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

Mariette Moevus, Laetitia Fontaine, Romain Anger, Patrice Doat

▶ **To cite this version:**

Mariette Moevus, Laetitia Fontaine, Romain Anger, Patrice Doat. Projet: Béton d'Argile Environnemental (B.A.E.). 2013. hal-01179458

HAL Id: hal-01179458
https://hal.science/hal-01179458

Submitted on 22 Jul 2015

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

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

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Programme C2D2

Convention de subvention n° 10 MGC S011

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

Coordination : Valérie Wathier

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

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

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

CRAterre ENSAG d' de école nationale supérieure architecture grenoble — Mateis — INSA LYON — ENTPE

les grands ateliers de l'Isle d'Abeau — AKTERRE ENDUITS ET MATÉRIAUX EN TERRE — CARACOL ECOCONSTRUCTION — CTMNC — Carrières du Boulonnais

Le projet de recherche Béton d'Argile Environnemental (BAE) a été financé par le Ministère de l'Écologie, du Développement durable, et de l'Energie 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
GROUPES 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
Un programme ambitieux pour des moyens revus à la baisse *10*
Collaboration entre les acteurs du projet *10*
Capitalisation de données scientifiques *10*
Production scientifique et publications *10*
Nouveaux produits / nouvelles techniques *11*
PROPOSITIONS 11
Un consortium d'acteurs pour le développement des bétons d'argile environnementaux... ..... *11*
Des collaborations plus ciblées... ..... *11*
Une recherche à inscrire dans la durée *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.

L'influence de la teneur en eau sur les performances mécaniques de la terre crue a été caractérisée par des essais de résisance 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 60m^3 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 pemettre 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 demande d'ATEx a été déposée 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 bon 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, Lausane (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 intergénérationelle, 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:

- **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 COnference on Earth Architecture à Hangzhou (Chine), en décembre 2011.

- **Article en cours pour soumission au journal** *Applied Clay Science* : "Effect of a dispersant on the mechanical behavior of a model mortar based on clay binder" (auteurs : M. Moevus, Y. Jorand, C. Olagnon, S. Maximilien, R. Anger).

- **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 crue**[1] en faisant collaborer différents acteurs (entreprises, laboratoires, centre technique, ...)
  + proposer des sujets de recherche en accord avec les probématiques 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'oeuvre, 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.