétale toujours plus forte qui conduit par exemple les industriels de la brique cuite à proposer des briques crues. Les carrières de granulats souhaitent quant à elles valoriser leurs importants volumes de coproduits de carrières (fines argilo-calcaires).

Les conditions sont donc réunies pour mettre en place à l'échelle nationale, à l'instar de la filière bois, une filière terre qui s'appuie sur des bases scientifiques et techniques approfondies.

L'enjeu scientifique réside notamment dans une meilleure compréhension des propriétés mécaniques et thermiques du matériau terre en liaison avec son comportement hygrométrique d'une part et une meilleure connaissance des systèmes argile/eau en vue du coulage du matériau terre à l'état liquide d'autre part. Il réside également dans une meilleure compréhension de la cohésion du matériau et de l'amélioration de cette cohésion par ajout de polymères : les nanocomposites argile/polymère sont, de ce point de vue, exemplaires.

Objectifs

Le projet s'articule autour de 6 objectifs :

1. établir un état de l'art et une synthèse des caractéristiques mécaniques, thermiques et hygrométriques du matériau terre en vue de l'élaboration de règles professionnelles.
2. étudier l'influence de la densité, de l'organisation spatiale du réseau poreux et de l'humidité relative sur les caractéristiques mécaniques et thermiques : ce sont 3 paramètres clés de la dispersion des valeurs données par la littérature.
3. transférer d'une part la technologie des superplastifiants du béton de ciment afin de mettre en oeuvre la terre à l'état liquide et d'autre part la Direct Coagulation Casting (DCC) de l'industrie céramique afin de solidifier la terre après coulage par coagulation des argiles.
4. formuler de nouveaux liants argiles / biopolymères pour la confection de nouveaux bétons, briques, enduits et peintures très écologiques.
5. Evaluer l'intérêt de l'ajout de particules végétales poreuses pour optimiser les performances (mécaniques et thermiques) de ces bétons.
6. Valoriser les coproduits de carrières de granulats en les transformant en matériaux de construction terre innovants.

Acteurs partenaires

Le projet rassemble de manière originale 3 laboratoires universitaires aux compétences complémentaires. Le CRAterre-ENSAG apporte son expertise sur la construction en terre. Le DGCB-ENTPE apporte son expérience de la caractérisation thermique et hygrométrique des bétons de chanvres et de leur normalisation. Le MATEIS-INSA de Lyon apporte ses compétences liées à la mise au point de nouveaux procédés d'élaboration, notamment ceux relatifs au coulage des crus des céramiques industrielles.

Le projet rassemble également différents acteurs de la chaîne de production, de la carrière (Carrières du Boulonnais) au constructeur (CARACOL) en passant par un centre technique représentant des producteurs de matériaux (CTMNC) et un fabricant de matériaux écologiques à base d'argile (AKTERRE).

La plateforme des Grands Ateliers de Villefontaine permet enfin une meilleure articulation entre compétences de laboratoire, problématiques industrielles et de terrain. Elle sert de lieu d'expérimentations à l'échelle 1 en vue du transfert des nouveaux matériaux et procédés de mise en oeuvre sur le marché.

Méthodologie

Pour atteindre ses objectifs, le projet s'est organisé en 4 groupes de travail et 12 tâches.

Tâche 0 – coordination du projet

GROUPE TRAVAIL 1: caractéristiques thermiques et mécaniques

Tâche 1 – état de l'art sur les caractéristiques mécaniques, thermiques et hygrométriques de la terre

Tâche 2 – influence de la densité, de l'organisation du réseau poreux et de l'hygrométrie sur les propriétés mécaniques et thermiques

Tâche 3 – tests mécaniques à l'échelle 1

GROUPE TRAVAIL 2: innovation

Tâche 4 – élaboration de nouveaux matériaux composites terre / fibres végétales

Tâche 5 – dispersion et coagulation des boues d'argile

Tâche 6 – élaboration de nouveaux liants argiles-biopolymères

GROUPE TRAVAIL 3 : valorisation des coproduits de carrières de granulats

Tâche 7 – mise au point de produits terre innovants

GROUPE TRAVAIL 4 : transfert de technologie

Tâche 8 – expérimentations à l'échelle 1

Tâche 9 – chantier pilote

Tâche 10 – production de produits terre innovants

Tâche 11 – diffusion de produits terre innovants

VALORISATION – COMMUNICATION

En tant que coordinateur, CRAterre participe à chaque groupe de travail en vue d'assurer le suivi et la cohérence de toutes les tâches. Il assure également spécifiquement l'état de l'art de la tâche 1. Il organise les essais expérimentaux à l'échelle 1 aux Grands Ateliers.

Un doctorant est recruté sur une durée de 3 ans pour assurer les tâches 2, 3, 4 et 5 sous la double direction du DGCB-ENTPE et de MATEIS-INSA de Lyon. Ce doctorat en cotutelle assure l'harmonisation des matériaux et des essais entre les deux laboratoires, structure et renforce leur collaboration. Un post-doc est recruté sur une durée de 12 mois pour assurer la tâche 6 sous la direction de MATEIS-INSA de Lyon.

Il était prévu dans le budget initial présenté au ministère le recrutement d'un deuxième doctorant. Suite à la réduction du budget alloué, ce deuxième doctorat n'a pas pu être mis en place, ce qui justifie des avancées limitées dans certaines tâches du projet par rapport à ce qui était envisagé.

Les ingénieurs, techniciens et chercheurs du CTMNC interviennent principalement sur la tâche 2 en appui au doctorant et en coordination étroite avec le DGCB-ENTPE. Ils assurent également des missions d'analyses des matériaux argileux pour les trois groupes de travail tout en assurant une activité de suivi et de conseil pour les GT2 et GT3.

La valorisation des fines argilo-calcaires (FACs) (tâche 7 du GT3) est principalement sous la responsabilité des Carrières du Boulonnais. Les nouveaux procédés d'élaboration mis au point par le DGCB-ENTPE et MATEIS-INSA de Lyon (tâches 4, 5 et 6) sont testés spécifiquement sur les FACs en vue de leur valorisation. Le post-doc et le doctorant travaillent en étroite collaboration avec les Carrières du Boulonnais et l'entreprise AKTERRE. Cette dernière apporte son expérience professionnelle en vue de la production et la diffusion de matériaux répondant au mieux à la demande.

La plateforme des Grands Ateliers est la première étape de validation des nouveaux procédés d'élaboration grâce à l'expérimentation à l'échelle 1 par les constructeurs de l'entreprise CARACOL. Ces essais sont renouvelés tous les ans pendant 3 ans lors des semaines d'expérimentations réservées au matériau terre du mois de mai organisées par CRAterre. Le post-doc et le doctorant participent à ces essais afin d'assurer une liaison entre l'élaboration et les contraintes de chantier.

CARACOL se charge de la mise en oeuvre de chantiers pilotes, en particulier pour tester les bétons d'argile auto-nivelants et auto-plaçants pour applications horizontales de type dalle ou de type mur monolithique. Les Carrières du Boulonnais travaillent à la production de matériaux terre préfabriqués ou prêts à l'emploi de type briques, enduits, panneaux isolants, etc. AKTERRE et les Carrières du Boulonnais se chargent également de leur diffusion sur le marché. CARACOL construit enfin les ouvrages en terre pour les essais mécaniques à l'échelle 1 de la tâche 3.

Ce rapport scientifique fait ressortir les principaux résultats obtenus par groupe de travail et par tâche. Les descriptions expérimentales ainsi que les résultats détaillés se trouvent dans des rapports spécifiques en annexe.

Liste des annexes

- ANNEXE 1 : Livrable 1 – Etat de l'art des caractéristiques de la terre crue
- ANNEXE 2 : Livrable 2+3 – Caractérisations hygrométriques, mécaniques et thermiques des matériaux types
- ANNEXE 3 : Livrable 4 – Formulation et performances mécaniques et thermiques de composites terre – chanvre
- ANNEXE 4 : Livrable 5 – Couler la terre à l'aide de dispersants naturels
- ANNEXE 5 : Livrable 6 – Techniques de coagulation pour la construction en terre
- ANNEXE 6 : Livrable 7 – Elaboration de nouveaux liants argile / biopolymères
- ANNEXE 7 : Livrable 8 – Valorisation des fines argilo-calcaires
- ANNEXE 8 : Livrable 9 – Bétons d'argile : expérimentations et chantier pilote
- ANNEXE 9 : Caractérisations des matières premières et analyses (CTMNC)
- ANNEXE 10 : Expérimentations à l'échelle 1 (Grands Ateliers)
- ANNEXE 11 : Caractérisation mécanique de la terre (INSA)
- ANNEXE 12 : Rapport d'activités menées à MATEIS (INSA)
- ANNEXE 13 : Bibliographie de la thèse de Romain Anger
- ANNEXE 14 : Analyse des essais hygrothermiques (INSA-ENTPE)
- ANNEXE 15 : Mélanges AC0100-chênevotte (ENTPE-groupe CB-INSA)
- ANNEXE 16 : Rapport de stage de Joris Neyssenssas (CARACOL)
- ANNEXE 17 : Rapport de stage de Lucile Couvreur (CARACOL)
- ANNEXE 18 : Fabrication d'un BAE en centrale pour le chantier pilote de St Omer (groupe CB)
- ANNEXE 19 : article pour la journée "Ecomatériaux pour la construction" (juin 2011)
- ANNEXE 20 : article 1 pour la conférence CIB-W107 (Hanoï, nov. 2011)
- ANNEXE 21 : article 2 pour la conférence CIB-W107 (Hanoï, nov. 2011)
- ANNEXE 22 : article 1 pour la conférence TERRA 2012 (Lima, avril 2012)
- ANNEXE 23 : article 2 pour la conférence TERRA 2012 (Lima, avril 2012)
- ANNEXE 24 : article pour la conférence AUGC

GT1 – Caractéristiques thermiques et mécaniques

Partenaires : CRAterre-ENSAG / DGCB-ENTPE / CTMNC / CARACOL

La tâche 1 du GT1, intitulée « état de l'art (bilan de la littérature) des caractéristiques mécaniques, thermiques et hygrométriques du matériau terre », a été prise en charge par Mariette Moevus au laboratoire CRAterre-ENSAG et a permis de cibler au mieux les données manquantes et de planifier les essais à mettre en place pour compléter ces données. Le livrable 1 correspondant à la finalisation de cette tâche a été transmis aux partenaires en juin 2011. Le livrable 1 est disponible en ANNEXE 1 de ce rapport.

Lionel Ronsoux est inscrit en doctorat au laboratoire MATEIS-INSA de Lyon pour réaliser notamment les tâches 2 et 3, avec un encadrement tripartite : MATEIS-INSA de Lyon (Christian Olagnon, Yves Jorand, Sandrine Maximilien), DGCB-ENTPE (Laurent Arnaud) et CRAterre-ENSAG (Laetitia Fontaine, Romain Anger).

Un travail conséquent de caractérisation des matières premières a été réalisé par le CTMNC : caractérisations granulaire, chimique et minéralogique, dosage des sels solubles et du carbone. Ces analyses ont permis au groupe de travail de choisir les matériaux types qui seront utilisés tout au long du projet, et de donner des informations utiles à la compréhension des mécanismes.

Des caractérisations mécaniques, hygrométriques et thermiques des trois terres naturelles choisies comme matériaux types dans le projet ont été effectuées dans le cadre de la tâche 2 à l'ENTPE et à l'INSA. Les résultats sont consignés dans le livrable 2+3 (ANNEXE 2). Des essais hygrothermiques à l'échelle 1 ont également été menés dans le cadre de la tâche 3. Un muret en pisé a été caractérisé. Les mesures comparées à une modélisation simple mettent en évidence le rôle important des changements de phase de l'eau dans le comportement hygrothermique de la terre crue.

TÂCHE 1 – Etat de l'art des caractéristiques de la terre crue

Rapport détaillé : ANNEXE 1 (Livrable 1)

Un bilan de l'état des connaissances des propriétés de la terre crue en construction a été fait à partir de nombreuses références scientifiques. Les principales conclusions de ce travail sont retranscrites ici.

Un premier constat est que peu de données expérimentales fiables sont disponibles concernant le matériau terre pour la construction. Les données sont très parcellaires : elles concernent souvent une seule terre et s'attachent seulement à quelques propriétés. Il existe également très peu de normes pour la construction en terre, et la plupart concernent la maçonnerie en Briques de Terre Compressées (BTC) stabilisées au ciment.

La terre a une capacité de rétention de vapeur d'eau en général supérieure aux matériaux de construction courants (béton, plâtre...). L'eau contenue dans la terre peut s'évaporer et se condenser en fonction des conditions extérieures, ce qui participe au confort intérieur du bâtiment en régulant l'hygrométrie et en apportant une contribution à l'inertie thermique grâce à la chaleur latente du changement de phase de l'eau.

La terre a une perméabilité à la vapeur d'eau proche de celle de la terre cuite et des bétons légers.

Le retrait dépend beaucoup de la composition de la terre et notamment de son squelette granulaire. Il peut être contrôlé en modifiant la distribution granulométrique (ajout de sable ou de graviers) ou en rajoutant de la paille.

