

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES – UNIVERSITE PAUL  
SABATIER TOULOUSE III

LABORATOIRE MATERIAUX DURABILITE DES CONSTRUCTIONS

Rapport « Année-1 » du projet TERCRUSO :  
avril 2012

# Caractérisation des produits en terre crue (briques et enduits) de Midi-Pyrénées





# SOMMAIRE

I Présentation du projet	2
II Caractérisation des enduits en terre crue produits en Midi-Pyrénées	5
<i>II.1 Matériaux et procédures</i>	5
<i>II.2 Échantillonnage et préparation des mortiers (NF EN 1015-2)</i>	9
<i>II.3 Détermination de la consistance du mortier frais (NF EN 1015-3)</i>	9
<i>II.4 Fabrication des prismes de mortier (NF EN 1015-11), séchage et retrait</i>	10
<i>II.5 Résistance à la flexion et à la compression (NF EN 1015-11)</i>	12
<i>II.6 Contrainte d'adhérence des enduits (NF EN 1015-12)</i>	14
III Impact environnemental de la brique de terre crue	18
<i>III.1 Introduction</i>	18
<i>III.2 Caractérisation environnementale de la brique de terre crue</i>	20
<i>III.3 Conclusions</i>	27
Bibliographie	28
Annexes	29
<i>Procédures pour les mesures des propriétés hygrothermiques</i>	29

# I Présentation du projet

## Historique et naissance du projet

Le projet Tercruso est né d'une rencontre. Au mois de mai 2009, ARESO (l'Association Régionale d'Ecoconstruction du Sud-Ouest) a organisé une journée à Gaillac sur la thématique de la terre crue. Cette journée regroupait une cinquantaine de personnes acteurs de la terre crue en France : la quasi-totalité des briquetiers de Midi-Pyrénées (PME), des membres d'Ecobatir, des représentants d'Asterre (l'Association Nationale des Professionnels de la Terre Crue), des architectes, des maçons spécialistes de la terre crue et des laboratoires de recherche (le LMDC de Toulouse et l'ENTPE de Lyon).

L'été suivant, l'association ARESO est venue me rencontrer pour voir comment il serait possible de faire de la recherche au LMDC sur les produits en terre crue de Midi-Pyrénées (briques et enduits). Suite au bon retour de la journée de Gaillac notamment au niveau des briquetiers, ils souhaitent réunir le plus d'acteurs possible pour voir comment faire avancer la construction en terre crue en Midi-Pyrénées et plus généralement en France et en Europe.

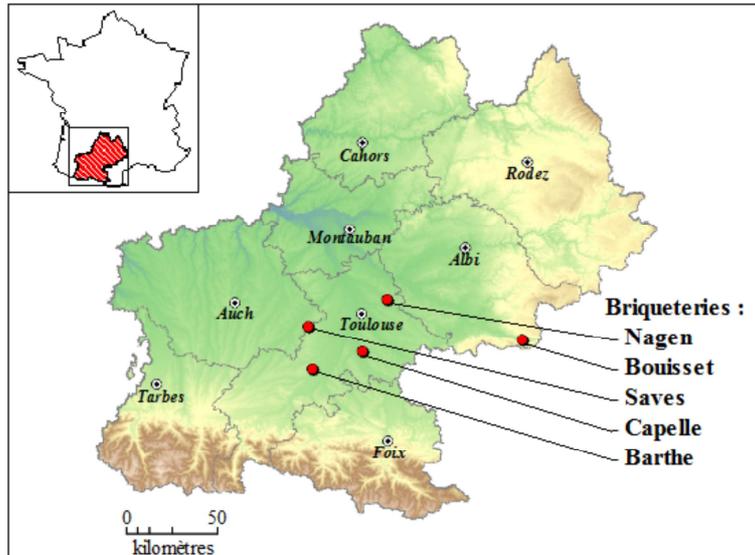
## Contexte et présentation des partenaires

Au démarrage du projet, nous sommes partis du constat que les acteurs de la filière terre crue (maçons, briquetiers, architectes, maîtres d'ouvrage et assurances) se retrouvent aujourd'hui gênés par l'absence de caractérisations sur ce matériau. La filière terre crue en Midi-Pyrénées (et en France) est confrontée à la contradiction suivante : il existe aujourd'hui une demande de plus en plus importante pour des constructions écologiques en terre crue avec en parallèle des gens qui ont la volonté, le savoir-faire et les matériaux pour répondre à ces demandes (maçons, architectes et briquetiers) mais qui ne peuvent les satisfaire essentiellement pour des questions d'assurabilité liées à l'absence de reconnaissance et de caractérisation de ces matériaux.

Sur ces problématiques, la France est très en retard par rapport à l'Allemagne bien que les premières « recherches » sur la terre crue moderne aient commencé dans ces deux pays en même temps (il y a environ une vingtaine d'années). Les allemands ont des règles professionnelles sur la construction en terre crue depuis plus de 10 ans et ils viennent de sortir des normes sur les produits manufacturés (briques, enduits et mortiers de terre crue). Nous venons à peine en France de commencer à discuter de la mise en place des règles professionnelles... La région Midi-Pyrénées étant un berceau important de la construction en terre crue qui regroupe le plus grand nombre de petits briquetiers en France, il nous a semblé cohérent de démarrer une action de recherche dans la région visant à servir de référence pour faire évoluer la situation en France dans ce domaine. L'objectif de base de ce projet est la caractérisation des produits en terre crue de Midi-Pyrénées. Nous avons appelé ce projet Tercruso pour « Terre crue du Sud-Ouest ».

Nous avons démarré le projet avec les partenaires suivants :

- Areso (Association Régionale d'Ecoconstruction du Sud-Ouest),
- Le LMDC de l'Université de Toulouse,
- Le LRA (Laboratoire de Recherche en Architecture) de l'Université de Toulouse,
- 5 PME de fabrication de briques participent à ce projet soit environ 90% des PME régionales du secteur : la briqueterie Barthe (Gratens, 31, [www.barthe.fr](http://www.barthe.fr)), la briqueterie Capelle (Grépiac, 31, [www.briqueteriecapelle.fr](http://www.briqueteriecapelle.fr)), la briqueterie Bouisset (Albine, 81, [www.briqueterie-bouisset.fr](http://www.briqueterie-bouisset.fr)), la briqueterie Nagen (St Marcel Paulel, 31, [www.briquenagen.fr](http://www.briquenagen.fr)) et les terres cuites du Savès (Empeaux, 31, [www.briques-foraines-anciennes-briqueteries.com](http://www.briques-foraines-anciennes-briqueteries.com)) (Figure 1).



**Figure 1 : Localisation des cinq briqueteries d'où proviennent les échantillons**

Au printemps 2010, nous avons été rejoints par deux autres partenaires importants :

- l'Association des Compagnons du Devoir,
- le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées qui a reçu le soutien financier du Ministère du Développement Durable via la DREAL pour participer à ce projet.

### **Objectifs du projet de recherche**

Le projet Tercuso porte sur la caractérisation des produits en terre crue (briques et enduits) de Midi-Pyrénées et s'articule autour de deux axes forts :

- notre région jouit d'un patrimoine exceptionnel de constructions en terre crue où l'on retrouve en fonction des sites les différentes techniques de la construction en terre. Cependant, la technique la plus rencontrée est sans nul doute celle des adobes et nous avons en tant que chercheurs un gisement quasi infini d'anciens adobes à étudier. Dans le cadre du projet Tercuso, nous avons souhaité valoriser cette spécificité locale en caractérisant le plus possible d'anciens adobes issus du patrimoine.
- Parallèlement à cela, nous travaillons aussi sur la caractérisation des briques de terre crue « modernes » produites dans les six briqueteries régionales qui participent au projet ainsi que sur les mélanges d'enduits prêts à l'emploi qu'ils commercialisent.

Le fil directeur de ce projet régional est l'amélioration des connaissances scientifiques des produits en terre crue (briques et enduits) afin :

- d'enrichir les bases de données sur les caractéristiques des produits en terre crue,
- d'apporter des preuves scientifiques du bien-fondé de la construction en terre crue,
- de proposer des prescriptions pertinentes en fonction du type d'ouvrage et de l'utilisation des produits en terre crue,
- de proposer des essais et des procédures pour la caractérisation des produits en terre crue, l'objectif final visé étant de proposer ces procédures pour la future normalisation de ces produits.

### **Programme de recherche et organisation**

Ce projet porte sur la caractérisation des matériaux actuellement produits en Midi-Pyrénées (une brique et un type d'enduit par briquetier) ainsi qu'un ancien adobe et se scinde en deux:

- une partie expérimentale qui se déroule au LMDC (briques) et au LRPC (enduits) et qui porte sur la caractérisation mécanique, physique et hygrothermique des produits provenant des briqueteries régionales,
- une partie plus théorique qui se déroule au LRA et qui porte sur l'analyse de cycle de vie des briques en terre crue avec comme objectif final l'établissement d'une Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) de ces matériaux.

Ce premier rapport de l'année 1 est constitué de la synthèse de deux rapports d'études réalisées durant cette année 1 :

- la caractérisation complète des enduits produits en Midi-Pyrénées qui s'est faite durant le stage de Monsieur Rémi Délinière au LRPC (Dalett, cete sud-ouest) de janvier à juillet 2011.
- un rapport rédigé par Laure Fernandez, Luc Floissac et Hans Valkhoff (LRA) sur l'impact environnemental de la brique de terre crue.

## II Caractérisation des enduits en terre crue produits en Midi-Pyrénées

### II.1 Matériaux et procédures

#### Géologie des carrières des briqueteries de l'étude

L'étude géologique a été réalisée à partir des cartes géologiques du BRGM ainsi qu'une étude de terrain sur le lieu d'extraction de chaque briqueterie.

Les carrières présentent toutes plus ou moins les mêmes faciès. Il s'agit d'une alternance d'épaisses couches d'argiles (et limons) et quelques couches de marnes, avec, plus rarement, des lentilles de sable.

Exemple de la carrière de Nagen au nord-est de Toulouse (Figure 1). Les autres carrières seront traitées en annexe.