La terre a un comportement élasto-plastique. Les mesures du module élastique et de la résistance à la compression intrinsèques sont délicates et nécessitent des précautions expérimentales rarement prises.

La conductivité thermique de la terre dépend essentiellement de sa masse volumique et se trouve dans les mêmes gammes que les autres matériaux de construction de même densité. La terre seule n'est pas un matériau isolant, mais la terre fibrée peut être utilisée comme isolant. La terre apporte une inertie thermique importante.

A l'état frais, les paramètres matériau qui influencent le plus les propriétés rhéologiques de la terre sont la teneur en argiles, la surface spécifique des argiles et leur capacité d'échange cationique, la courbe granulométrique. De ces paramètres "élémentaires" découlent d'autres propriétés comme la plasticité, la consistance et le comportement rhéologique.

A l'état durci, les propriétés hygrométriques, mécaniques et thermiques dépendent toutes des mêmes paramètres principaux : la porosité totale, la distribution de taille des pores, la teneur en argiles, la surface spécifique des argiles et leur capacité d'échange cationique, l'empilement granulaire. Le réseau poreux détermine les phénomènes d'adsorption-désorption d'eau et de transport de vapeur d'eau ; la quantité d'eau dans la terre correspond à une valeur de succion qui détermine les forces capillaires au sein de la microstructure. De cette succion dépendent en partie les propriétés mécaniques macroscopiques. La présence d'eau influence également les propriétés thermiques de la terre.

Actuellement les liens entre réseau poreux et propriétés mécaniques et thermiques ne sont pas clairement établis : il n'existe aucun modèle prédictif permettant de relier la résistance à la compression aux paramètres microstructuraux.

Il y a un besoin de corrélérer des essais pratiqués sur le terrain à des essais de laboratoire, notamment en ce qui concerne la rhéologie de la terre pendant sa mise en œuvre, et la durabilité des ouvrages en terre.

Les principales propriétés de la terre crue mises à jour par cette synthèse bibliographique sont récapitulées dans le tableau ci-dessous pour les 3 grandes familles de mise en œuvre : terre compactée, moulée ou fibrée. Les valeurs du Traité de Construction en Terre publié en 1989 [Houben1989] sont rappelées entre parenthèses pour comparaison.

Tableau récapitulatif des principales propriétés de la terre
(entre parenthèses, les valeurs données dans le Traité de Construction en Terre [Houben1989]).

Propriété	Unité	Terre compactée	Terre moulée	Terre fibrée
Teneur en argiles	%	5 à 30	20 à 40	
Indice de Plasticité IP	%	5 à 30	15 à 35	
Teneur en eau initiale w_{ini}	%	5 à 15	15 à 35	
Masse volumique sèche ρ	kg/m ³	1600 à 2200 <i>(1700 à 2200)</i>	1200 à 2100 <i>(1200 à 1700 pour l'adobe)</i>	300 à 1200 <i>(600 à 800 pour le terre-paille)</i>
Teneur en eau ambiante w	%	0 à 5%		
Retrait de séchage	%	1 à 3	1 à 20	proche de 0
Coefficient de résistance à la vapeur μ		5 à 13		
Module de Young E	GPa	1,0 à 5,5 <i>(0,7 à 7,0 pour de la terre stabilisée)</i>		< 1,0
Résistance à la compression R_c	MPa	0,4 à 3,0 <i>(2,0)</i>	0,4 à 5,0	
Résistance à la traction R_t	MPa	0,1 à 0,5 <i>(0,5 à 1,0 pour la terre compactée)</i>		
Capacité thermique massique c	J/kg.K	600 à 1000 <i>(~ 850)</i>		
Capacité thermique volumique C	kJ/m ³ .K	960 à 2200	720 à 2100	180 à 1200
Conductivité thermique λ	W/m.K	0,5 à 1,7 <i>(0,81 à 0,93)</i>	0,3 à 1,5 <i>(0,46 à 0,81)</i>	0,1 à 0,3 <i>(0,1 à 0,45)</i>

TÂCHE 2 – Influence de la densité, de l'organisation du réseau poreux et de l'hygrométrie sur les propriétés mécaniques et thermiques

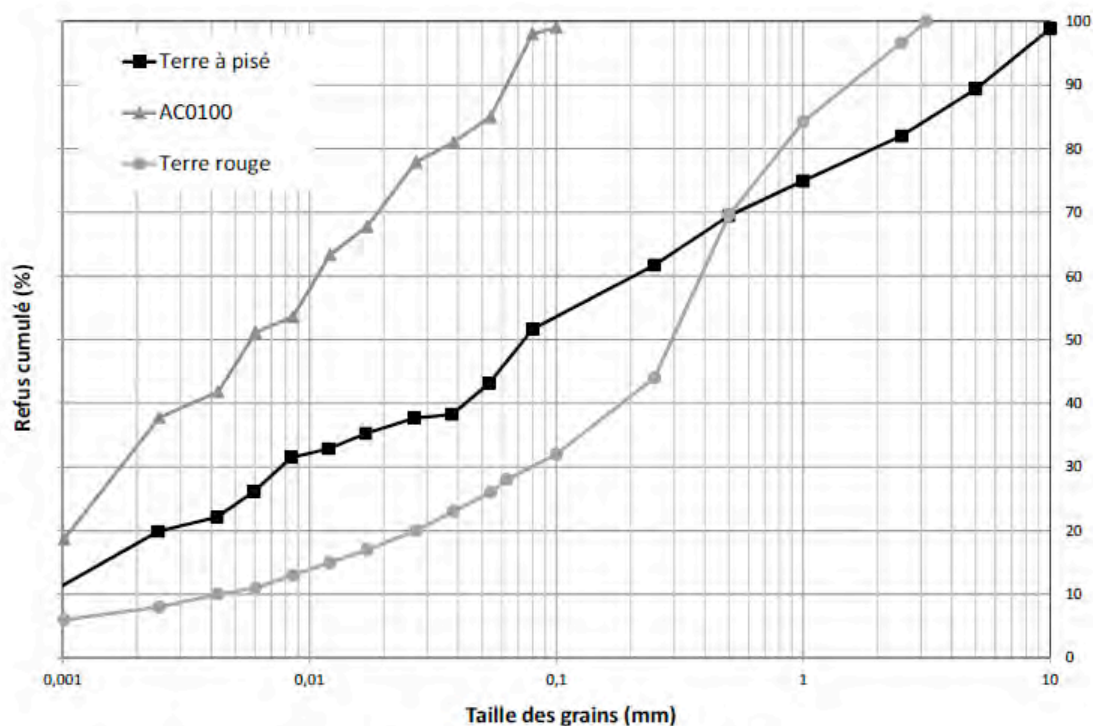
Rapports détaillés : ANNEXE 2 (Livable 2+3), ANNEXE 9

Choix et caractérisation des matériaux types (JALON 1)

De nombreuses caractérisations ont été faites au CTMNC pour analyser les matières utilisées dans le projet et aider au choix des matériaux types : analyses chimiques, granulométriques et minérales, analyses des sels solubles, ATD/ATG, etc. L'ensemble des résultats se trouve dans l'ANNEXE 9.

Huit références d'argiles dites pures ont été analysées : deux kaolinites (BS4 et Alsi H), une illite (Arvel I77), quatre smectites (MVF77, Impersol V, Impersol S et FVO) et une montmorillonite (GB453). Les analyses montrent que ces argiles n'étaient pas pures à 100% notamment pour les smectites qui présentent un mélange de plusieurs argiles. Elles ont mis en évidence la difficulté d'avoir comme matière première une argile parfaitement pure.

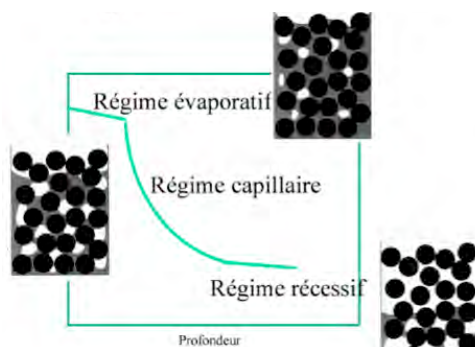
Quant aux terres, trois références différentes ont été analysées (terre à pisé de Brézins, terre rouge de Royans et Fines Argilo-Calcaire, ou FACs (AC0100), des Carrières du Boulonnais). Différentes fractions granulaires ont été caractérisées afin de comparer les parties fines avec les parties plus grossières.



Distribution granulométrique des trois terres naturelles sélectionnées

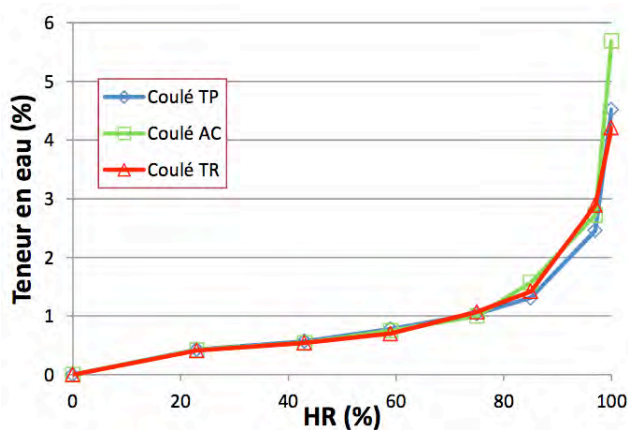
Comportement hygrométrique du matériau terre (JALON 2)

La cinétique de séchage unidirectionnel d'éprouvettes fabriquées à partir des trois terres naturelles sélectionnées a été mesurée. Le tracé de la vitesse de séchage au cours du temps fait apparaître trois phases correspondant respectivement au régime évaporatif, au régime capillaire puis au régime récessif. Les deux dernières phases sont indépendantes des conditions expérimentales : elles sont pilotées par les processus de transport interne liés aux réseaux poreux des matériaux caractérisés.



3 régimes cinétiques de séchage

Les isothermes d'adsorption des trois terres ont été mesurés à partir de fragments d'éprouvettes de terre mises en oeuvre par coulage. Les courbes présentées ci-dessous sont très similaires, avec une teneur en eau d'environ 0,5% pour une humidité relative de 20%, et d'environ 1% à 70% HR.

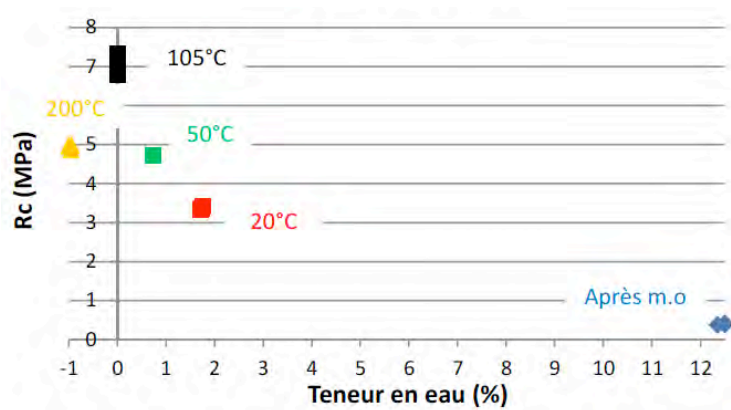


Isothermes d'adsorption des trois terres naturelles

Comportement mécanique en fonction de l'humidité (JALON 3)

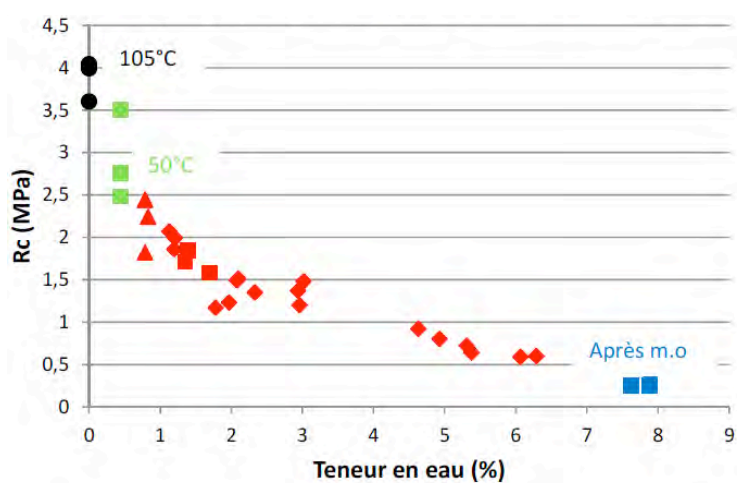
L'influence de la teneur en eau sur les propriétés mécaniques a été évaluée pour la terre à pisé de Brézins mise en oeuvre par compaction à une teneur en eau proche de l'optimum Proctor. Les teneurs en eau des éprouvettes sont obtenues par des traitements différents qui vont de l'état frais sans perte d'eau après la mise en oeuvre, jusqu'à l'état cuit à 200°C pour déshydrater totalement les argiles. A la température de 200°C toutes les natures d'argiles sont déshydratées mais elles ne sont pas déshydroxylées (l'eau libre n'est plus présente mais l'eau de constitution l'est encore).

Le graphe ci-dessous décrit l'évolution des résistances en fonction de la teneur en eau mesurée par perte de masse à 105°C. Cette teneur en eau ainsi définie vaut 0 pour des échantillons séchés à 105°C et peut être négative pour des séchages plus poussés. La résistance à la rupture augmente depuis l'état humide après la mise en oeuvre jusqu'à l'état sec après traitement à 105°C, en raison d'une teneur en eau de plus en plus faible et des forces capillaires de plus en plus fortes. Aux forces capillaires s'ajoutent les forces de frottement entre les grains, sensibles également à la teneur en eau, et vraisemblablement une cristallisation des sels dissous. A la température de 105°C, il subsiste encore une part d'eau libre retenue par les argiles. Cette quantité d'eau est variable selon le type d'argile et il faut atteindre environ 150°C pour totalement déshydrater tous les types d'argile. Un traitement à 200°C permet une totale déshydratation des argiles. La résistance à la compression est du niveau de celle après un traitement à 50°C, donc relativement élevée. Cet essai confirme que les forces capillaires ne sont responsables que d'une partie de la résistance mécanique.



Evolution de la résistance à la compression de la terre à pisé compactée en fonction de la teneur en eau résiduelle

L'influence de la teneur en eau sur les propriétés mécaniques a également été évaluée pour un mélange de terre à pisé (50%), gravier (30%) et sable (20%), dans la continuité des travaux menés par les étudiants Pirat et Filloux à l'INSA de Lyon. Ce mélange (noté 532) a été élaboré pour augmenter la compacité du matériau et diminuer les risques de fissuration, en utilisant le modèle granulométrique d'Andreasen. La même tendance est observée, avec une corrélation en loi puissance entre la teneur en eau et la résistance. Plus la teneur en eau est élevée, plus la résistance en compression est faible, tendant vers une asymptote à environ 0,5 MPa pour une teneur en eau supérieure à 7%. A contrario, plus la teneur en eau est faible et plus la résistance en compression est élevée, avec une asymptote verticale pour une teneur en eau proche de 0.



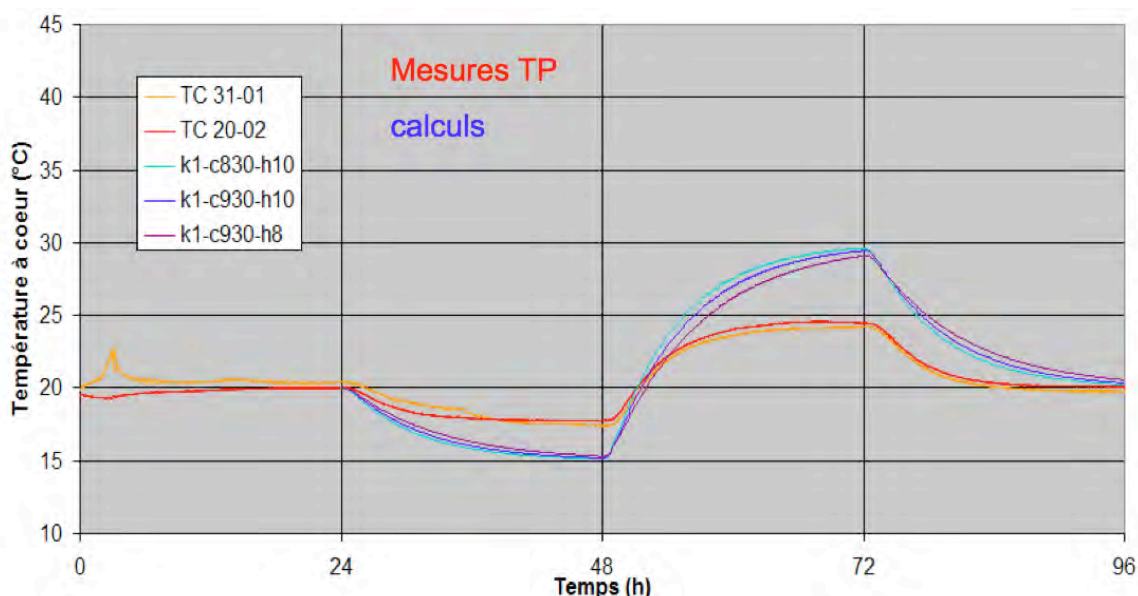
Evolution de la résistance à la compression du mélange 532 compacté en fonction de la teneur en eau résiduelle

TÂCHE 3 – Tests hygrothermiques à l'échelle 1

Rapport détaillé : ANNEXE 3 (Livrable 4), ANNEXE 14

Des murets ont été réalisés par l'entreprise CARACOL lors du festival Grains d'Isère 2011 aux Grands Ateliers de Villefontaine. L'un d'eux a été réalisé en pisé (terre de Brézins compactée) pour mesurer le comportement hygrothermique d'un mur de référence représentatif du pisé traditionnel de la région dauphinoise. Les essais ont été réalisés à l'ENTPE. Le mur est placé à l'interface entre deux enceintes climatiques. L'une des enceintes a une ambiance stable (20°C, 50% HR) tandis que l'ambiance imposée dans la deuxième enceinte suit 4 paliers : (20°C, 50% HR) ; (10°C, 80% HR) ; (40°C, 45% HR) ; (20°C, 50% HR). La température et l'hygrométrie sont mesurées au sein du mur.

Une modélisation par éléments finis a été réalisée à partir des données de conductivité et masse volumique du matériau, sans prendre en compte l'influence de l'eau. L'écart entre expérience et simulation est important : la variation de température mesurée au sein du mur est 2 fois plus faible que celle prévue par les calculs. Le pisé de conductivité thermique 1,1 W/m.K se comporte ici comme un matériau équivalent non hygroscopique de conductivité thermique 0,1 W/m.K. Cet écart important est attribuable aux changements de phase de l'eau contenue dans le matériau. Ces essais mettent donc en évidence l'importance capitale des changements de phase dans le comportement hygrothermique de la terre crue et des bétons d'argile, alors que les calculs réglementaires actuels l'ignorent et considèrent ces effets négligeables.



Evolution de la température au sein du muret en pisé au cours de l'essai hygrothermique : comparaison entre les mesures et les simulations

GT2 – Innovation

Partenaires : CRAterre-ENSAG / MATEIS-INSA de Lyon / DGCB-ENTPE / CTMNC

Le groupe de travail GT2, intitulé « innovation » est organisé en 3 tâches distinctes.

La tâche 4, intitulée « élaboration de nouveaux matériaux composites terre / fibres végétales », a permis de déterminer précisément le mode d'élaboration des éprouvettes ainsi que les formulations terre / chènevotte types en fonction des terres types. Le suivi des teneurs en eau pendant le séchage et les isothermes de sorption ont été effectués. Les propriétés mécaniques et thermiques ont été caractérisées en fonction de différents dosages en terre et chanvre et pour différents types de mise en oeuvre. L'influence de l'hygrométrie sur les caractéristiques mécaniques et thermiques des mélanges a été étudié grâce à une caractérisation de la sensibilité des matières premières à l'humidité relative. Des essais hygrothermiques ont été menés sur des murs-éprouvettes dans une double-enceinte, ce qui a permis de simuler le comportement de murs soumis à des variations de conditions climatiques (température et humidité) extérieures. Ces essais ont permis de mettre en évidence le rôle primordial des changements de phase de l'eau au sein de la terre crue (pisé) et des composites terre / chènevotte: cela confère aux murs un comportement qui approche celui d'un mur isolant, alors que les conductivités thermiques de ces matériaux sont bien supérieures à celles de matériaux isolants.

Le livrable 4 relatif à la tâche 4 est donné en ANNEXE 3 de ce rapport.

La tâche 5, intitulée « dispersion et coagulation des boues d'argile », a permis d'établir dans un premier temps une bibliographie détaillée relative au comportement viscoélastique et rhéologique des systèmes argile/eau. Dans un deuxième temps, l'influence du pH sur la viscosité de matériaux types a été étudié en détail, et l'effet de plusieurs dispersants des argiles sur la viscosité d'une boue de terre naturelle (dispersant et dosage optimal) a été comparé. Quel que soit le dispersant industriel utilisé, les réductions de viscosité obtenues sont importantes. Une conséquence pratique de la dispersion des argiles est l'augmentation d'un facteur compris entre 1,5 et 2 des résistances mécaniques en compression. Des recherches ont commencé sur l'utilisation des tanins comme dispersants des argiles. Ces molécules ne sont pas encore suffisamment maîtrisées pour permettre un transfert de leur utilisation dans la construction.

La problématique de la coagulation, ou transition liquide solide, a été abordée sous le seul aspect de la gélification physique, i.e. variation du pH et de la force ionique. Les variations de viscosité et surtout de seuil d'écoulement restent modestes. L'objectif de produits débanchables sur quelques jours semble donc peu réaliste en utilisant cette méthode seule. Ce constat est renforcé par la très grande variabilité des matières premières.

La voie de la polymérisation / réticulation in situ d'une boue d'argile dispersée prévue initialement dans le projet (JALONS 10 et 11) n'a pas pu être explorée par manque de moyens financiers et humains. Elle fait l'objet d'un doctorat financé par ailleurs qui a débuté en novembre 2013.

L'ensemble des travaux effectués à l'INSA pour la tâche 5 sont rapportés en ANNEXE 12. Les livrables 5 et 6, plus synthétiques, sont fournis en ANNEXES 4 et 5.

La tâche 6, intitulée « élaboration de nouveaux liants argiles / biopolymères », a permis d'établir les conclusions suivantes. L'étude rhéologique s'est révélée très utile pour préparer la mise au point de protocoles d'élaboration de composites. La caroube et la gomme de guar diminuent la fluidité des suspensions. Cette diminution est quasiment proportionnelle à la quantité de biopolymère. Cela se traduit par une augmentation de la demande en eau pour la mise en oeuvre de composites à consistance fixe. Les dispersants sont compatibles avec la caroube dans la mesure où ils conservent leur efficacité en présence du biopolymère ; ils n'annulent pas non plus l'effet gélifiant de la caroube. Les caractérisations des différents composites élaborés montrent que la densité sèche est un paramètre déterminant pour les propriétés mécaniques, et qu'elle dépend principalement de la demande en eau des mélanges à la mise en oeuvre. Comme il a été montré précédemment que les biopolymères étudiés font augmenter la demande en eau, ils conduisent logiquement à une diminution de la densité finale des composites, ce qui est préjudiciable pour les propriétés mécaniques.

Le livrable 7, intitulé « nano-composites argiles / biopolymères : de nouveaux liants pour la construction » (juin 2012) est disponible en ANNEXE 6 de ce rapport.

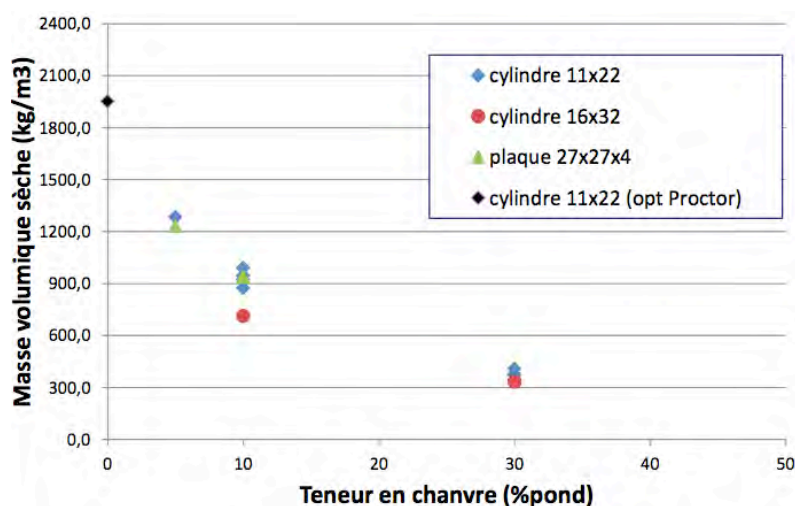
TÂCHE 4 – Elaboration de composites terre / fibres végétales

Rapport détaillé : ANNEXE 3 (Livrable 4)

La chènevotte est produite par broyage des tiges de chanvre. Elle se présente sous forme de particules très légères qui ont une forte capacité d'absorption d'eau. Son association à un liant minéral (ici la terre) permet d'obtenir des composites légers ayant un comportement hygrothermique intéressant dans la construction. Une méthode de formulation de nouveaux composites terre/chènevotte a été mise au point, et les produits obtenus ont été caractérisés mécaniquement et thermiquement.

Formulation et caractérisation de composites terre–chènevotte (JALONS 4 et 5)

Des composites terre / chènevotte ont été élaborés à partir des trois terres naturelles sélectionnées dans le projet, avec différentes teneurs en fibres et différentes techniques de compactage. L'effet des fibres sur la masse volumique sèche des composites est similaire pour les trois terres : l'ajout de 10% massique de chanvre conduit à des mélanges de 800 à 1100 kg/m³, tous formats et quantités d'eau à la mise en oeuvre compris. Avec 30% de chanvre, les mélanges ont une masse volumique sèche de 300 à 500 kg/m³.