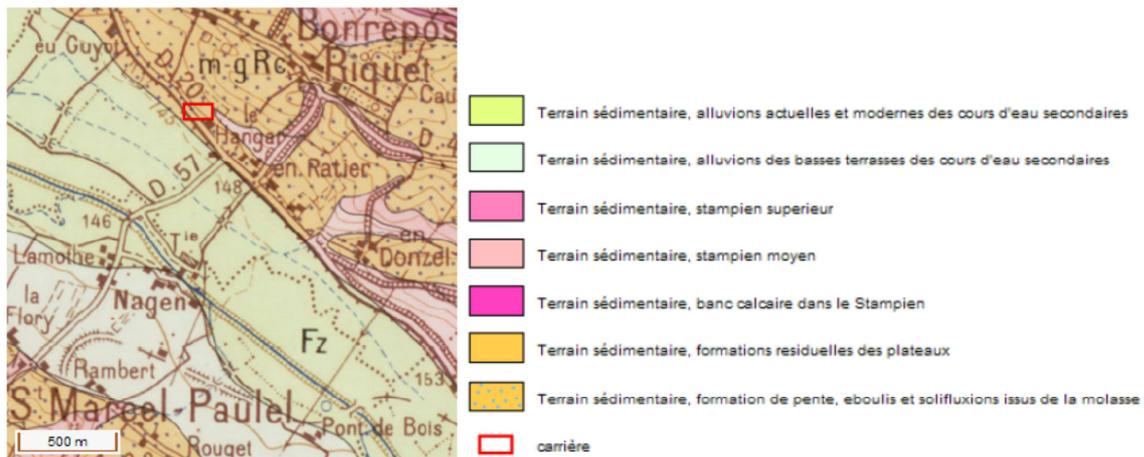


Figure 1 : Détail de la carte géologique Toulouse Est au 50000ème du BRGM

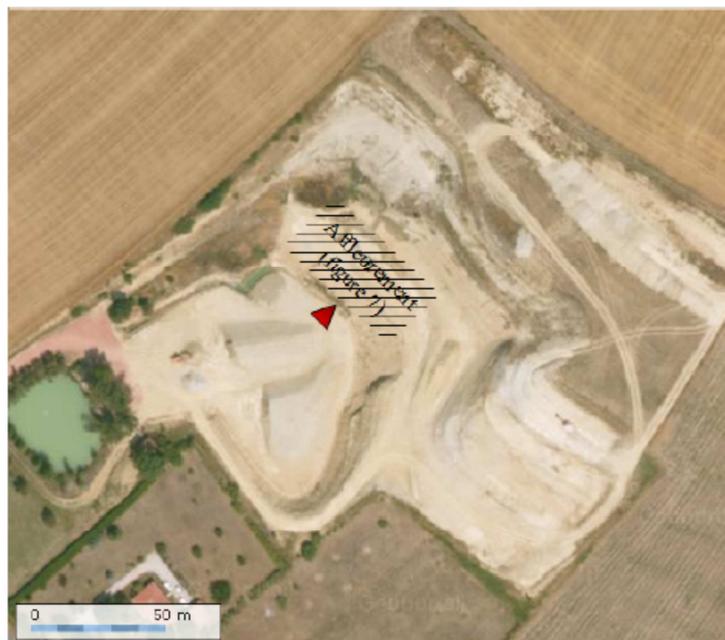
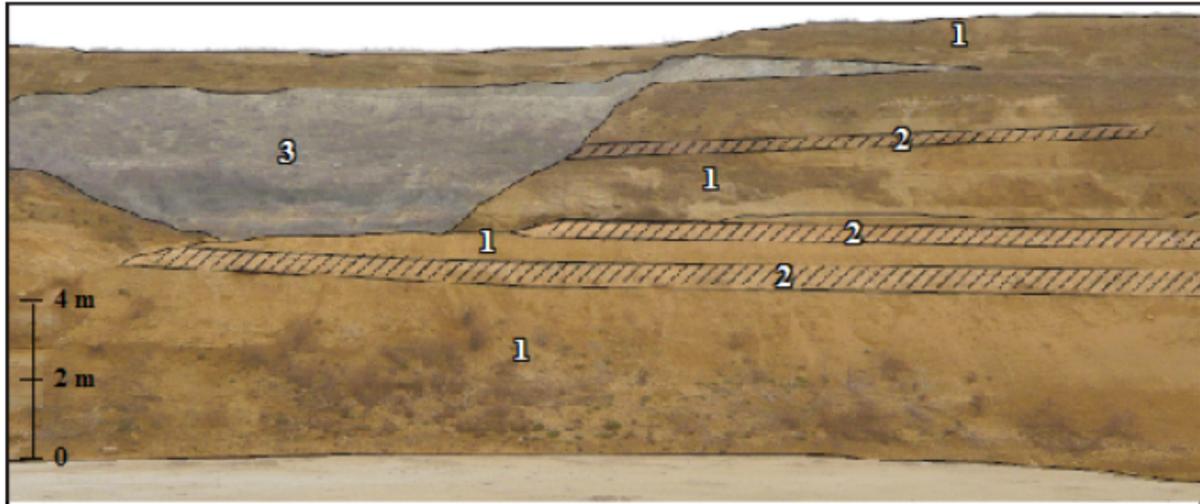


Figure 2 : Photo aérienne de la carrière de Nagen, localisation de la photo de l'affleurement Figure 3 (source : géoportail.fr)



**Figure 3 : Affleurement d'argiles (1), de marnes (2) et de sable (3) dans la carrière de Nagen**

Les carrières des briqueteries Nagen et Capelle se situent sur des formations de pente, d'éboulis et de solifluxions (glissement de terrain, de matériaux boueux), comme le précise la notice des cartes géologiques du BRGM. Tous les versants à faible pente des molasses et des marnes stampiennes sont recouverts d'une formation argilo-limoneuse de plusieurs mètres d'épaisseur. Cette formation est très hétérogène avec à la base de la molasse décomposée avec des blocs de marne arrachés et bousculés, et quelques petites lentilles de sable et de graviers dans les creux. Ce substratum est recouvert par des coulées argileuses qui ont nivelé tous les sillons, de haut en bas des pentes. Celles-ci peuvent alors être très faibles, et la solifluxion qui les recouvre donne une formation argileuse parfois rubéfiée, toujours décalcifiée. Cette formation que G. Astre a appelé l'argile grumeleuse de coulrière [1] a été mise en place par des agents divers, et à plusieurs reprises. Les argiles sont principalement des illites.

La carrière de la briqueterie Barthe se situe sur des formations de marnes et molasses oligocènes. La partie supérieure de cet ensemble forme l'Aquitanien, le plus souvent très argileux, que la plupart des carrières de terre à briques exploitent. Il peut contenir quelques bancs calcaires très localisés ainsi que des étages molassiques (sables fins parfois un peu cimentés par le calcaire) mais on y trouve quelques gros bancs marneux. Les argiles sont principalement des illites. [2]

La carrière de la briqueterie Savés se situe sur des formations de marnes, argiles et molasses, conservées sous la protection de la couche d'alluvions. Les argiles sont principalement des illites. [3]

La carrière de la briqueterie Bouisset se situe sur des formations d'argiles rouges et grès fluviatiles. Les couches y surmontent la formation conglomératique. Le faciès le plus constant correspond à des argiles ou argiles silteuses brun-rouge exploitées pour les briques et tuiles. Des traces de pédogenèse carbonatée s'observent localement au sein de ces argiles qui comportent localement à leur base des lentilles ou chenaux de grès blancs graveleux fluviatiles et des lentilles d'argiles grises à horizons ligniteux. Les argiles sont principalement des kaolinites. [4]

### **Projet de norme Allemand**

La France ne possède pas encore de normes sur les essais de caractérisation de produits de construction en terre crue. En revanche, les allemands se (ré-)intéressent depuis longtemps à ce type de construction.

Leurs recherches s'orientent principalement sur le côté pratique avec la formulation de règles professionnelles et de fiches produits. Leurs études sur la caractérisation des produits en terre sont d'ailleurs plus avancées que les nôtres dans ce domaine. Un projet de normes [8] sur la caractérisation des produits de construction en terre crue a récemment vu le jour. Ce projet s'appuie sur des normes européennes, déjà existantes, sur des essais de mortiers hydrauliques en y ajoutant quelques adaptations à la terre crue. Nous nous sommes donc appuyés sur cet ensemble de normes, qui constitue la principale référence actuelle, pour caractériser des préparations d'enduits de terre fournies par des briqueteries partenaires du projet Tercruso.

### **Granulométrie des enduits prêts à l'emploi**

Les essais sont réalisés sur des échantillons issus des prismes de mortier d'enduits par tamisage à l'eau ( $>80 \mu\text{m}$ ) et par sédimentométrie ( $<80 \mu\text{m}$ ). Les courbes granulométriques sont données sur la Figure 4.

Les courbes granulométriques des enduits sont très proches les unes des autres et suivent le même fuseau. Cette grande similitude est due au fait que les enduits sont composés à environ 60% de sable de même granulométrie pour tous les échantillons. La granulométrie ne sera donc pas un facteur déterminant pour expliquer les différences observées au cours des essais de résistance mécanique qui suivent.