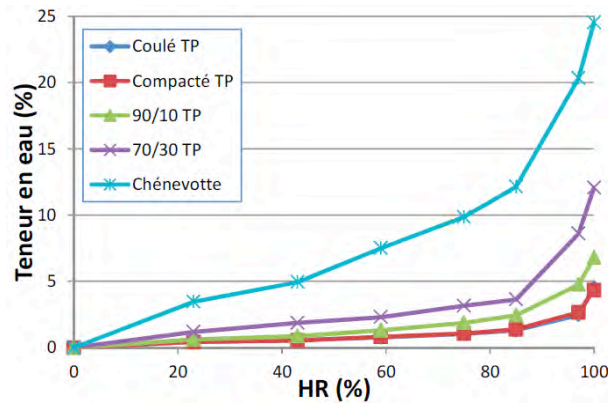


Evolution de la masse volumique des composites terre de Brézins / chènevotte en fonction de la teneur en chènevotte

Les isothermes d'adsorption de vapeur d'eau ont été mesurés à température ambiante pour différents composites terre–chènevotte. La chènevotte seule a une capacité d'absorption d'eau très importante, ce qui se traduit par des teneurs en eau bien plus élevées dans les composites que dans la terre non fibrée. Les isothermes d'adsorption des composites peuvent être prédits à partir des isothermes des constituants seuls par une simple loi des mélanges :

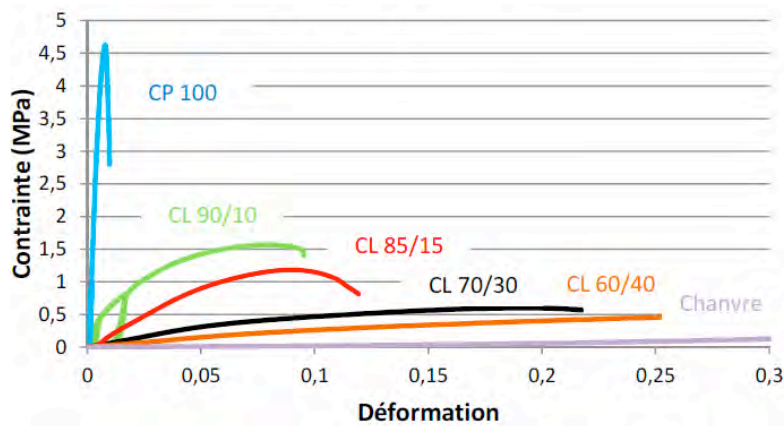
$$M_{\text{eau}} = W_{\text{chanvre}} \times M_{\text{chanvre}} + W_{\text{terre}} \times M_{\text{terre}}$$

où M_i est la masse du constituant i et w_i la teneur en eau massique dans le constituant i pour une humidité relative donnée.



Isothermes d'adsorption des composites terre de Brézins / chènevotte

Le comportement mécanique à la compression a été mesuré pour différents teneurs en chènevotte. Plus le composite est léger (riche en chènevotte), plus sa résistance est faible et sa plasticité élevée. Par exemple, la déformation à rupture du composite 85% terre / 15% chènevotte est environ 10 fois supérieure à celle de la terre seule et sa contrainte à rupture 4 fois plus faible.

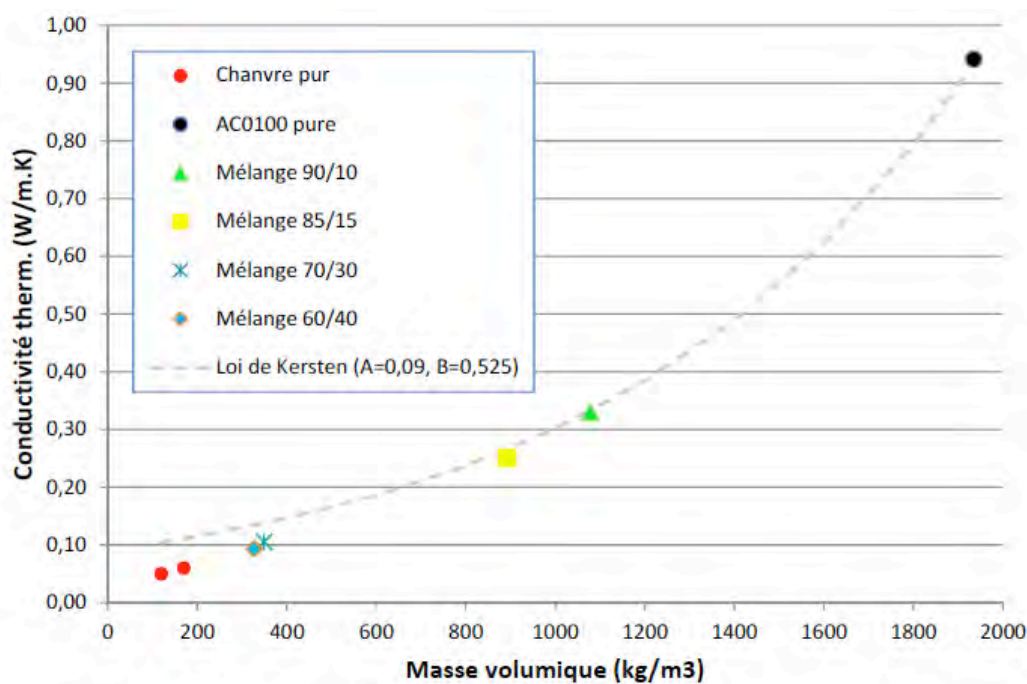


***Comportement mécanique des composites fines argilo-calcaire / chènevotte
(CP = Compactage Proctor, CL = Compactage Léger)***

La conductivité thermique des différents composites élaborés a été mesurée, pour des masses volumiques comprises entre 120 kg/m^3 (chanvre seul) et 1950 kg/m^3 (terre compactée). On constate que la chènevotte fait très vite chuter les valeurs de conductivité thermique: le mélange contenant 10% de chènevotte en masse et 90% de fines argilo-calcaires a une conductivité thermique de $0,32 \text{ W/m.K}$; celui contenant 30% de chènevotte une conductivité de $0,10 \text{ W/m.K}$.

Ces mesures ne permettent pas de considérer le matériau terre-chaivre comme isolant à part entière, sur la seule base de la conductivité thermique; mais si l'on évalue la résistance thermique qui en découle $R_{th} = e / \lambda$ où e est l'épaisseur du mur, on obtient un R_{th} de 4,1 à 3 pour un mur de 45 cm d'épaisseur.

Une modélisation par homogénéisation auto-cohérente a été proposée pour évaluer la conductivité thermique des composites à partir des conductivités thermiques des constituants (chènevotte, air, terre). Cette approche est pertinente avec le chanvre sec. Son utilisation pour les terres reste à confirmer avec peut-être un modèle prenant mieux en compte leur caractère composite.



Conductivité thermique des composites fines argilo-calcaire / chènevotte

Comportement hygrothermique

Trois murs ont été fabriqués puis testés dans une double-enceinte hygrothermique : un mur en pisé (cf. tâche 3), un mur en terre-chanvre 90/10 et un mur en terre-chanvre 70/30, avec comme constituant de base la terre de Brézins. Les murs sont soumis d'un côté à une ambiance stable (20°C, 50% HR), et de l'autre côté à des paliers de 24h : (20°C, 50% HR) ; (10°C, 80% HR) ; (40°C, 45% HR) ; (20°C, 50% HR).

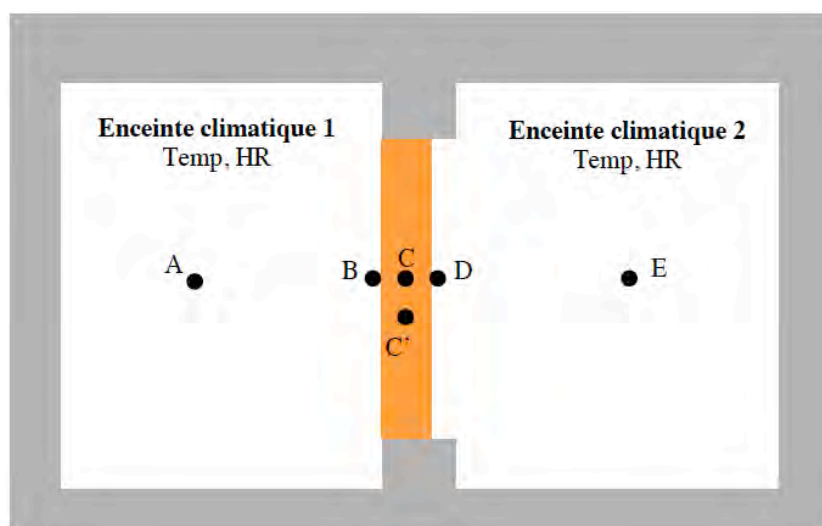
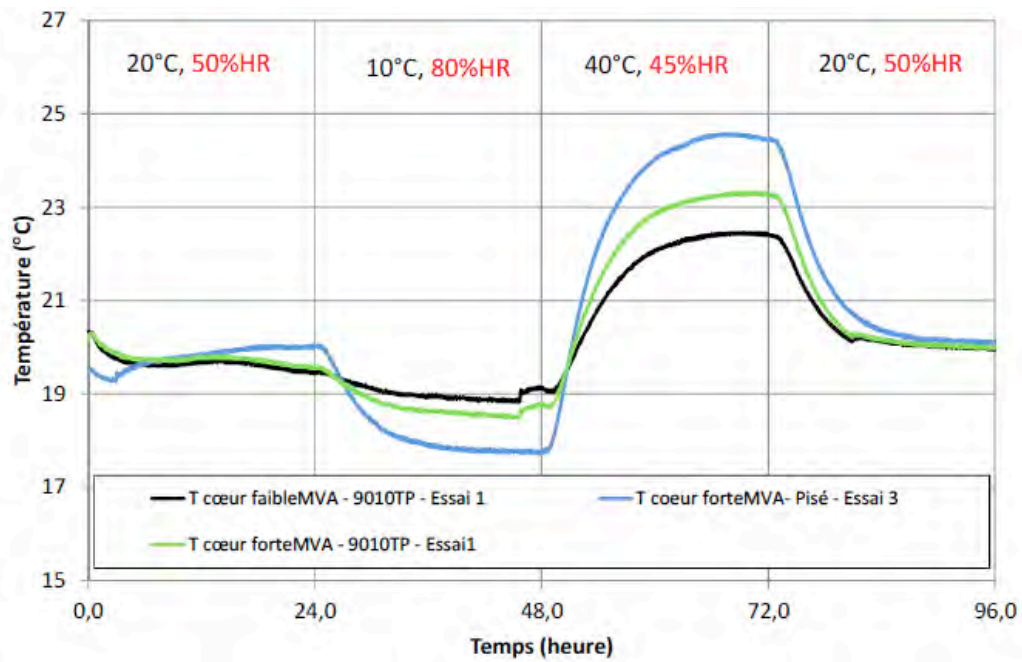


Schéma du dispositif de double-enceinte hygrothermique, avec le muret à caractériser représenté en orange.

Par rapport au mur en pisé, les murs en terre-chanvre amortissent beaucoup plus les variations de température. La température se stabilise plus vite dans les composites terre-chanvre, ce qui est attribuable à la plus grande quantité d'eau présente dans le matériau, dont le réseau poreux est plus développé, qui est soumise à des changements de phase.

Ces résultats pourront être repris et modélisés dans une prochaine étude.



Evolution de la température au cœur du mur en pisé (bleu) et au cœur du mur 90/10 dans deux zones : faiblement compactée (noir) et fortement compactée (vert).

TÂCHE 5 – Dispersion / coagulation des boues d'argile

Rapports détaillés : ANNEXE 13 (Bibliographie), ANNEXES 4 et 5 (Livrables 5 et 6), ANNEXE 12

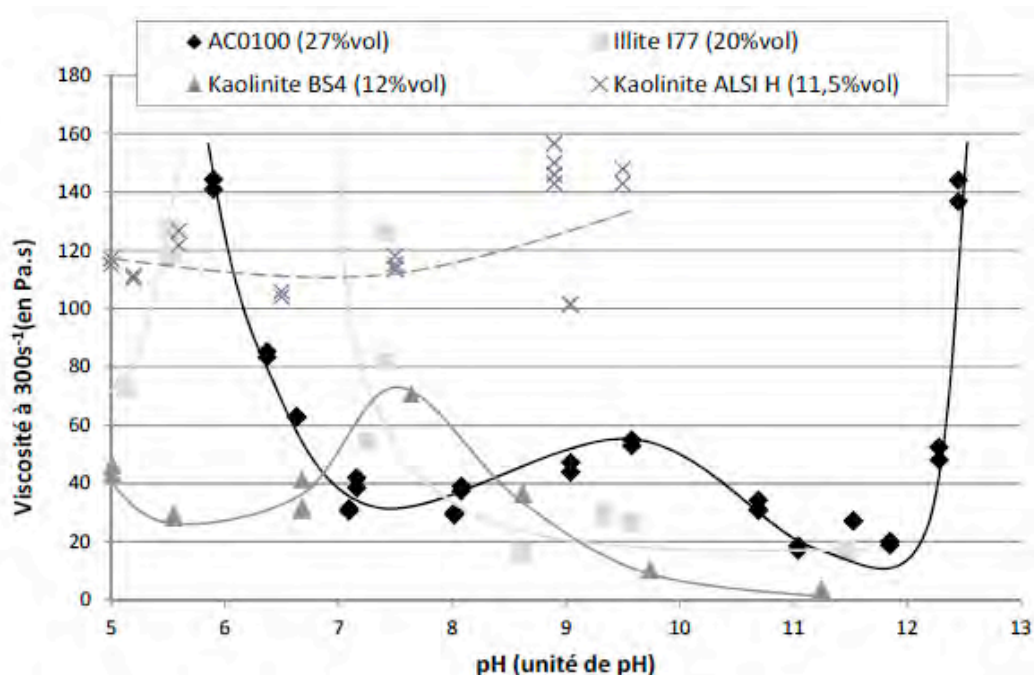
Bibliographie relative au comportement rhéologique et viscoélastique des systèmes argile-eau (JALON 6)

La première étape de la tâche 5 a consisté dans la rédaction d'une bibliographie détaillée relative au comportement viscoélastique et rhéologique des systèmes argile/eau et a été réalisée dans le cadre de la thèse de doctorat de Romain Anger (non financée par le programme C2D2) intitulée « approche granulaire et colloïdale du matériau terre pour la construction » et soutenue le 20 décembre 2011 à l'INSA de Lyon.

Effet du pH sur la viscosité de matériaux types (JALON 7)

L'influence du pH sur la viscosité de matériaux types a été étudiée en détail.

Classiquement, le pH est un paramètre important dans le contrôle d'une suspension. En modifiant les charges de surface des particules, il peut affecter le comportement rhéologique des suspensions. Comme nous souhaitons à terme contrôler l'évolution de viscosité et de comportement rhéologique en modifiant le pH, il est important d'étudier la variation de viscosité des suspensions avec celle du pH. La figure ci-dessous présente les suspensions étudiées, à savoir, dispersions des illites, deux nuances de kaolinite, ainsi que les fines argilo-calcaires (AC0100).



Influence du pH sur la viscosité des suspensions d'argile et de fines argilo-calcaire

Pour des raisons pratiques de mesure, les solutions sont très en-dessous des taux critiques de fraction volumique de matière sèche. Les comportements sont très différents d'une poudre à l'autre et parfois éloignés de ce que l'on pouvait attendre en comparaison de certaines données de la littérature. On observe une forte évolution de la viscosité pour l'illite et les fines argilo-calcaires (AC0100). Ces dernières sont composées en majeure partie de carbonate de calcium qui est dissout en pH acide, ce qui explique la forte viscosité dans cette plage de pH. La viscosité élevée en pH fortement basique est également due à une dissolution de la matière. Le comportement de l'illite n'est pour l'instant pas encore expliqué.

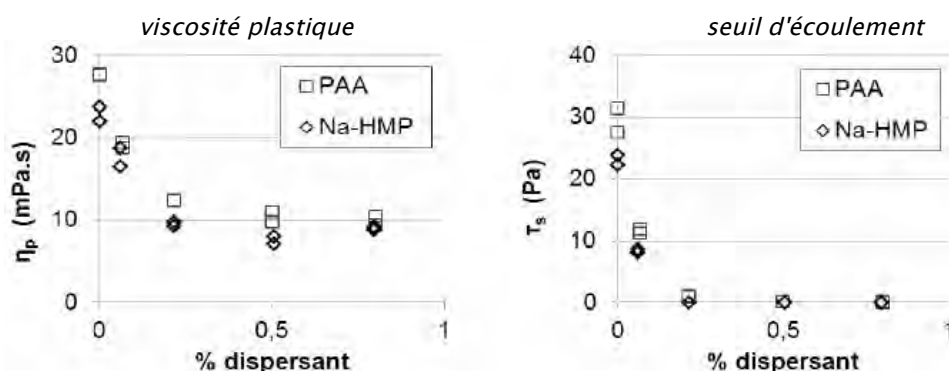
Par contre la viscosité évolue peu avec le pH pour les kaolinites, et plus surprenant à première vue de grandes différences selon la provenance de l'argile, qui a probablement été soumise à des procédés

industriels inconnus. Des ajouts (argiles non pures) pourraient expliquer ce comportement non conforme aux prévisions.

Le comportement rhéologique en fonction du pH est donc propre à chaque matière première et ne peut pas, dans l'état actuel de nos connaissances, être généralisé.

Effet de dispersants sur la viscosité de suspensions d'argile (JALON 8-a)

L'effet de plusieurs dispersants des argiles sur la viscosité de boues de terres naturelles a été comparé. Les dispersants utilisés sont le HMP (HexaMétaPhosphate de sodium), le PAA (Acide PolyAcrylique), le Darvan C et le Darvan 7 (polyméthacrylate de sodium). Ils ont été sélectionnés pour leurs microstructures et modes d'action différents.



Mesures rhéologiques sur des suspensions de terre à pisé de Brézins

Après avoir étudié différents dispersants sur 4 poudres d'argiles très différentes, on retiendra que l'ajout d'un dispersant permet de diminuer la viscosité de la suspension et de diminuer fortement le seuil d'écoulement. Cet effet fluidifiant est observé pour les fractions fines des 3 terres, malgré des compositions très différentes en argile et autres impuretés de type ferrique : illite et kaolinite pour les fines AC0100, kaolinite pour la terre rouge, et illite et muscovite pour la terre à pisé. Ce résultat est plutôt surprenant, puisque l'on constate que les effets des dispersants sont très similaires sur les différentes suspensions, alors que leur mode d'action et/ou leur masse moléculaire sont très différents. Ce point mérite d'être étudié plus en détail, mais d'un point de vue pratique, cela indique que l'usage d'un dispersant sur ces matériaux est plutôt robuste.

Effet de la dispersion sur la microstructure et les propriétés mécaniques

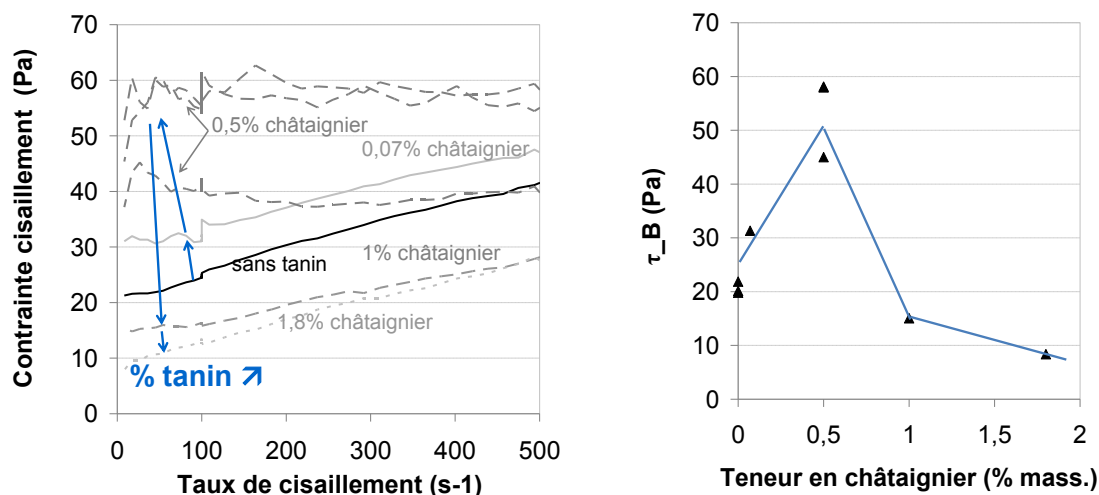
Une conséquence pratique de la dispersion des argiles est l'augmentation d'un facteur compris entre 1,5 et 2 des résistances mécaniques en compression, notées f_c dans le tableau ci-dessous. Ce résultat a été vérifié pour plusieurs terres et plusieurs dispersants. Des analyses de la microstructure par porosimétrie mercure mettent en évidence une modification du réseau poreux dans le cas où les argiles sont dispersées au moment de la mise en oeuvre. Ces résultats ont été présentés lors du colloque TERRA 2012 (annexe 22) et font l'objet d'une publication scientifique plus approfondie en cours de rédaction.

dispersant	nombre d'éprouvettes	teneur en eau initiale (%)	ρ_{dry} (g/cm ³)		f_c (MPa)	
			moy	écart-type	moy	écart-type
aucun	4	15.1	2.002	0.006	2.97	0.17
0.5% PAA	5	13.2	2.061	0.017	5.62	0.23
0.5% Na-HMP	5	12.4	2.062	0.015	4.81	0.16

Les tanins, dispersants naturels ? (JALON 8-c)

Des mesures rhéologiques ont été réalisées sur des suspensions de terres naturelles dans lesquelles différents tanins ont été introduits. La dispersion la plus efficace est obtenue avec le tanin de châtaignier, puis le quebracho, la valonée et le myrobolam, pour la teneur choisie de 1,7%. Il est possible que cette teneur ne soit pas optimale pour tous ces tanins.

Quand le dosage en tanin augmente, la contrainte seuil commence par augmenter fortement avant de diminuer pour des dosages supérieurs à 1%. L'effet du tanin sur la fluidité d'une suspension de terre est donc très sensible au dosage de tanin introduit.



Influence de la teneur en tanin de châtaignier sur la rhéologie de suspensions de terre à pisé (à gauche : rhéogramme, à droite : seuil d'écoulement)

Le tanin a un effet acidifiant : la suspension passe d'un pH naturel de 7,5 sans tanin à un pH de 6,2 avec le tanin de châtaignier. Sans modification de ce nouveau pH, la contrainte seuil de la suspension de terre n'est pas nulle mais très nettement diminuée. L'effet du tanin sur la rhéologie de la suspension dépend du pH : l'ajout d'ammoniac conduit d'abord à un comportement plus visqueux de la suspension à pH 7,6, puis à une fluidification nette à pH 9,5. Le tanin de châtaignier utilisé à pH 9,5 semble aussi efficace que le Darvan 7S : l'état de dispersion optimal, caractérisé par un seuil d'écoulement nul, est atteint.

Le tanin peut donc avoir un effet dispersant intéressant, mais sous des conditions de pH et de concentration bien maîtrisées.

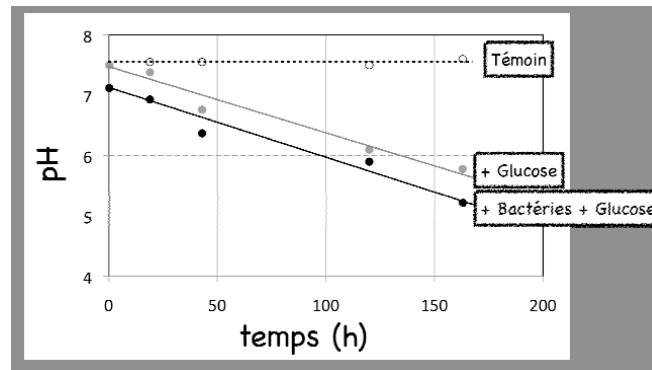
Coagulation par décalage du pH et modification de la force ionique (JALON 9)

Nous avons abordé la problématique de la transition liquide-solide sous le seul aspect de la gélification physique, i.e. variation du pH et de la force ionique. Quatre matériaux ont été étudiés : la terre à pisé de Brézins, les fines argilo-calcaires, et les kaolinites ALSIH et BS4.

L'ajout de NaCl pour modifier la force ionique n'a pas d'effet notable sur la rhéologie des suspensions non dispersées. En revanche, en présence d'un dispersant, donc à partir d'un état défloqué, l'augmentation de la force ionique fait coaguler la suspension. Les variations de viscosité et surtout de seuil d'écoulement restent modestes. L'objectif de produits débanchables sur quelques jours semble peu réaliste en utilisant cette méthode seule.

Nous avons également envisagé une évolution du pH par action bactérienne. Un apport initial de bactéries a été amené par ajout de yaourt dans les dispersions. Puis, pour assurer la prolifération de ces bactéries, du glucose a été régulièrement ajouté comme nutriment. L'évolution du pH et de la rhéologie a été étudiée en fonction du temps, pour l'échantillon avec bactéries et glucose et un échantillon témoin. On observe une acidification nette du milieu avec le temps, le pH passe de 8,1 (pH naturel des FAC) à 4,5 en 10 jours. Cette acidification a des conséquences différentes sur la rhéologie

en fonction de la terre considérée. Elle ne semble pas suffisante à elle seule pour provoquer une transition liquide-solide.



Evolution du pH de suspensions par activité bactérienne ("Témoin" : terre ; "+ Glucose" : terre + sucre alimentaire ; "+ Bactéries + Glucose" : terre + yaourt + sucre)

TÂCHE 6 – Elaboration de nouveaux liants argiles / biopolymères (JALONS 12, 13, 14)

Rapport détaillé : ANNEXE 6 (Livrable 7)

Afin de limiter les essais, l'étude est centrée sur deux adjuvants organiques naturels connus sur le terrain pour donner d'excellents résultats : la caroube et la gomme de guar, tous deux de la famille des galactomannanes.