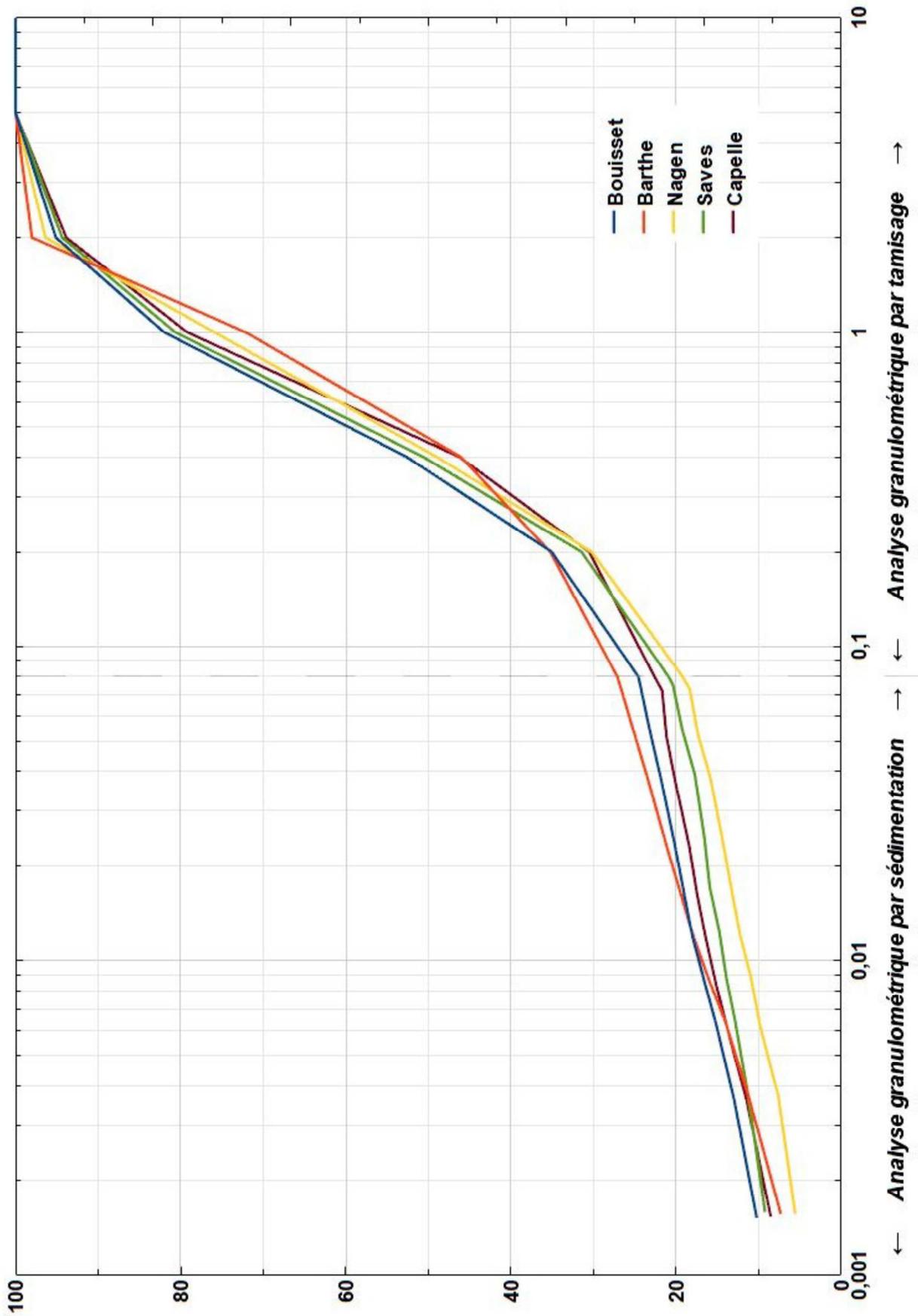


Figure 4 : Courbes granulométriques des enduits (granulométrie par tamisage et par sédimentation)

## II.2 Échantillonnage et préparation des mortiers (NF EN 1015-2)

Cette norme décrit des méthodes de prélèvement global de mortier frais, ainsi que le mode opératoire pour fabriquer des mortiers pour essai à partir de constituants secs (terre et sable) et d'eau. Le dégraissant utilisé est un sable quartzueux 0/4 dit « de Calas ».

La norme originale suit le mode opératoire de gâchage suivant :

- Ajouter l'eau dans le malaxeur,
- Ajouter les constituants solides de mortier sec, le malaxeur fonctionnant à faible vitesse,
- Achever à la même vitesse pendant 75 s.

Les déviations à la procédure de la norme sont :

- Ajouter l'eau dans le malaxeur,
- Ajouter la quantité de solide en 30s avec l'agitateur en état de marche,
- Agiter 30 s,
- 5 min temps de repos avec l'agitateur mis hors circuit,
- Agiter 30 s.

D'après Alain Marcom, maçon spécialisé dans la terre crue, les 5 min de temps de repos sont beaucoup trop courtes pour que l'eau pénètre en profondeur du matériau (l'hydratation d'agrégats argileux insuffisamment déstructurés, en particulier, peut être longue)

## II.3 Détermination de la consistance du mortier frais (table à secousses, NF EN 1015-3)

La valeur d'étalement est mesurée par le diamètre moyen d'un prélèvement de mortier frais, mis en place à l'aide d'un moule donné sur le plateau d'une table à secousses et soumis à un nombre donné de secousses verticales en soulevant la table à secousses et en la laissant retomber librement d'une hauteur donnée. La consistance est jugée satisfaisante pour des étalements de l'ordre de 17,5 cm.

Le laboratoire n'étant pas équipé d'un tel appareil, j'ai été amené à fabriquer un prototype manuel à partir des spécifications de la norme (Figure 5). Un moule conique aux dimensions adaptées a aussi été usiné par un technicien du laboratoire pour la préparation de l'échantillon.



**Figure 5 : Détermination de la consistance du mortier avec la table à secousses manuelle**

La préparation des mortiers d'enduits a été réalisée en suivant les quantités de terre, de sable et d'eau établies par chaque briquetier (quand elles étaient établies). Le problème étant de respecter le diamètre d'étalement prévu par la norme, quelques modifications dans les « recettes » ont dû être apportées.

Pour des diamètres d'étalement compris entre 16 et 19 cm, on obtient les proportions suivantes.

**Tableau 1: Caractéristiques de préparation des mortiers à enduits**

Échantillons	Saves	Capelle	Barthe	Nagen	Bouisset
Pourcentage massique de terre	25 %	83 %	85 %	28 %	24 %
Pourcentage massique de sable	61 %			55 %	60 %
Pourcentage massique de eau ajoutée	14 %	17 %	15 %	17 %	16 %
Teneur en eau du mortier humide	16 %	17 %			16 %
Masse volumique humide	2100 kg/m <sup>3</sup>	2025 kg/m <sup>3</sup>	non réalisé pour ces proportions		2060 kg/m <sup>3</sup>
Masse volumique sèche	1750 kg/m <sup>3</sup>	1680 kg/m <sup>3</sup>			1734 kg/m <sup>3</sup>

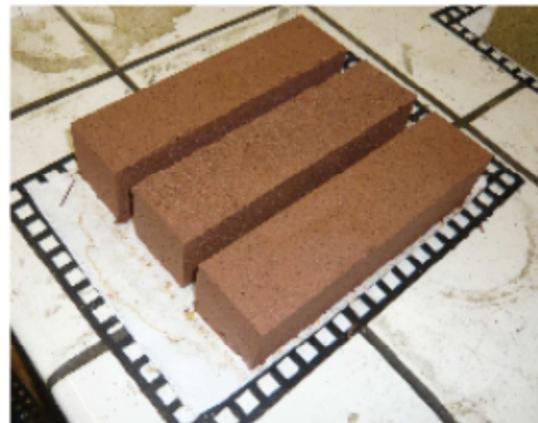
#### II.4 Fabrication des prismes de mortier (NF EN 1015-11), séchage et retrait

Des essais de retrait, résistance à la flexion et résistance à la compression sont à réaliser sur les enduits, préparés en prismes de 4x4x16 cm (dimensions standard pour les essais sur mortiers au liant hydraulique).

Les prismes de mortiers doivent être démoulés après 2 à 7 jours et stockés sur du papier posé sur une grille (Figure 6). Ils sont ensuite conditionnés avant les futurs essais à 23°C (± 2°C) et 50% d'humidité relative (± 5% HR) jusqu'à masse constante.

Ils doivent être âgés d'au moins 28 jours pour réaliser les essais suivants. On voit ici un défaut de ces normes : elles sont directement adaptées des normes mortier ciment. Le temps de séchage de 28 jours n'est pertinent que pour la prise hydraulique des ciments.

On a aussi été confronté à un problème de séchage : la terre n'ayant pas de prise hydraulique, les échantillons ne séchaient pas, emprisonnés dans leurs moules, et on ne pouvait pas non plus les démouler de risque de les endommager. La solution a donc été de les retourner sur un papier absorbant recouvrant une grille, afin de dévisser le fond du moule et ainsi permettre un meilleur séchage.



**Figure 6 : Fabrication et séchage des prismes de mortier d'enduit (4x4x16cm)**

Les échantillons ont été placés en atmosphère contrôlée, dans une enceinte climatique à 23°C et 50% d'humidité relative, après une dizaine de jours de séchage à température et humidité ambiantes.

Les échantillons sont ensuite pesés tous les jours afin de suivre la perte de masse d'eau due au séchage.

En seulement 4 jours, la masse ne varie plus, les échantillons sont donc secs. Le séchage aura donc duré 2 semaines au total en comptant les 10 jours de séchage à température ambiante, ce qui représente la moitié du temps de séchage préconisé (Figure 7).

Ces mesures confirment bien le caractère inadapté des préconisations de séchage du projet de norme.

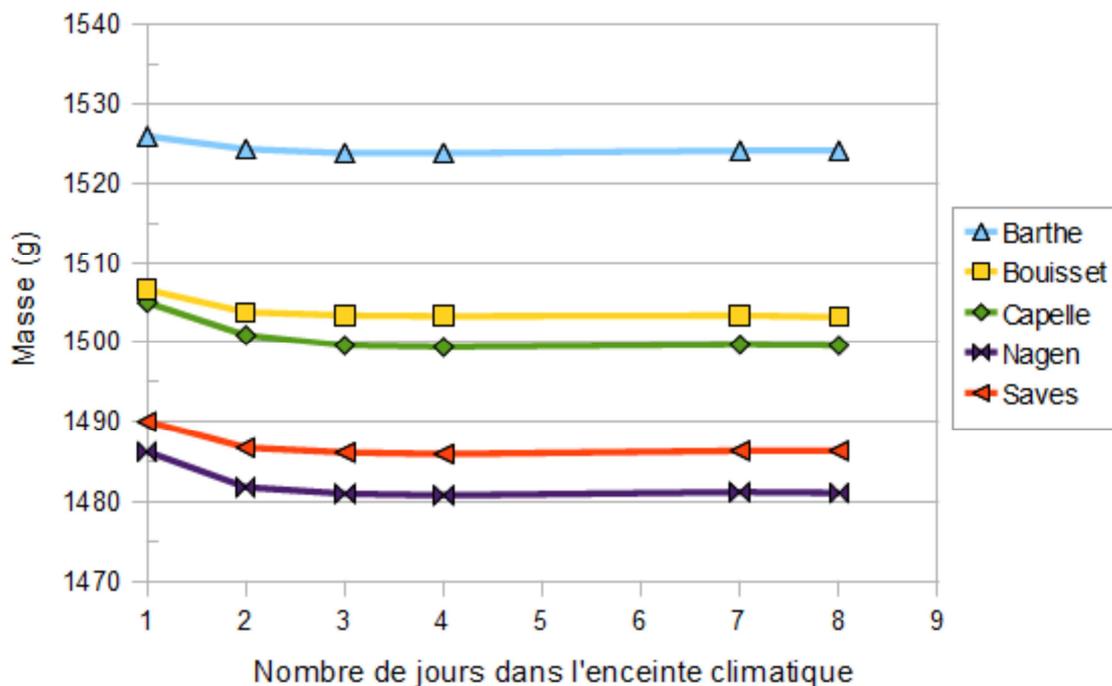


Figure 7 : Mise en évidence de la perte d'eau au cours du séchage

Le retrait linéaire des mortiers de terre crue est mesuré sur trois prismes de mortier après séchage. La mesure est effectuée sur le côté le plus long du prisme dans une demi-hauteur. Le retrait correspond à la modification de longueur du prisme par rapport à la longueur initiale en pour cent. Les résultats des mesures individuelles doivent être indiqués en arrondissant à une décimale près. La moyenne des trois prismes est également indiquée en arrondissant à une décimale près.