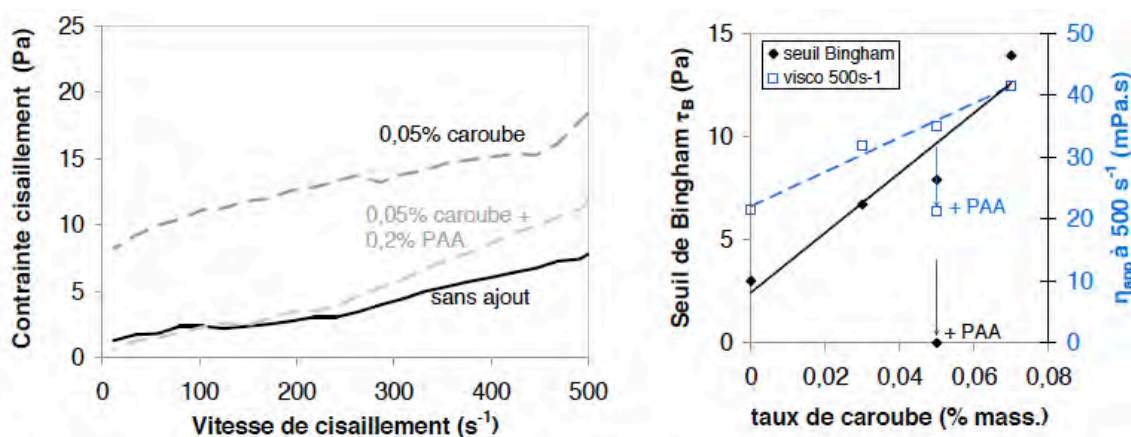
Effet de galactomannanes sur la consistance et la rhéologie de boues d'argile

L'étude rhéologique de suspensions contenant des argiles et des biopolymères vise à déterminer quelles sont les conditions optimales de mise en solution des biopolymères étudiés, et quelles sont les teneurs optimales de produit à utiliser pour la mise en oeuvre de composites terre / biopolymères : teneur en dispersant pour les argiles, teneur en biopolymère.

Les conditions optimales de dissolution des galactomannanes ont été déterminées : la solution de caroube doit être chauffée 1h à 85°C ; la solution de gomme de guar doit être agitée pendant 24h.

Des mesures rhéologiques ont été réalisées sur des suspensions de terre, puis des mesures de demandes en eau sur des suspensions plus concentrées. Il a été montré précédemment que l'effet fluidifiant des dispersants HMP et PAA dépend très peu de la quantité de dispersant ajouté. La quantité minimale de dispersant à introduire est de 0,3% pour le HMP et de 0,5% pour le PAA par rapport à la masse de terre.

A l'inverse, l'ajout de caroube dans une suspension de terre a pour effet de rendre une suspension de terre beaucoup moins fluide, et cet effet est proportionnel à la quantité de biopolymère ajouté. Cela se traduit également par une plus grande demande en eau des suspensions concentrées. Il a été montré que le PAA et le HMP sont compatibles avec la caroube dans la mesure où ils conservent leur efficacité en présence du biopolymère ; ils n'annulent pas non plus l'effet gélifiant de la caroube.



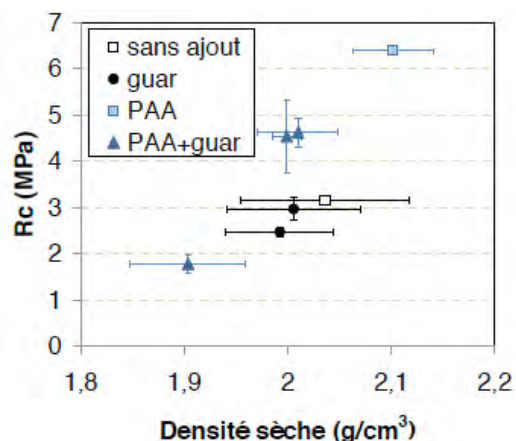
Effet d'un dispersant (PAA) sur la rhéologie d'une suspension de terre de Brézins tamisée (à gauche : rhéogramme ; à droite : viscosité et seuil d'écoulement)

Effet de galactomannanes sur les propriétés mécaniques de la terre

La mise en oeuvre et la caractérisation mécanique de composites terre / biopolymère ont été étudiées à deux échelles de matériau : l'échelle du « liant » (ou mortier fin, particules <100µm), et l'échelle du mortier (particules < 2mm). L'objectif est de mettre en évidence l'intérêt d'utiliser de tels biopolymères dans la construction en terre, en se focalisant sur les propriétés mécaniques. Il a été choisi de travailler à consistance fixe pour se rapprocher des conditions de terrain : on a besoin sur un chantier d'ajuster la teneur en eau des matériaux utilisés pour que leur consistance soit adaptée à la technique de mise en oeuvre utilisée.

Une fois secs, les deux types de composites ont été caractérisés par différentes techniques, de manière à déterminer l'impact de dispersants et de biopolymère gélifiant sur les propriétés mécaniques finales.

Les caractérisations montrent que la densité sèche est un paramètre déterminant pour les propriétés mécaniques, et qu'elle dépend principalement de la demande en eau des mélanges à la mise oeuvre. Comme il a été montré précédemment que les biopolymères étudiés font augmenter la demande en eau, ils conduisent logiquement à une diminution de la densité finale des composites, ce qui est préjudiciable pour les propriétés mécaniques.



Nous nous sommes interrogés sur l'intérêt éventuel des galactomannanes sur la cinétique de durcissement des composites : le pouvoir gélifiant de ces polymères permet-il de figer la terre plus rapidement au cours du séchage ? Peut-on en tirer partie pour démouler / décoffrer plus tôt ? Le suivi de la résistance en fonction du temps montre que ce n'est pas le cas dans les conditions expérimentales choisies ici : la cinétique d'évolution de la résistance est similaire avec et sans gélifiant.

Ainsi, en travaillant à consistance fixe, ce qui est une contrainte réaliste face aux exigences du chantier, il n'a pas été possible de mettre en évidence un intérêt notable de l'utilisation des galactomannanes dans l'élaboration de composites terre/biopolymères.

GT3 – Valorisation des coproduits de carrières de granulats

Partenaires : Groupe CB / DGCB-ENTPE / MATEIS-INSA de Lyon

Dans le cadre du groupe de travail GT3, intitulé « valorisation des coproduits de carrières de granulats », les Carrières du Boulonnais ont participé par des études complémentaires à l'utilisation et à l'adaptation des fines argilo-calcaires aux recherches menées dans le cadre du GT2, avec comme applications finales la mise au point de produits terre innovants (tâche 7).

Les efforts se sont portés en grande partie sur la formulation d'un béton d'argile fluide à base des fines argilo-calcaire et des granulats des Carrières du Boulonnais. Les travaux relatifs à cette tâche sont présentés en ANNEXE 7 de ce rapport (livrable 8). Ce nouveau béton d'argile a été mis en œuvre en octobre 2013 sur le chantier de la Maison des Marais à St Omer (Pas-de-Calais) par l'entreprise CARACOL. Ce chantier pilote correspond à la tâche 9 du GT4 et sera décrit plus loin.

En plus des études menées au laboratoire MATEIS-INSA de Lyon et au DGCB-ENTPE sur les fines argilo-calcaires FACs (voir les résultats des groupes de travail GT1 et GT2), les Carrières du Boulonnais ont participé à la réalisation d'une étude conjointe avec le DGCB-ENTPE sur la caractérisation de mélanges FACs - chènevotte (ANNEXE 15).

TÂCHE 7 – Mise au point de produits terre innovants

Rapports détaillés : ANNEXE 7 (Livrable 8), ANNEXE 15, ANNEXE 16

Formulation d'un béton d'argile coulable à base de fines argilo-calcaires

L'objectif de cette étude est de mettre au point une formule d'un béton d'argile à partir de granulats et de fines argilo-calcaires, qui sont des coproduits des carrières de granulats, provenant des Carrières du Boulonnais. Ce béton d'argile a été formulé et produit pour réaliser les modules d'exposition dans la Maison des Marais actuellement en construction à Saint Omer dans le Pas-de-Calais. Ce projet est également l'occasion de réaliser un chantier pilote dans le cadre du projet BAE dont un des objectifs est de valoriser des coproduits de carrières en les transformant en matériaux de construction terre innovants.

Le cahier des charges pour le béton d'argile était le suivant :

- Classe d'affaissement S4 au départ de la centrale avec un affaissement au cône d'Abrams visé de 180 mm,
- Maintien de rhéologie d'environ 1h30 permettant de transporter le béton de la centrale au chantier et de le transférer aux coffrages à l'aide d'une pompe,
- $R_c \approx 1.5\text{MPa}$.

Les modules réalisés sont non-porteurs, mais ils contiennent des aquariums, des maquettes, des écrans, etc. Le matériau doit alors présenter une bonne qualité de surface et une robustesse, notamment au niveau des arêtes. De plus, les modules commandés comportent plusieurs strates présentant des teintes différentes. Il est nécessaire de trouver un moyen simple et efficace de réaliser des nuances.

Le travail de formulation a été réalisé par les Carrières du Boulonnais avec l'aide de CARACOL, notamment dans le cadre du stage de Lucile Couvreur (rapport en ANNEXE 16). La formule proposée par CARACOL a été reprise et modifiée pour mieux répondre au cahier des charges, avec les matériaux disponibles pour le chantier. La formule utilisée pour le chantier est donnée dans le tableau ci-dessous.

Identification	kg/m ³
ciment CEM I 52,5N CE NF Lumbres	90
fines argilo-calcaires AC 0100	225
sable calcaire 0/4mm SS1204	439
sable marin 0/4mm A5	439
gravillon 4/12mm GL0412	864
dispersant Pozzolith 390N (1,4% m.l.)	4,5
Eau efficace	217

Il a été décidé d'ajouter une faible quantité de ciment afin de pouvoir décoffrer le matériau plus rapidement. La présence de ciment influence le comportement rhéologique de l'AC0100 en rendant sa fluidification plus difficile. Afin de déterminer une formulation optimale, plusieurs dispersants ont été testés. Parmi tous les adjuvants utilisés, le Pozzolith 390N s'est révélé le plus efficace. Une formulation répondant au cahier des charges a alors été établie avec cet adjuvant. Elle a été ensuite validée à l'échelle 1. Les propriétés du béton obtenu sont données dans le tableau ci-dessous.

Affaissement au cône d'Abrams, mm	
A T ₀	169
A T _{1h}	161
Masse volumique du béton frais, kg/m ³	2313
Masse volumique du béton durci à 28 jours, kg/m ³	2209
Rc sur cubes 15x15 après 35j de cure, MPa	4,0
Rc sur cubes 15x15 après 28j de cure et 7j de séchage à 20°C, MPa	3,6

Produits terre–chanvre à base de fines argilo–calcaires

Suite aux travaux de recherche effectués dans le Groupe de Travail 2, des caractérisations complémentaires de composites terre–chènevotte à base de fines argilo–calcaire (AC0100) ont été menées. L'objectif était de vérifier la faisabilité d'un développement industriel de tels produits, en vérifiant notamment l'absence de développement de moisissures pendant le séchage de ces nouveaux matériaux.

Les résultats sont probants pour les composites AC0100 (85%)–chènevotte (15%) et AC0100 (70%)–chènevotte (30%).

Des expérimentations aux Grands Ateliers ont suivi ces résultats afin de valider la faisabilité d'un transfert de technologie (cf. GT4–Tâche 8). Les différents types de produits sont détaillés plus loin (Tâche

GT4 – Transfert de technologie

Partenaires : CRATERRE-ENSAG / Grands Ateliers / CARACOL / Groupe CB / AKTERRE / DGCB-ENTPE / MATEIS-INSA de Lyon / CTMNC

Dans le cadre du groupe de travail GT4, intitulé « transfert de technologie », les partenaires industriels préparent le transfert des nouveaux procédés et matériaux sur le marché en plusieurs étapes.

La plateforme expérimentale des Grands Ateliers est la première étape de validation des nouveaux procédés d'élaboration grâce à l'expérimentation à l'échelle 1 par les constructeurs de l'entreprise CARACOL (tâche 8). Ces essais ont été mis en place en mai-juin 2011, en mai-juin 2012 et en mai-juin 2013 lors du festival annuel Grains d'Isère organisé par CRATERRE-ENSAG. Ces expérimentations ont impliqué la participation du laboratoire CRATERRE-ENSAG, des entreprises AKTERRE et CARACOL et des laboratoires MATEIS-INSA de Lyon et DGCB-ENTPE.

L'entreprise CARACOL a mis en oeuvre plusieurs chantiers pilotes (tâche 9), en particulier pour tester les bétons d'argile auto-nivelants et autoplaçants pour applications horizontales de type dalle ou de type mur monolithique. L'entreprise est de plus en plus sollicitée pour réaliser des chantiers en bétons d'argile environnementaux. Les travaux relatifs à cette tâche 9 sont détaillés dans le livrable 9 en ANNEXE 8.

Le groupe CB (Carrières du Boulonnais), CARACOL et AKTERRE poursuivent le développement et la production de matériaux terre préfabriqués ou prêts à l'emploi (Tâches 10 et 11), avec notamment des produits allégés en terre-chanvre.

TÂCHE 8 – Expérimentations à l'échelle 1

Rapports détaillés : ANNEXE 4 (Livrable 5), ANNEXE 8 (Livrable 9), ANNEXE 16

Trois sessions d'expérimentations ont été menées en 3 ans aux Grands Ateliers aux mois de mai-juin dans le cadre du Festival Grains d'Isère organisé par CRAterre-ENSAG.

En 2011, des murets de dimensions 1m x 1m x 0,2m ont été fabriqués par l'entreprise CARACOL en pisé et en terre-chanvre (2 dosages : 85/15 et 70/30). Ils étaient destinés aux tests hygrothermiques réalisés à l'ENTPE dans le cadre des tâches 3 et 4. Ils ont été caractérisés après 18 mois de séchage en conditions ambiantes.

En 2012, un premier prototype pour le chantier pilote de la Maison du Marais de St Omer a été réalisé par CARACOL (ANNEXE 16). Cet essai a permis de tester une formulation provisoire, des coffrages souples ainsi que différentes nuances de couleur obtenues grâce à des pigments.

La même année, une dalle a été coulée en béton d'argile autonivelant non stabilisé (sans ciment), avec une formule mise au point à partir de la terre de Brézins. Des essais préliminaires menés à l'INSA et aux Grands Ateliers ont permis de déterminer le squelette granulaire optimal et le dispersant adapté pour obtenir une grande fluidité avec un minimum d'eau. L'objectif a été atteint avec une consistance fluide pour seulement 10% d'eau. En revanche la dalle a fissuré au séchage. Le travail de formulation doit donc être poursuivi (ANNEXE 4).

Des murets en béton d'argile à base de FAC destinés à des tests hygrothermiques ont été fabriqués. Ils n'ont pas été caractérisés dans le cadre du projet mais pourront l'être lors de futurs travaux de recherche.

En mai 2013, un deuxième prototype pour la Maison du Marais de St Omer a été réalisé. Cela a permis de valider la formule mise au point pour le chantier qui a eu lieu quelques mois plus tard. Le béton coulé se met en oeuvre facilement dans les coffrages et ne fissure pas malgré la géométrie complexe du module réalisé (ANNEXE 8). Le travail de formulation pour réaliser des sols coulés en bétons d'argiles non stabilisés a été poursuivi. L'accent a été mis sur la maîtrise de la fissuration. Les formulations mises au point ont permis de réaliser 50m² de dalles en béton d'argile dans une extension des Grands Ateliers.



Prototype 1 pour la Maison du Marais de St Omer (2012)



Dalle coulée en béton d'argile environnemental réalisé avec la terre à pisé de Brézins sans stabilisant (2012)



Mise au point et réalisation de sols en bétons d'argile coulés non stabilisés aux Grands Ateliers (2013)

TÂCHE 9 – Chantiers pilotes

Rapport détaillé : ANNEXE 8 (Livrabable 9), ANNEXE 17

Le plus gros chantier réalisé dans le cadre du projet BAE est celui de la **Maison du Marais de St Omer**, un musée qui ouvrira ses portes en 2014. Un béton d'argile a été formulé à partir des FAC des Carrières des Boulonnais (cf. Tâche 7) pour réaliser des modules qui contiendront des aquariums, des maquettes, des écrans, etc. dans la salle principale d'exposition. Ce chantier a été réalisé en octobre 2013 par CARACOL et représente 60m³ de béton d'argile mis en oeuvre dans une centrale de préfabrication par les Carrières du Boulonnais.

Le béton développé ici a une consistance à la mise en oeuvre similaire à celle d'un béton de ciment, ce qui lui permet de passer en centrale à béton, d'être transporté en camion toupie et déversé dans des banches grâce à une pompe de levage. Le matériau est donc fluide, aisé à mettre en oeuvre avec des moyens courants et bien maîtrisés, et ne fissure pas au séchage. C'est une première en France, pour un béton à base de terre. Une ATE_x de type B a été obtenue auprès du CSTB pour valider la réalisation de murs porteurs avec ce même produit dans le projet de maison intergénérationnelle de Manom (57).

D'autres chantiers ont été réalisés par l'entreprise CARACOL au cours des 3 ans du projet BAE, dans lesquels différents bétons d'argile ont été formulés et mis en oeuvre pour différentes applications :

– des dalles à forte inertie thermique (réalisations à Haute Luce (73) et Lausanne en Suisse) : ces dalles sont constituées de plusieurs couches aux fonctions différentes (enrobage des tuyaux d'eau, corps, finition). Trois passes d'huile dure sont appliquées de manière à durcir la surface. Le séchage des premières couches est long, ce qui est contraignant pour le chantier. Aussi les bétons d'argile utilisés sont la plupart du temps stabilisés au ciment, au plâtre ou à la chaux pour obtenir un durcissement plus rapide. A la fin du projet, une dalle non stabilisée de 8cm d'épaisseur a été réalisée avec succès pour une extension des Grands Ateliers.

– des chantiers de rénovation : reprises de fissures de murs en pisé (Vinay, 38) ; réalisation des arases d'une grange en pisé (Paladru, 38). Les bétons d'argile coulés sont une réponse particulièrement intéressante pour la rénovation du patrimoine en terre car ils ont une bonne compatibilité mécanique et esthétique avec le bâti et sont mis en oeuvre facilement (coulés dans des coffrages, vibrés).

– des murs porteurs réalisés en bétons d'argiles formulés avec différentes matières premières : une terre locale et des granulats de pouzzolane à St Didier s/ Aubenas (07), la terre de Brézins et du sable à béton pour un bloc ferme-habitation à Sassenage (38). Ces bétons sont coulés dans des coffrages et vibrés. Ils sont stabilisés avec 3 ou 4% de ciment pour permettre le décoffrage. Les chantiers réalisés ont permis de tester différents moyens de production (mini-centrale de chantier, godet malaxeur, malaxeur planétaire, tractopelle, grue, etc.).

Les formulations réalisées par CARACOL pour ces différents chantiers se sont affinées au cours du projet BAE, avec notamment une meilleure prise en compte de la granulométrie, l'utilisation de dispersants et la réalisation de quelques chantiers en BAE à faible teneur en eau et non stabilisés.

TÂCHES 10 et 11 – Production et diffusion de produits terre innovants

Rapport détaillé : ANNEXE 8 (Livrable 9)

Dalles non porteuses

Différentes techniques ont été appliquées durant le programme de recherche BAE : de la dalle talochée à la dalle vibrée. Les formulations de ces bétons d'argile ont été essentiellement travaillées par l'entreprise CARACOL avec la terre à pisé de Brézins produite par AKTERRE. Les dalles en BAE sont perspirantes et donc très pertinentes pour la rénovation du patrimoine. Elles peuvent aussi être utilisées pour leur forte inertie pour la réalisation de planchers chauffants.

Plusieurs tentatives pour formuler des bétons d'argile autoplaçant ont été réalisées lors des festivals Grains d'Isère. La recombinaison granulaire et l'utilisation de dispersants permettent d'obtenir des résultats très satisfaisants en ce qui concerne la maniabilité et l'ouvrabilité de ces produits. Quelques ajustements sont encore nécessaires pour éviter la fissuration de retrait lors du séchage. L'ajout d'un faible pourcentage de ciment donne de bons résultats.



Réalisation d'une dalle en béton d'argile vibré avec chauffage au sol

Murs porteurs

Plusieurs formulations de béton d'argile pour murs porteurs ont été mises au point lors de ces trois années. L'utilisation de la terre à pisé de Brézins (AKTERRE) et des FAC (CB) ont donné de bons résultats avec une très faible stabilisation au ciment (3%). Plusieurs chantiers ont été réalisés par CARACOL avec ces produits innovants, avec l'outillage et la technologie de mise en oeuvre des bétons de ciment (aiguille vibrante, coffrages à béton, etc.). Le point d'orgue de ce transfert de technologie a eu lieu avec le chantier de la Maison des Marais de St Omer où, grâce aux actions coordonnées des différents partenaires, un béton d'argile a pour la première fois pu effectuer un passage en centrale à béton et camion toupie. Cette application permet donc d'ouvrir la porte à l'industrialisation des bétons d'argile pour murs porteurs.

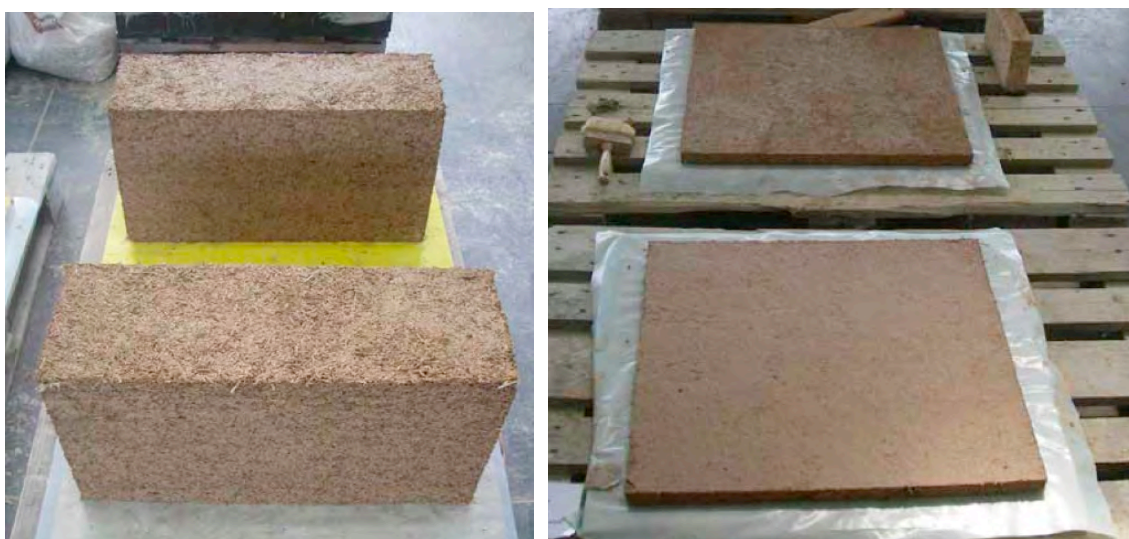
Bétons d'argile allégés

Les recherches sur les composites terre-chanvre menées à l'ENTPE ont abouti à différents produits comme la brique de terre-chanvre ou le mégabloc. Ces matériaux, réalisés avec des dosages de l'ordre de 10% de chanvre pour 90% de terre, donnent de bons résultats mécaniques et sont surtout d'excellents régulateurs hygrothermiques. La taille des briques de terre-chanvre peut varier pour donner naissance à d'autres produits comme le mégabloc qui serait le cousin des grosses bottes de pailles ou des pierres du Gar sorties brutes de carrière. Ce mégabloc pourrait être utilisé comme

élément porteur tout en ayant de très bonnes performances d'isolation et de régulation hygrothermique. De la même manière, la taille de cette brique peut réduire pour être utilisée comme des hourdis sur plancher bois.

L'entreprise AKTERRE commercialise actuellement un produit à base de chaux-chanvre qui est projeté sur des ossatures bois ou en isolation (intérieur/extérieur). Les formulations de terre-chanvre mises au point lors du programme de recherche BAE sont tout à fait adaptées à ce type de mise en oeuvre. L'utilisation de dispersant diminue la quantité d'eau utilisée lors de la pose et favorise donc un séchage plus rapide.

Un dernier produit a été testé lors du festival Grains d'Isère 2013 : le placoterre. Ce type de matériau est actuellement produit et commercialisé par l'entreprise allemande CLAYTEC. Dans notre cas, l'innovation se trouve dans le mélange de terre-chanvre à différents dosages et dans l'utilisation de dispersant afin de faciliter la production de ce matériau. Différents panneaux vissables peuvent être produits avec des dosages en chanvre adaptés pour apporter soit de la résistance thermique soit de l'inertie thermique. Ces panneaux de terre sont simplement vissés sur une ossature (doublage, cloison...) et prêts à recevoir un enduit ou une plaque de plâtre.