Le retrait est mesuré sur la plus grande longueur des prismes « 4x4x16(cm) » en prenant comme longueur initiale 160 mm.

Tableau 2: Retrait linéaire des éprouvettes d'essai

	Saves	Barthe	Nagen	Bouisset	Capelle
longueur	157,09	157,40	157,49	155,90	156,44
	156,93	157,55	157,97	156,09	156,96
	157,19	157,53	157,41	156,20	156,52
moyenne	157,1	157,5	157,6	156,1	156,6
retrait	1,8%	1,6%	1,5%	2,5%	2,1%

Les prismes ont un retrait inférieur à 3% ce qui permet au mortier, une fois étalé comme enduit en couche mince de ne pas (ou très peu) se fissurer. Ces valeurs apparaissent donc satisfaisantes vis-à-vis de la mise en œuvre du produit. Il est néanmoins surprenant de

constater que les plus forts retraits sont relevés sur le matériau issu de la carrière Bouisset, alors que celui-ci contient peu ou pas de smectites, contrairement aux autres briqueteries.

### II.5 Résistance à la flexion et à la compression (NF EN 1015-11)

L'essai de résistance à la compression et à la flexion est effectué sur trois prismes de mortier. Six échantillons pour l'essai de résistance à la compression ressortent de l'essai de flexion sur trois prismes entiers. L'essai doit être effectué en moins d'une heure après la sortie des échantillons de l'enceinte climatique où ils sont conservés. La rupture des échantillons doit se produire pour les 2 essais entre 30 et 90 s. Cela pourra être atteint en déviant de NF EN 1015-11 dont les vitesses de chargement pour des mortiers de terre crue habituels sont de 5 N/s lors de l'essai de la résistance à la flexion et de 50 N/s pour l'essai de la résistance à la compression. Les moyennes et valeurs particulières de l'essai de la résistance à la compression et à la flexion sont arrondies à une décimale près dans le rapport d'essais (unité : MPa).

#### Essais de flexion (montage manuel)

La résistance à la flexion d'un mortier est déterminée par chargement en trois points jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La presse prévue à cet effet (essais de flexion/compression sur mortier hydraulique) ayant un seuil de détection trop haut pour mes échantillons en terre, nous avons réalisé les essais de flexion en utilisant le module de flexion de la presse que nous avons chargé de masses de 1 kg (Figure 8).



Figure 8 : Essai de flexion réalisé à l'aide de masses de 1 kg

Tableau 3 : Résistances à la flexion

<i>Flexion</i>	<b>Nagen</b>	<b>Barthe</b>	<b>Saves</b>	<b>Bouisset</b>	<b>Capelle</b>
Charge max. éprouvette 1 (kg)	22,50	30,50	26,50	25,00	27,50
Charge max. éprouvette 2 (kg)	22,50	30,50	31,00	25,50	29,00
Charge max. éprouvette 3 (kg)	21,50	32,00	29,00	26,50	26,00
Charge max. moyenne (kg)	22,17	31,00	28,83	25,67	27,50
Correction tension ressort	21,17	30,00	27,83	24,67	26,50
Charge max (N)	207,57	294,20	272,95	241,90	259,88
<b>Résistance en flexion (N/mm<sup>2</sup> ou MPa)</b>	<b>0,49</b>	<b>0,69</b>	<b>0,64</b>	<b>0,57</b>	<b>0,61</b>

#### Essais de compression

Les essais de compression sont réalisés sur les deux parties de l'éprouvette cassée lors de l'essai de flexion. L'échantillon est placé dans une presse appliquant une charge jusqu'à la rupture du matériau (Figure 9).



**Figure 9 : Essai de compression**

**Tableau 4 : Résistances en compression**

<i>Compression</i>	<b>Nagen</b>	<b>Barthe</b>	<b>Saves</b>	<b>Bouisset</b>	<b>Capelle</b>
Compression 1	1,34	2,1	1,81	1,82	1,87
Compression 1'	1,28	2,22	1,76	1,72	1,84
Compression 2	1,3	2,1	1,83	1,78	1,71
Compression 2'	1,2	2,13	1,78	1,78	1,91
Compression 3	1,35	2,14	1,77	1,6	1,84
Compression 3'	1,27	2,12	1,69	1,56	1,87
<b>Resistance à la compression (N/mm<sup>2</sup> ou MPa)</b>	<b>1,29</b>	<b>2,14</b>	<b>1,77</b>	<b>1,71</b>	<b>1,84</b>

Les résistances obtenues pour les essais de flexion et de compression correspondent aux valeurs attendues par le projet de norme allemande pour la classe S I (Tableau 5).

**Tableau 5 : Classes de résistances du projet de norme allemande**

classe de résistance	résistance à la compression MPa	résistance à la flexion MPa	adhérence MPa
S I	0,4 à 2,5	≥ 0,3	≥ 0,05
S II	1,5 à 5,0	≥ 0,7	≥ 0,10

## II.6 Contrainte d'adhérence des enduits (NF EN 1015-12)

La force d'adhérence est mesurée comme la contrainte maximale de traction par charge directe perpendiculaire à la surface du mortier d'enduit appliqué sur un support. La force de traction est appliquée sur une pastille de traction déniée, collée sur la surface d'essai du mortier (Figure 10). La force d'adhérence est le rapport entre la charge de rupture et la surface correspondante.



**Figure 10 : Essai d'adhérence**

Des plaques de béton servent de support à l'enduit. Le support est frotté environ une heure avant l'application du mortier frais avec une brosse légèrement humide. L'application du mortier frais doit démarrer à partir du moment où la surface humide du support n'est plus brillante.

Le mortier frais est badigeonné sur la plaque de béton avec une légère impulsion puis nivelé avec une truelle. Après séchage, la surface est frottée. Les surfaces d'essai doivent être stockées au moins pendant 28 jours. Les 7 derniers jours avant l'essai, le stockage doit être mis en œuvre à  $23^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ) et 50% d'humidité relative ( $\pm 5\%$  HR). Le diamètre des échantillons dière de la norme NF EN 1015-12 avec un diamètre de 70 mm. Lors de l'extraction, les échantillons endommagés sont éliminés.

Il faut au moins 5 échantillons utilisables. Le temps de colle de la pastille sur les échantillons d'essai doit être supérieur à 24 h. Lors de l'essai, la rupture doit se produire dans une durée d'essai de 20 à 60 secondes.

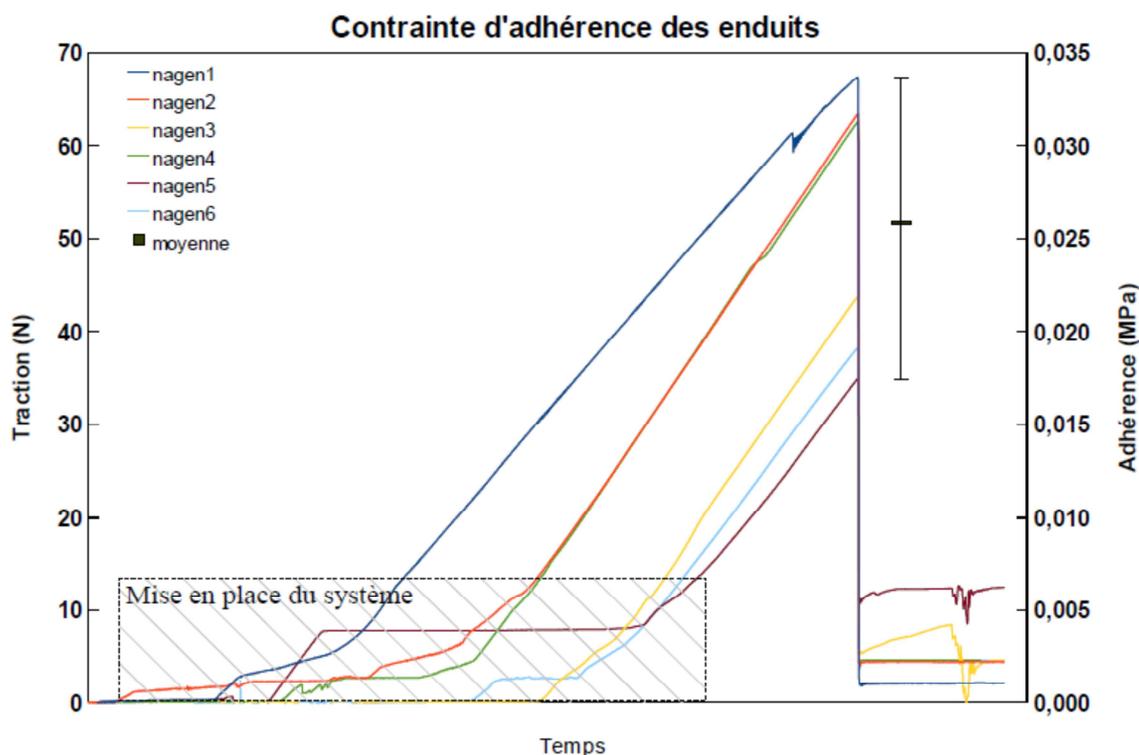
Les essais ont été adaptés aux disponibilités du laboratoire : les pastilles utilisées présentent un diamètre de 50 mm (semblable à la norme NF EN 1015-12), le séchage s'est déroulé à température et humidité ambiante (se rapprochant plus ou moins des spécificités de stockage demandées). Enfin comme précédemment les 28 jours de séchage (de prise hydraulique) n'ont pas lieu d'être. En effet, les enduits étaient secs en seulement quelques jours (environ une semaine).

L'appareil ayant un seuil de détection trop élevé, aucune valeur n'a été détectée. Nous avons dû concevoir à nouveau, un montage permettant de mesurer la charge maximale entraînant la rupture (Figure 11).



**Figure 11 : Dispositif arrachement à l'aide d'une presse équipée d'un capteur de pression**

Le dispositif se compose d'une presse utilisée en traction et d'un capteur de déformation relié à une centrale d'acquisition. Ce montage nous permet donc de suivre en temps réel la montée en traction jusqu'à la rupture à l'interface entre le mortier et le support (Figure 12). La charge maximale de traction avant la rupture nous permet donc de déduire la force d'adhérence.