Produits en bétons d'argile allégés : mégabloc à gauche, placoterre à droite

Valorisation et communication des résultats

Les résultats du projet ont été présentés et publiés à plusieurs occasions depuis le début du projet :

- **Article dans une revue scientifique à comité de lecture** : « Earthen construction: an increase of the mechanical strength by optimizing the dispersion of the binder phase », *Materials and Structures*, 2015, auteurs : M. Moevus, Y. Jorand, C. Olagnon, S. Maximilien, R. Anger, L. Fontaine, L. Arnaud.
- **Communication orale** intitulée « Axes de recherche, projet BAE (Béton d'Argile Environnemental) » présentée par Romain Anger (CRATERRE-ENSAG) lors de la « Journée terre crue – Les conditions de réussite de la terre crue – Caractérisation et règles professionnelles » organisée par le CTMNC à Ester Technopole, Limoges, le 18 octobre 2010.
- **Communication orale et article** intitulé « Béton d'argile environnemental : un matériau innovant » (auteurs : B.T. Truong, L. Ronsoux, M. Moevus, L. Fontaine, R. Anger, Y. Jorand, S. Maximilien, C. Olagnon) et présenté lors de la journée thématique « Ecomatériaux pour la construction » organisée le 30 juin 2011 à l'INSA de Lyon par Mecamat (groupe français de mécanique des matériaux), Amac (association pour les matériaux composites) et l'INSA de Lyon (annexe 19).
- **Article, présentation orale et publication dans les actes de la conférence** (Ed Ben Obinero Uwakweh, 2011) intitulé « Environmental clay concrete: an innovative material » (auteurs : B.T. Truong, L. Ronsoux, M. Moevus, L. Fontaine, R. Anger, L. Arnaud, Y. Jorand, S. Maximilien, C. Olagnon) et présenté lors de la conférence internationale « CIB-W107, innovation and sustainable construction in developing countries », organisée du 1er au 4 novembre 2011 à Hanoi au Vietnam sous les auspices du International council for research and innovation in building and construction (CIB), working commission 107 in developing countries (annexe 20).
- **Article, présentation orale et publication dans les actes de la conférence** (Ed. Ben Obinero Uwakweh, 2011, pp. 127–131) intitulé « Building material based on earth and plant particles » (auteurs : L. Arnaud, C. Barras) et présenté lors de la conférence internationale « CIB-W107, innovation and sustainable construction in developing countries », organisée du 1er au 4 novembre 2011 à Hanoi au Vietnam sous les auspices du International council for research and innovation in building and construction (CIB), working commission 107 in developing countries (annexe 21).
- **Poster** intitulé « environmental clay concrete » (auteurs : M. Moevus, L. Ronsoux, Y. Jorand, S. Maximilien, C. Olagnon, L. Fontaine, R. Anger) présenté lors du « workshop on ceramic processing science » entre le laboratoire MATEIS-INSA de Lyon et le STEPS – Politecnico di Torino, et soutenu par le J ECS TRUST (fond européen créé par la Société Européenne de Céramiques, le Journal of the Europ. Ceram. Soc. et Elsevier) à Bardonecchia en Italie les 19 et 21 janvier 2012.
- **Article, présentation orale et publication dans les actes de la conférence** intitulé « poured earth as a concrete » (auteurs : L. Ronsoux, M. Moevus, Y. Jorand, S. maximilien, C. Olagnon, R. Anger, L. Fontaine) présenté lors de la 11ème conférence internationale sur l'étude et la conservation des architectures de terre Terra 2012 à Lima au Pérou du 22 au 27 avril 2012 (annexe 22).
- **Article, poster et publication dans les actes de la conférence** intitulé « hygro-thermo-mechanical properties of earthen materials for construction : a literature review » (auteurs : M. Moevus, R. Anger, L. Fontaine) présenté lors de la 11ème conférence internationale sur l'étude et la conservation des architectures de terre Terra 2012 à Lima au Pérou du 22 au 27 avril 2012 (annexe 23).
- **Communication orale** intitulée « Environmental Clay Concrete : an innovative material » présentée par Anne-Monique Bardagot (CRATERRE-ENSAG) lors de la Conference on Earth Architecture à Hangzhou (Chine), en décembre 2011.
- **Article et poster** intitulé « Comportement de murs en pisé soumis à une compression localisée » (auteurs : T.T. BUI, S. MAXIMILIEN, R. ANGER, A. LIMAM) présentée par Sandrine Maximilien (INSA de Lyon) lors des 31èmes rencontres universitaires de l'AUGC du 29 au 31 mai, Cachan (annexe 24).

Conclusion

Ce projet était ambitieux dans sa forme autant que dans le fond : faire travailler ensemble des partenaires aux compétences et centres d'intérêt très divers, attendre des laboratoires des avancées significatives sur plusieurs axes de recherche différents, transférer les innovations prometteuses à l'échelle du chantier, mettre au point des produits commercialisables, et tout cela en 3 ans avec des moyens limités... le pari était de taille. Bien que tous les objectifs n'aient pas été atteints, des résultats significatifs ont été obtenus, ouvrant la voie à de futurs travaux de recherche et développement.

L'état de l'art des caractéristiques de la terre crue dans la construction, réalisé à partir de données issues de la littérature scientifique, est déjà utilisé pour la rédaction de règles professionnelles sur la construction en terre crue.

L'influence de la teneur en eau sur les performances mécaniques de la terre crue a été caractérisée par des essais de résistance à la compression sur des éprouvettes en pisé. La résistance à la rupture augmente depuis l'état humide jusqu'à l'état sec, en raison de forces capillaires de plus en plus fortes qui contribuent à la cohésion du matériau. Aux forces capillaires s'ajoutent les forces de frottement entre les grains, sensibles également à la teneur en eau, et vraisemblablement une cristallisation des sels dissous.

Des essais hygrothermiques réalisés dans un dispositif à double enceinte sur un muret en pisé, représentatif du pisé traditionnel de la région dauphinoise, ont permis de mettre en évidence **l'importance capitale des changements de phase dans le comportement hygrothermique de la terre crue et des bétons d'argile, alors que les calculs réglementaires actuels l'ignorent et considèrent ces effets négligeables.**

La tâche 4, intitulée « **élaboration de nouveaux matériaux composites terre / fibres végétales** », a permis de déterminer précisément le mode d'élaboration des éprouvettes ainsi que les formulations terre / chènevotte types en fonction des terres types. Le suivi des teneurs en eau pendant le séchage et les isothermes de sorption ont été effectués. Les propriétés mécaniques et thermiques ont été caractérisées en fonction de différents dosages en terre et chanvre et pour différents types de mise en oeuvre. L'influence de l'hygrométrie sur les caractéristiques mécaniques et thermiques des mélanges a été étudié grâce à une caractérisation de la sensibilité des matières premières à l'humidité relative. Des essais hygrothermiques ont été menés sur des murs-éprouvettes dans une double-enceinte, ce qui a permis de simuler le comportement de murs soumis à des variations de conditions climatiques (température et humidité) extérieures.

Une bibliographie détaillée a été établie sur le comportement viscoélastique et rhéologique des systèmes argile/eau. Ce travail est une base solide pour des recherches sur la fluidification et la coagulation des bétons d'argile.

L'influence du pH sur la viscosité de matériaux types a été étudiée en détail, et l'effet de plusieurs dispersants des argiles sur la viscosité d'une boue de terre naturelle (dispersant et dosage optimal) a été comparé. **Quel que soit le dispersant industriel utilisé, les réductions de viscosité obtenues sont importantes. Une conséquence pratique de la dispersion des argiles est l'augmentation d'un facteur compris entre 1,5 et 2 des résistances mécaniques en compression.** Ce résultat a été mis en lien avec des évolutions de microstructure du matériau. Des recherches ont également commencé sur l'utilisation des tanins comme dispersants naturels des argiles. Ces molécules ne sont pas encore suffisamment maîtrisées pour permettre un transfert de leur utilisation dans la construction.

La problématique de la coagulation, ou transition liquide-solide, a été abordée sous le seul aspect de la gélification physique, i.e. variation du pH et de la force ionique. Les variations de viscosité et surtout de seuil d'écoulement restent modestes. L'objectif de produits débanchables sur quelques jours semble donc peu réaliste en utilisant cette méthode seule. Ce constat est renforcé par la très grande variabilité des matières premières. La voie de la polymérisation / réticulation in situ d'une boue d'argile dispersée prévue initialement dans le projet n'a pas pu être explorée par manque de moyens financiers et humains. Elle fait l'objet d'un doctorat financé par ailleurs qui a débuté en novembre 2013.

La tâche 6, intitulée « **élaboration de nouveaux liants argiles / biopolymères** », a permis d'établir les conclusions suivantes. La caroube et la gomme de guar diminuent la fluidité des suspensions. Cette diminution est quasiment proportionnelle à la quantité de biopolymère. Cela se traduit par une

augmentation de la demande en eau pour la mise en oeuvre de composites à consistance fixe. Les dispersants sont compatibles avec la caroube dans la mesure où ils conservent leur efficacité en présence du biopolymère ; ils n'annulent pas non plus l'effet gélifiant de la caroube. Les caractérisations des différents composites élaborés montrent que la densité sèche est un paramètre déterminant pour les propriétés mécaniques, et qu'elle dépend principalement de la demande en eau des mélanges à la mise en oeuvre. Comme il a été montré précédemment que les biopolymères étudiés (caroube, gomme de guar) font augmenter la demande en eau lors de la mise en oeuvre, ils conduisent logiquement à une diminution de la densité finale des composites, ce qui est préjudiciable pour les propriétés mécaniques.

Plusieurs bétons d'argiles ont été formulés dans le cadre de ce projet pour différentes applications : murs porteurs, dalles non porteuses, briques allégées, panneaux, etc.

Le produit phare du projet est un **béton d'argile formulé à partir des fines argilo-calcaires** des Carrières des Boulonnais, qui a donné lieu à la réalisation d'un chantier pilote représentant un volume de 60m³ de matériau. Ce béton a une consistance à la mise en oeuvre similaire à celle d'un béton de ciment, ce qui lui permet de passer en centrale à béton, d'être transporté en camion toupie et déversé dans des banches grâce à une pompe de levage. **Le matériau est donc fluide, aisé à mettre en oeuvre avec des moyens courants et bien maîtrisés, et ne fissure pas au séchage.** C'est une première en France, pour un béton à base de terre. Les clés : une granulométrie optimisée, un dispersant adapté et bien dosé, et un faible pourcentage de ciment pour permettre le décoffrage. Si **les principes de formulation des bétons de ciment ont été appliqués avec succès** pour atteindre une consistance cible maîtrisée, les pistes envisagées pour durcir le matériau par coagulation ne sont pas assez mûres pour être transférées à l'échelle du chantier, ce qui justifie l'utilisation d'un faible pourcentage de ciment (3%) pour permettre un décoffrage rapide.

Ce béton d'argile a été mis en oeuvre au mois d'octobre 2013 sur le chantier pilote de la Maison des Marais, un nouveau musée à St Omer (Pas-de-Calais) qui ouvrira ses portes en 2014. Le matériau a permis de réaliser des modules qui contiendront des aquariums, des maquettes des écrans, etc. dans la salle principale d'exposition. **Une ATEx de type B a été obtenue pour la réalisation de murs porteurs** avec ce même produit dans le projet de maison intergénérationnelle de Manom (57).

D'autres formulations de béton d'argile pour murs porteurs ont été mises au point lors de ces trois années. L'utilisation de la terre à pisé de Brézins (AKTERRE) et des FAC (CB) ont donné de bons résultats avec une très faible stabilisation au ciment (3%). Plusieurs chantiers ont été réalisés par CARACOL avec ces produits innovants, avec l'outillage et la technologie de mise en oeuvre des bétons de ciment (aiguille vibrante, coffrages à béton, etc.). **Les formulations se sont affinées au cours du projet BAE, avec notamment une meilleure prise en compte de la granulométrie, l'utilisation de dispersants et de plus faibles teneurs en eau à la mise en oeuvre.** La liste des chantiers réalisés est donnée dans la partie Valorisation.

Les recherches sur les composites terre-chanvre menées à l'ENTPE ont abouti à **différents produits comme la brique de terre-chanvre ou le mégabloc.** Ces matériaux, réalisés avec des dosages de l'ordre de 10% de chanvre pour 90% de terre, donnent de bons résultats mécaniques et sont surtout d'excellents régulateurs hygrothermiques. La taille des briques peut varier pour donner naissance à d'autres produits comme le mégabloc qui serait le cousin des grosses bottes de pailles ou des pierres du Gar sorties brutes de carrière. **Ce mégabloc pourrait être utilisé comme élément porteur tout en ayant de très bonnes performances d'isolation et de régulation hygrothermique.** De la même manière, la taille de cette brique peut réduire pour être utilisée comme des hourdis sur plancher bois.

L'entreprise AKTERRE commercialise actuellement un produit à base de chaux-chanvre qui est projeté sur des ossatures bois ou en isolation (intérieur/extérieur). Les formulations de terre-chanvre mises au point lors du programme de recherche BAE sont tout à fait adaptées à ce type de mise en oeuvre. L'utilisation de dispersant diminue la quantité d'eau utilisée lors de la pose et favorise donc un séchage plus rapide.

Un dernier produit a été testé lors du festival Grains d'Isère 2013 : **le placoterre.** Ce type de matériau est actuellement produit et commercialisé par l'entreprise allemande CLAYTEC. Dans notre cas, l'innovation se trouve dans le mélange de terre-chanvre à différents dosages et dans l'utilisation de dispersant afin de faciliter la production de ce matériau. **Différents panneaux vissables peuvent être produits avec des dosages en chanvre adaptés pour apporter soit de la résistance thermique soit de l'inertie thermique.** Ces panneaux de terre sont simplement vissés sur une ossature (doublement, cloison...) et prêts à recevoir un enduit ou une plaque de plâtre.