**Figure 12 : Graphique obtenu à l'aide des données collectées (exemple de Nagen)**

Les différentes valeurs d'adhérence obtenues pour chaque enduit sont reportées dans le tableau 6.

**Tableau 6 : Résistances à l'arrachement (adhérence)**

Adhérence	Nagen	Barthe	Saves	Bouisset	Capelle
Traction 1 (N)	67,31	82,64	48,15	9,76	16,14
Traction 2	63,41	93,21	62,03	14,26	10,28
Traction 3	43,76	113,12	216,76	17,63	15,05
Traction 4	62,58	75,29	202,92	8,79	4,81
Traction 5	34,95		294,01		
Traction 6	38,27				
<b>Traction moyenne (N)</b>	<b>51,71</b>	<b>91,07</b>	<b>164,77</b>	<b>12,61</b>	<b>11,57</b>
<b>Adhérence (N/mm<sup>2</sup> ou MPa)</b>	<b>0,026</b>	<b>0,046</b>	<b>0,084</b>	<b>0,006</b>	<b>0,006</b>

Ces valeurs sont très dispersées et ne cadrent, pour la plupart, pas avec les valeurs attendues par la norme. Le nombre d'essai est cependant trop faible pour tirer des conclusions sur la tenue des enduits.

Il faut là aussi souligner le fait qu'il faille adapter les appareils d'essais afin de ne pas se retrouver en dessous des seuils de détection. En effet, plusieurs montages ont là encore été mis en œuvre afin de pallier aux problèmes d'appareillages.

Il est important de noter que l'adhérence dépend aussi du support et en particulier de son état de surface, or, il n'est pas assez mis en valeur dans la norme. Un support avec une surface normalisée serait peut-être à envisager à la place de plaques de béton préconisées par défaut, dont l'état de surface peut légèrement varier de l'une à l'autre.

L'application de l'enduit a aussi son importance mais elle n'est pas décrite dans cette norme. Or, les personnes devant réaliser ces essais ne sont pas forcément maçons. Ces essais ont été réalisés sans mise en œuvre spécifique et les valeurs obtenues sont relativement faibles. Or, après discussion de l'essai avec un maçon, il est apparu que le fait de « salir » la surface (appliquer une fine couche de mortier de terre très liquide) facilite l'accrochage de l'enduit. Un essai a donc été réalisé suivant ces recommandations et les résultats obtenus sont

nettement supérieurs aux résultats précédents (tableau 6). On obtient 0,096 MPa pour l'enduit Savès et 0,139 MPa pour l'enduit Barthe. Cette pratique est représentative d'une mise en œuvre sur chantier mais elle n'est pourtant pas mentionnée (ni proscrite) dans la norme. Il serait donc important de pouvoir comparer le protocole de mise en œuvre des essais allemands.

De nombreuses précisions semblent encore nécessaires pour une meilleure reproductibilité. Il n'est pas non plus évident que l'arrachement soit le mode de rupture le plus représentatif du comportement d'un enduit in situ (par rapport au cisaillement en particulier). C'est pour cela que des essais de cisaillement sont aussi envisagés, complétant les essais du projet de norme allemand par de nouveaux essais plus adaptés au matériau. Ils permettront de mesurer l'adhérence des mortiers d'enduits soumis à une contrainte de cisaillement. Ces essais comprendront un essai sur un banc de cisaillement en laboratoire mais aussi son équivalent in situ, réalisable sur chantier. Ces essais sont une des pistes qu'il serait intéressant d'explorer. Ils pourraient nous apporter des caractéristiques plus significatives sur les contraintes que subit un enduit pendant sa durée de vie.

### III Impact environnemental de la brique de terre crue

#### 1 INTRODUCTION

---

##### *a. Objectif*

L'objectif du projet TERCRUSO est d'améliorer les connaissances scientifiques des produits de construction en terre crue de la région Midi-Pyrénées. Les produits concernés dans ce projet de recherche sont les briques de terre crue et les enduits.

Ce projet permettra :

- d'enrichir les bases de données sur les caractéristiques des produits en terre crue,
- d'apporter des preuves scientifiques du bien-fondé de la construction en terre crue notamment dans notre région,
- de proposer des prescriptions pertinentes en fonction du type d'ouvrage et de l'utilisation des produits en terre crue,
- de proposer des essais et des procédures pour la caractérisation des produits en terre crue en vue de la future normalisation de ces produits.

##### *b. Partenaires*

Le projet TERCRUSO regroupe divers partenaires : laboratoires de recherches, Universités, partenaires institutionnels et partenaires industriels.

Au total, TERCRUSO rassemble 7 partenaires dont :

- Le Laboratoire Matériaux et Durabilité des Construction LMDC de L'Université Paul Sabatier Toulouse III et de l'INSA de Toulouse,
- Le Laboratoire de Recherche en Architecture LRA de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Toulouse,
- Le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées LRPC de Toulouse (CETE du Sud-ouest),
- L'association des Compagnons du devoir (Midi-Pyrénées),
- La région Midi-Pyrénées – Direction de l'Action Economique et de la Recherche,
- L'Association Régionale d'Eco construction du Sud-ouest ARESO,
- 6 briquetiers de Midi-Pyrénées : les briqueteries Barthe, Bouisset, Capelle, Nagen, Saverdun Terres cuites et Terres cuites du Savès.

*c. Les grandes étapes du projet de recherche TERCRUSO*

Le projet TERCRUSO s'articule autour de trois grandes étapes :

1. La caractérisation technique et environnementale des produits de terre crue actuellement fabriqués en Midi-Pyrénées,
2. Une réflexion sur les prescriptions pour ces matériaux en fonction des contraintes techniques et réglementaires actuelles ainsi que du type d'ouvrage et du type d'application visés,
3. Des recherches de solutions pour améliorer les caractéristiques des produits en terre crue régionaux.

## 2 CARACTERISATION ENVIRONNEMENTALE de la BRIQUE de TERRE CRUE

### a. Objectif du LRA

Le laboratoire de recherche en architecture LRA a pour objectif de caractériser la brique de terre crue de notre région du point de vue environnemental.

Ce travail a pour but de :

- recueillir l'ensemble des données nécessaires pour caractériser de manière succincte les impacts de la brique de terre crue,
- organiser les diverses données en vue de l'établissement à terme d'une ou plusieurs FDES Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire. (si obtention d'un financement)

Ce travail de recherche s'appuie également sur les différents travaux précédemment réalisés au sein de la structure (thèses, projets de recherche, etc.)

### b. Briquetiers participants au projet TERCRUSO

Six briquetiers de la région Midi-Pyrénées participent activement au projet de valorisation de la brique de terre crue.

Figure 1 : Carte de situation des 6 briquetiers participant au projet TERCRUSO dans la région Midi-Pyrénées

1	Briqueterie Barthe		31430 Gratens
2	Briqueterie Bouisset	Le Simou	81240 Albine
3	Briqueterie Capelle	route Labruyère	31190 Grepiac
4	Briqueterie Nagen	Saint Marcel Paulel	31590 Verfeil
5	Briqueterie Saverdun Terres cuites	Route de Canté	09700 Saverdun
6	Briqueterie Terres cuites du Savès	Le Couzin	31470 Empeaux

Figure 2 : Tableau récapitulatif des 6 briquetiers (adresses)

Dans le cadre de notre enquête, seules cinq briqueteries ont répondu aux diverses sollicitations de notre part : les briqueteries Barthe, Capelle, Nagen, Saverdun Terres cuites et Terres cuites du Savès.

### c. Méthode de travail

La méthode de travail mise en place par le LRA pour répondre aux attentes du projet TERCRUSO s'est articulée autour d'un travail d'enquête. L'objectif est de recueillir l'ensemble des données nécessaires à la caractérisation environnementale de la brique de terre crue dans notre région.

Une fiche détaillée a été élaborée afin de n'omettre aucune donnée nécessaire. Cette fiche a été réalisée dans le but de comparer rapidement les diverses données recueillies auprès des 6 briquetiers participant au projet. Elle traite du processus de fabrication d'une brique de terre crue sur l'ensemble de son cycle de vie. Nous l'avons donc articulé autour des différents points suivants :

- Etape 1 : EXTRACTION - terre carrière, machines utilisées, entrepôt, transports jusqu'à la briqueterie, consommation de l'étape 1.
- Etape 2 : PREPARATION, FABRICATION - matières premières, broyeur/ mélangeur/ concasseur/ désagrégateur, broyeur/ mélangeur, extruder/ projeter/ mouler, coupeur, mise en place sur châssis, séchoirs, palletisation, consommation de l'étape 2.
- Etape 3 : CHANTIER - transport (distribution vers chantier), mise en œuvre, consommation de l'étape 3.
- Etape 4 : VIE en ŒUVRE - entretien, consommation de l'étape 4.
- Etape 5 : FIN de VIE - déconstruction, recyclage, consommation de l'étape 5.
- Consommations totales : EDF, GDF, eau, propane, gaz, charbon, groupe électrogène...

Une fois cette première enquête réalisée, nous avons demandé une validation de notre recueil ainsi que des compléments (si nécessaire) auprès des briquetiers.

### d. Résultats

Les résultats qui ressortent de notre enquête sont les suivants. Pour plus de clarté, nous les avons scindés en 3 catégories : les matières premières utilisées, la consommation d'énergie et les types d'énergie consommée.

- **Matières premières**

Les 2 ingrédients de base pour la fabrication de brique de terre crue sont la terre (plus ou moins sableuse et argileuse) et l'eau. Pour les 5 briquetiers ayant validés notre enquête, la terre est extraite de leurs carrières respectives.

La briqueterie *Barthe* ajoute du chanvre dans le but de consolider la brique. La briqueterie *Terres cuites du Savès* y ajoute du sable et du sable de démoulage. Dans les deux cas, ces ajouts sont effectués pour compenser et / ou améliorer la qualité de la terre qui est soit trop friable, soit trop compacte.

- Consommations d'énergie

Les principales consommations d'énergie des briqueteries sont :

- les machines d'extraction de la terre en carrière et les engins de transport de la terre jusqu'aux briqueteries,
- les machines nécessaires à la fabrication des différents produits proposés par les briqueteries ainsi que l'utilisation de séchoirs,
- les fours de cuisson pour les produits cuits (principale production actuelle des briqueteries).

Pour chaque briqueterie, nous avons détaillé dans le tableau et graphique ci-dessous (voir figures 3 et 4) les diverses consommations par m<sup>3</sup> de terre produite. Ces consommations sont calculées en fonction des données recueillies pour chacune d'entre elles.

	Saverdun	Barthe	Capelle	Nagen	Savès
transport	0	1,34	4,62	1,89	0,8
consommations hors cuisson	248	760	247	204	301
consommations cuisson	1405	3194	706	1322	856
<b>Total consommation par kWh ep / m<sup>3</sup> de terre produite</b>	<b>1653</b>	<b>3955,34</b>	<b>957,62</b>	<b>1527,89</b>	<b>1157,8</b>
pourcentage transports	0%	0%	0%	0%	0%
pourcentage hors cuisson	15%	19%	26%	13%	26%
pourcentage cuisson	85%	81%	74%	87%	74%

Figure 3 : Tableau récapitulatif des consommations d'énergie et leur pourcentage

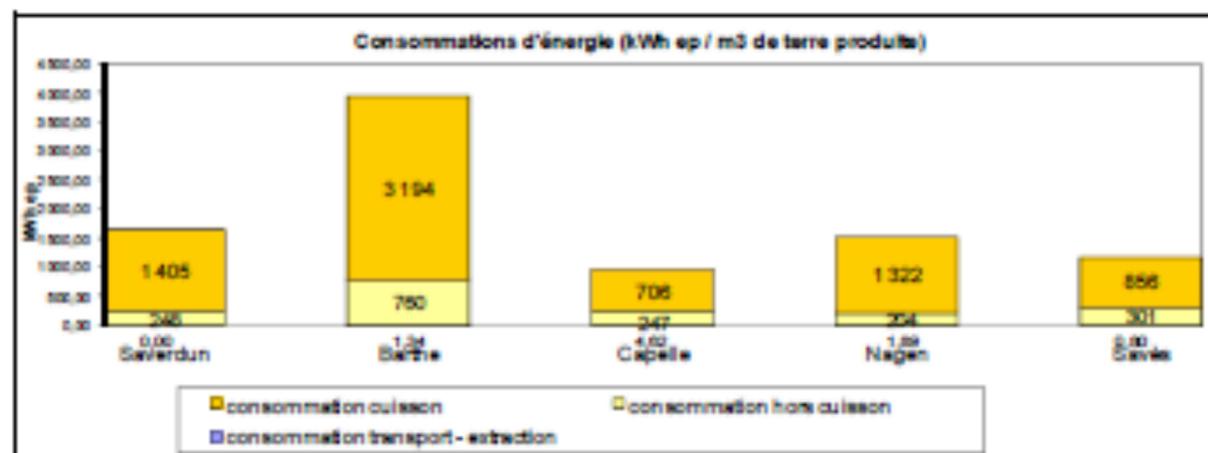
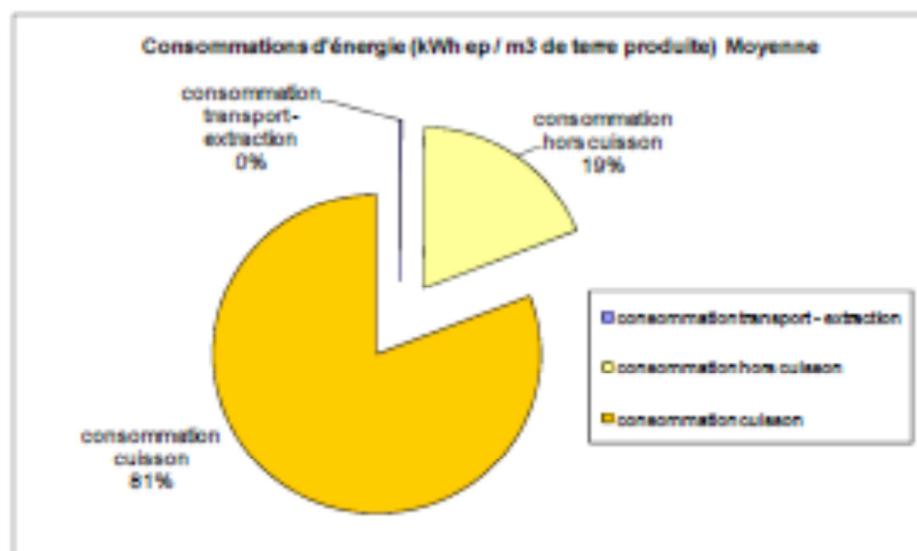


Figure 4 : Consommations d'énergie en kWh ep / m<sup>3</sup> de terre produite (tableau récapitulatif et graphique)

En moyenne, (voir figure 5 : consommations d'énergie – moyenne), la consommation liée au transport (extraction) est négligeable. Les diverses consommations hors cuisson correspondent à 19% des consommations totales. La consommation liée à la cuisson correspond quant à elle à 81 % des consommations additionnées.



Il est à souligner que la briqueterie *Saverdun Terres Cuites* a une consommation égale à 0. Les divers engins sont sous-traités. La briqueterie n'a donc pas connaissances des consommations et puissance des machines utilisées.

D'autres briqueteries nous ont seulement transmis les consommations liées aux engins de transport lui appartenant. La partie sous traitée n'a donc pas été additionnée pour les raisons citées précédemment.

La part transport au sein d'une briqueterie reste dérisoire en comparaison à la part liée à la cuisson des briques ou à leur fabrication mais devra être estimée dans le cadre d'une ACV plus complète.

La réduction des consommations au sein des briqueteries ne pourra se faire qu'en diminuant fortement la part liée à la cuisson. Ceci rend avantage aux produits en terre crue (produit ne nécessitant pas de cuisson pour leur mise en œuvre).

- Consommations par type d'énergie

Les consommations les plus importantes étant liées à la cuisson, le type d'énergie qui impacte le plus, pour chacune des briqueteries, est celui utilisé pour le fonctionnement des fours de cuisson des produits (voir figure 5 : Pourcentage des consommations par type d'énergie).

	Saverdun	Barthe	Capelle	Nagen	Savès
électricité	252,84	753,18	274,67	190,39	301
gaz	1400	0	679	1334	853
charbon	0	3200	0	0	0
Total consommation tous types confondus	<b>1652,84</b>	<b>3953,18</b>	<b>953,67</b>	<b>1524,39</b>	<b>1154</b>
pourcentage électricité	15%	19%	29%	12%	26%
pourcentage gaz	85%	0%	71%	88%	74%
pourcentage charbon	0%	81%	0%	0%	0%

Figure 6 : Pourcentage des consommations par type d'énergie

Le gaz (gaz naturel ou propane) est le type d'énergie le plus sollicité pour les briqueteries Saverdun Terres cuites, Capelle, Nagen et Terres cuites du Savès. La briqueterie Barthe est la seule briqueterie, à ce jour, à travailler à partir d'un four traditionnel utilisant du charbon (voir figure 7 : Consommations par type d'énergie en kWh ep / m3 de terre produite).

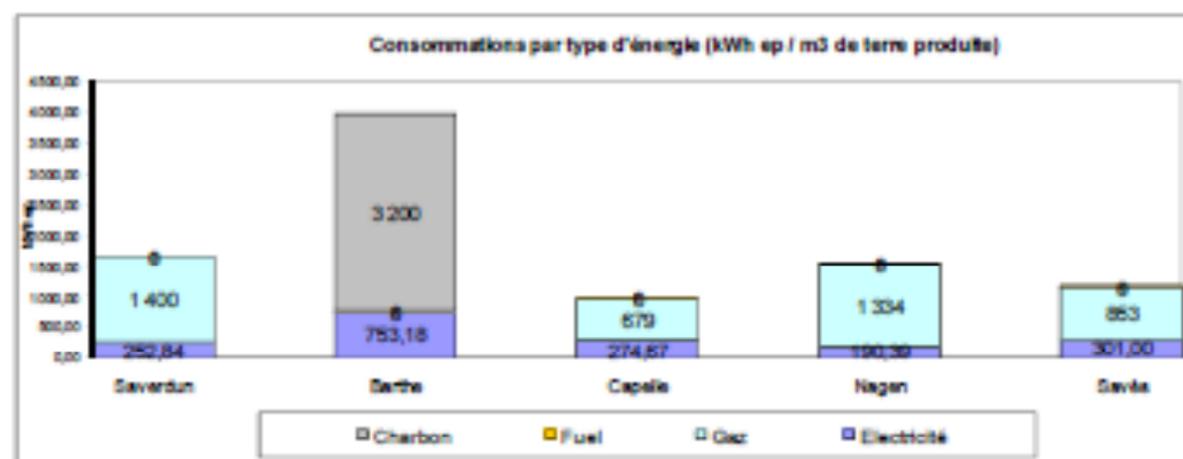


Figure 7 : Consommations par type d'énergie en kWh ep / m3 de terre produite

Remarquons que la quantité de kWh d'énergie primaire de charbon consommée est nettement supérieure à la quantité kWh d'énergie primaire de gaz pour des grandeurs (quantité de terre en m3) relativement proches (comparaison de la briqueterie Barthe avec les résultats des briqueteries Nagen et Terres cuites du Savès). Ceci est probablement lié à

une moindre efficacité des fours utilisés mais mérite des investigations supplémentaires pour être élucidé.

- Emissions de gaz à effet de serre – GES

Les émissions de gaz à effet de serre sont majoritairement dues à la cuisson des produits (voir figure 8 : Emissions de GES en kg eq CO<sub>2</sub> / m<sup>3</sup> de terre produite).

Les émissions produites par le charbon restent les plus importantes. Ce fait s'explique par une consommation plus importante d'énergie (quantité plus grande) dans la briqueterie concernée.

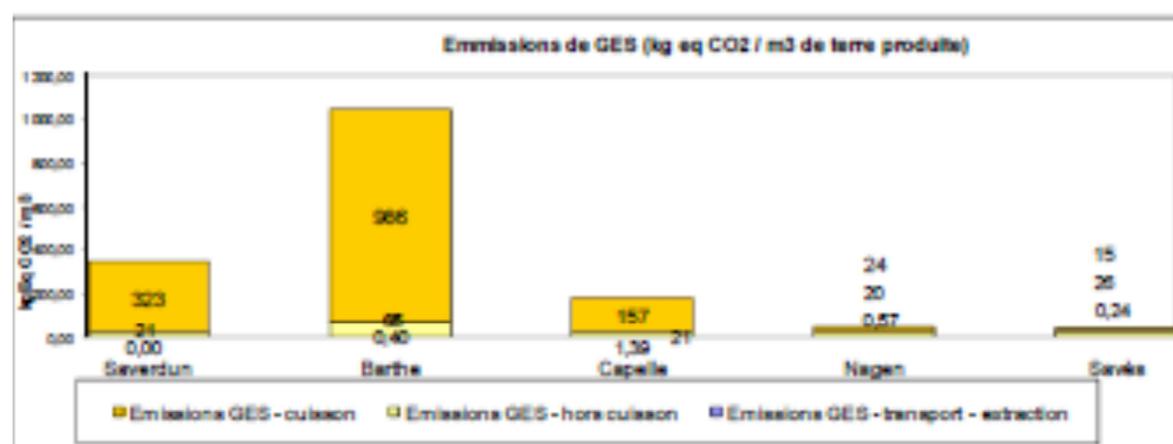


Figure 8 : Emissions de GES en kg eq CO<sub>2</sub> / m<sup>3</sup> de terre produite

Les différences d'émissions de GES pour le type d'énergie nommé gaz dans nos tableaux est du à la différence que nous avons fait entre des consommations de gaz naturel ou de propane. Le propane dégagerait moins de CO<sub>2</sub> que le gaz naturel.

Pour rappel, le type d'énergie consommé pour la cuisson des produits diffère d'une briqueterie sur l'autre. Pour plus de clarté, nous présentons dans la figure 9 le type d'énergie utilisé pour la cuisson pour chaque briqueterie.

TYPE ENERGIE FOUR	Saverdun	Barthe	Capelle	Nagen	Savès
gaz	x		x		
charbon		x			
propane				x	x
électricité	x		x	x	x

Figure 9 : Type d'énergie utilisé pour le fonctionnement des fours de cuisson

La part d'électricité utilisé, à l'exception de la briqueterie *Capelle* qui possède un four électrique, est minime. Elle y concerne seulement le lancement de moteurs nécessaires pour l'utilisation des fours à gaz ou au propane.

L'utilisation de produits en terre permet de diminuer fortement les consommations d'énergie de fabrication ainsi que les émissions de gaz à effet de serre.

Comme le montre la figure suivante, l'impact environnemental d'une brique de terre cuite est très nettement supérieure aux briques de terre crue étudiées dans notre projet de recherche.

Cette comparaison a été réalisée à partir du logiciel [COCON](#) qui permet de comparer, entre autre, différents matériaux de construction.

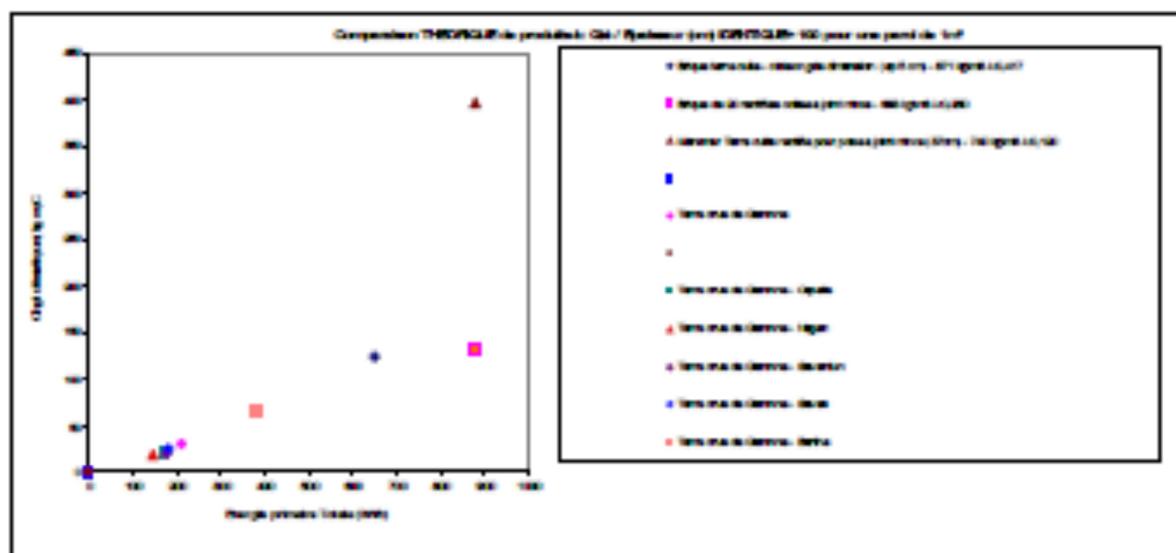


Figure 10 : comparaison de produits de construction – briques de terre crue et briques de terre cuite (monomur, ...)

#### Suites du projet

Il est nécessaire d'affiner les enquêtes afin de séparer les consommations d'énergie (électricité) liées aux locaux (bureaux, dépendances etc...) de celles concernant spécifiquement le process de fabrication des produits.

Il est également nécessaire de recueillir les données manquantes concernant la briqueterie Bouisset.

Enfin, il est nécessaire d'obtenir des financements en rapport avec les actions à mener à savoir le calcul d'ACV complètes et l'établissement d'une ou plusieurs FDES (Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire).

## **Bibliographie**

- [1] G. Astre. L'argile grumeleuse de coulière, couverture quaternaire de haut terrefort toulousain. 78e Congrès des Sociétés Savantes, Section des Sciences : 65-71, 1953.
- [2] BRGM. Notice carte géologique 1/50 000, Cazère.
- [3] BRGM. Notice carte géologique 1/50 000, Muret.
- [4] BRGM. Notice carte géologique 1/50 000, Saint Ponts.
- [5] BRGM. Notice carte géologique 1/50 000, Toulouse Est.

## ANNEXE

### Géologie des carrières

Cette annexe décrit la géologie des carrières non traitées dans le rapport. L'étude géologique a été réalisée à partir des cartes géologiques du BRGM ainsi qu'une étude de terrain sur le lieu d'extraction de chaque briqueterie.

Les carrières présentent toutes plus ou moins les mêmes faciès. Il s'agit d'une alternance d'épaisses couches d'argiles (et limons) et quelques couches de marnes, avec, plus rarement, des lentilles de sable.

#### A.1 Barthe



Figure A1 : Photo aérienne de la carrière de Barthe (source : géoportail.fr)

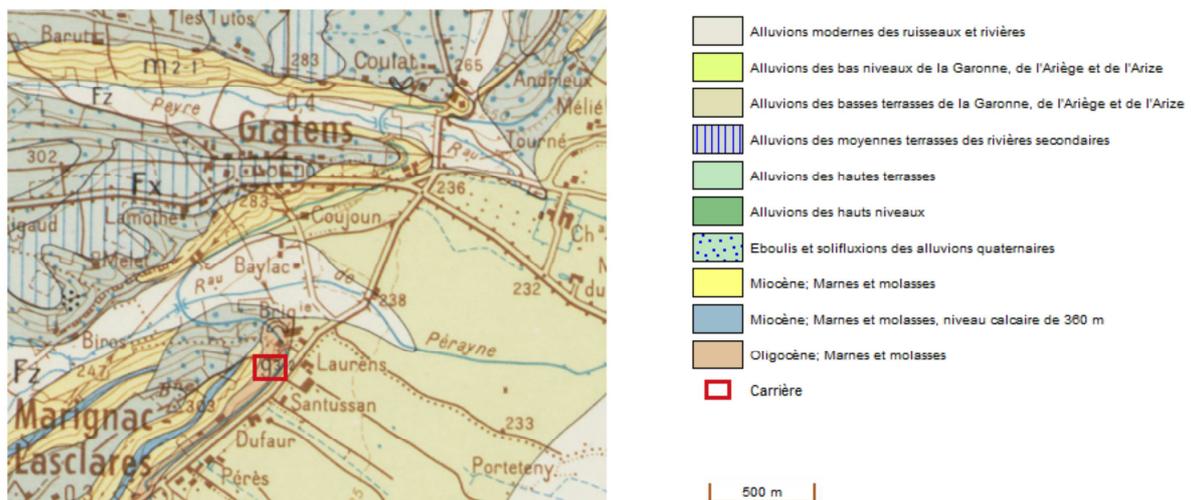


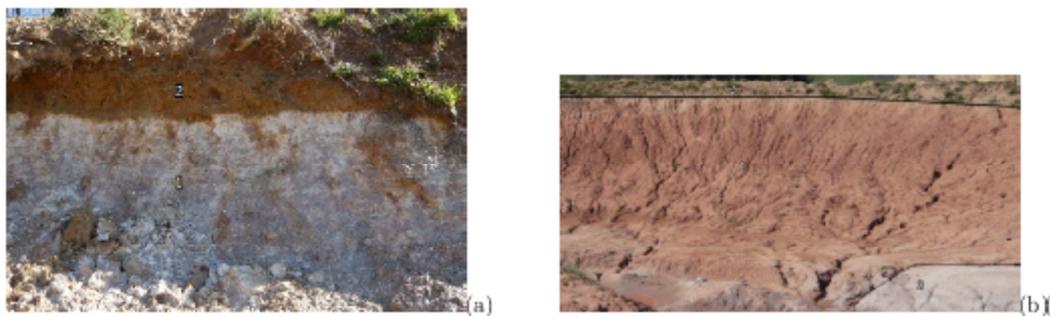
Figure A2 : Détail de la carte géologique de Cazère au 50000<sup>ème</sup> du BRGM

La carrière de la briqueterie Barthe se situe sur des formations de marnes et molasses oligocènes. La partie supérieure de cet ensemble forme l'Aquitanien, le plus souvent très argileux, que la plupart des carrières de terre à briques exploitent. Il peut contenir quelques bancs calcaires très localisés ainsi que des étages molassiques (sables fins parfois un peu cimentés par le calcaire) mais on y trouve quelques gros bancs marneux. Les argiles sont principalement des illites. [2]

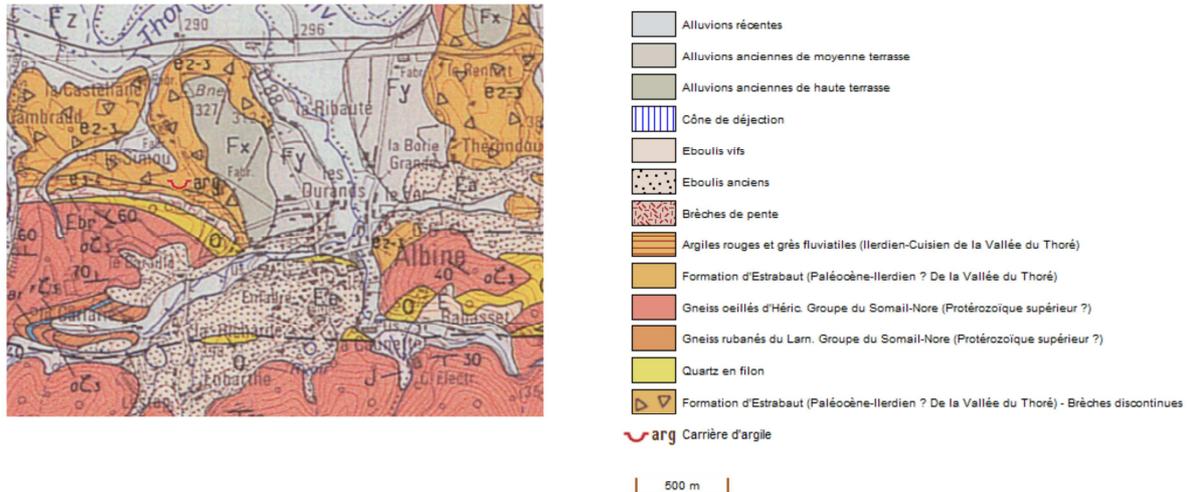
## A.2 Bouisset



**Figure A3 : Photo aérienne de la carrière de Bouisset (source : géoportail.fr)**



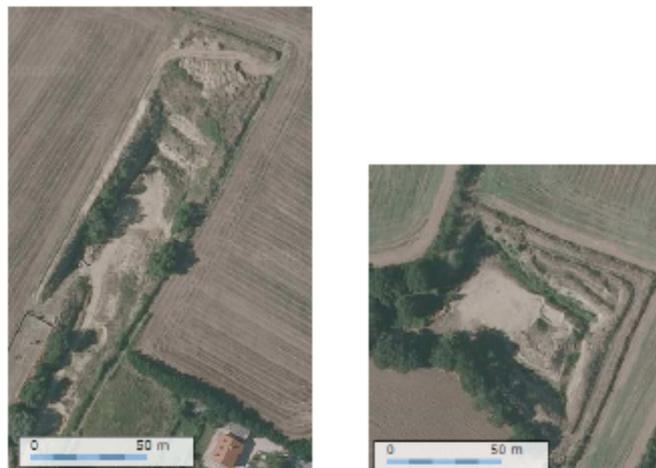
**Figure A4 : Affleurements d'argile blanche (a) et d'argile rouge(b) dans la carrière de Bouisset. (1) argiles, (2) sol et (3) sable.**



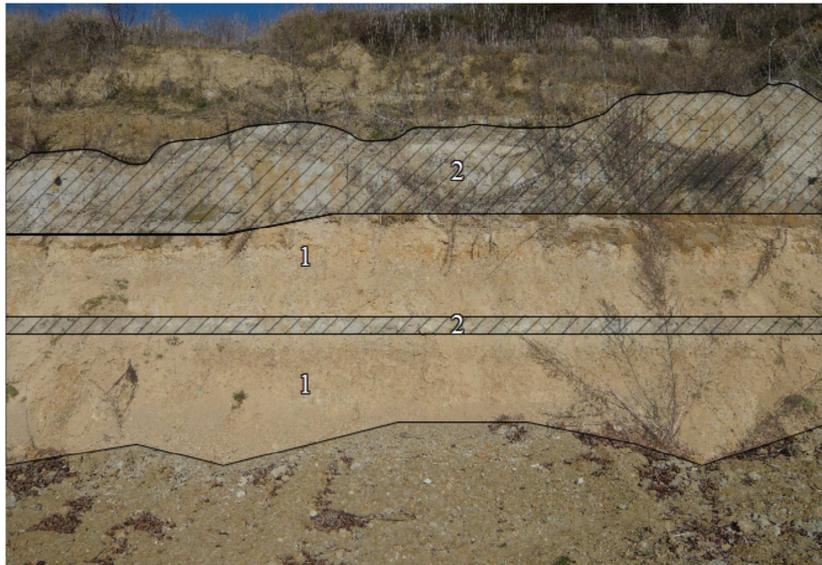
**Figure A5 : Détail de la carte géologique de Saint-Pons au 50000<sup>ème</sup> du BRGM**

La carrière de la briqueterie Bouisset se situe sur des formations d'argiles rouges et grès fluviatiles. Les couches y surmontent la formation conglomératique. Le faciès le plus constant correspond à des argiles ou argiles silteuses brun-rouge exploitées pour les briques et tuiles. Des traces de pédogenèse carbonatée s'observent localement au sein de ces argiles qui comportent localement à leur base des lentilles ou chenaux de grès blancs graveleux fluviatiles et des lentilles d'argiles grises à horizons ligniteux. Les argiles sont principalement des kaolinites. [4]

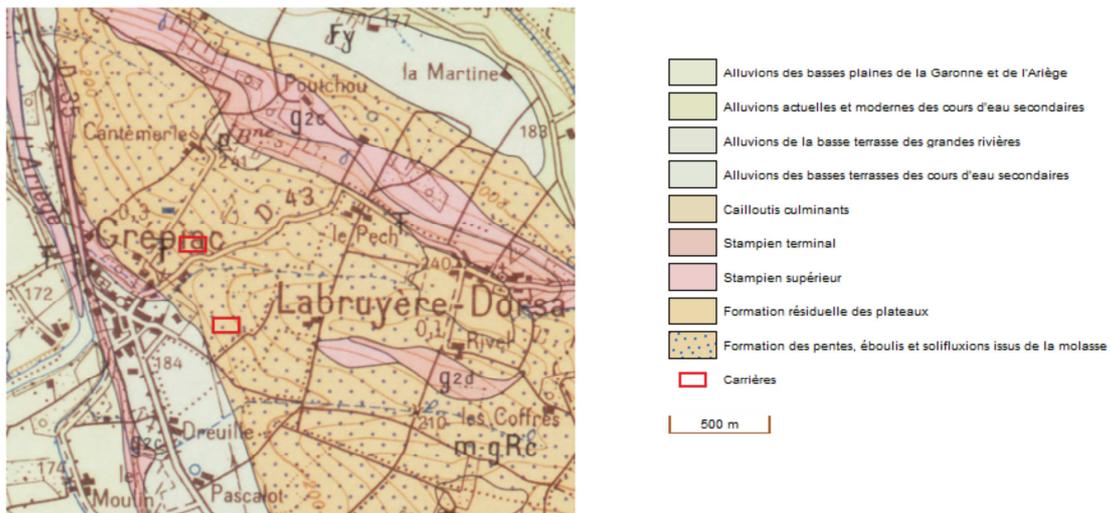
### A.3 Capelle



**Figure A6 : Photos aériennes des carrières de Capelle (source : géoportail.fr)**



**Figure A7 : Affleurement de couches d'argiles (1) et de marnes (2) dans la carrière de Capelle**



**Figure A8 : Détail de la carte géologique de Villefranche au 50000<sup>ème</sup> du BRGM**

Les carrières de la briqueterie Capelle se situent sur des formations de pente, d'éboulis et de solifluxions (glissement de terrain, de matériaux boueux), comme le précise la notice des cartes géologique du BRGM [5, 6]. Tous les versants à faible pente des molasses et des marnes stampiennes sont recouverts d'une formation argilo-limoneuse de plusieurs mètres d'épaisseur. Cette formation est très hétérogène avec à la base de la molasse décomposée avec des blocs de marne arrachés et bousculés, et quelques petites lentilles de sable et de graviers dans les creux. Ce substratum est recouvert par des coulées argileuses qui ont nivelé tous les sillons, de haut en bas des pentes. Celles-ci peuvent alors être très faibles, et la solifluxion qui les recouvre donne une formation argileuse parfois rubéfiée, toujours décalcifiée. Cette formation que G. Astre a appelé l'argile grumeleuse de coulière [1] a été mise en place par des agents divers, et à plusieurs reprises. Les argiles sont principalement des illites.

#### A.4 Terre Cuites du Saves



Figure A9 : Photo aérienne de la carrière de Savès (source : géoportail.fr)

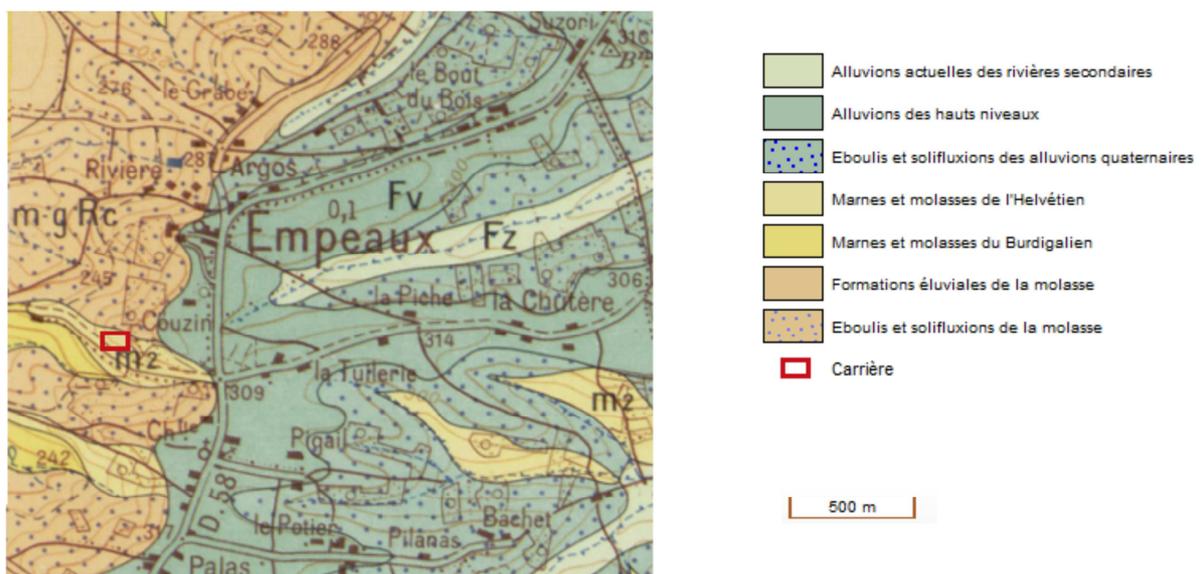


Figure A10 : Détail de la carte géologique de Muret au 50000<sup>ème</sup> du BRGM

La carrière de la briqueterie Terres Cuites du Saves se situe sur des formations de marnes, argiles et molasses, conservées sous la protection de la couche d'alluvions. Les argiles sont principalement des illites. [3]