

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES – UNIVERSITE PAUL
SABATIER TOULOUSE III

LABORATOIRE MATERIAUX DURABILITE DES CONSTRUCTIONS

Rapport « Année-2 » du projet TERCRUSO :
avril 2013

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



SOMMAIRE

I Rappel des objectifs du projet Tercruso et présentation du rapport	2
II Réflexions sur les caractéristiques mesurées	5
III Caractérisation des sols utilisés dans la fabrication des briques de terre crue	8
<i>III.1 Caractérisation chimique</i>	8
<i>III.2 Caractérisation physique</i>	9
<i>III.3 Caractérisation minéralogique</i>	9
IV Résistance en compression et tenue à l'eau des briques de terre crue	11
<i>IV.1 Résistances en compression</i>	11
<i>IV.2 Tenue à l'eau</i>	12
V Propriétés hygrothermiques des briques de terre crue	13
<i>V.1 Isothermes de sorption et désorption</i>	13
<i>V.2 Perméabilité à la vapeur d'eau</i>	15
<i>V.3 Effusivité thermique</i>	16
<i>V.4 Chaleur massique</i>	16
<i>V.5 Conductivité thermique</i>	16
VI Conclusions	18
Bibliographie	20
Annexes	21
<i>Procédures pour les mesures des propriétés hygrothermiques</i>	21

I Rappel des objectifs du projet Tercruso et présentation du rapport

Le projet Tercruso 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 Tercruso, 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.

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.

Au démarrage de ce projet, nous avons dépensé beaucoup d'énergie à la recherche de financements. En effet, même regroupés, les petits briquetiers de Midi-Pyrénées n'avaient pas les ressources suffisantes pour financer un programme de recherche de cette envergure. Notre programme ayant une identité régionale marquée et étant très lié à l'écologie et aux économies d'énergie, nous pensions recevoir de l'aide auprès de la Région et de l'ADEME. Nous avons scindé notre recherche de financement en deux (essentiellement pour rentrer dans les « cases » de certains appels à projet) :

- du financement pour des frais liés à l'investissement et au fonctionnement,
- du financement pour payer un doctorant durant 3 ans.

Nous avons réussi à obtenir un financement de la Région pour de l'investissement et du fonctionnement sur 2 ans à travers un appel à projet Recherche et Transfert de Technologie. Dans ce financement, les briquetiers partenaires amènent une contribution totale de 9000 €.

Par contre, nous n'avons pas réussi à obtenir un financement pour un doctorant. Nous avons reçu un accueil positif de la région et de l'ADEME mais chacune de ces deux institutions a un appel à projet pour le financement de doctorant qui lui est propre dans lequel il faut systématiquement trouver un cofinancement. Le plus simple aurait été que la Région soit le cofinancier de l'ADEME (ou vice versa) comme c'est le cas dans de nombreuses régions mais pour des raisons administratives et de dates de dépôt de dossier, cela n'est pas possible en Midi-Pyrénées. Nous avons cherché en vain d'autres cofinanciers : le PRES de Toulouse, certains conseils généraux de Midi-Pyrénées et même la Mairie de Toulouse...

Le fait de ne pas avoir de chercheur travaillant à temps plein sur le projet nous a considérablement ralentis. Nous avons eu recours à quatre masters (stage de 5 à 6 mois) pour réaliser les essais :

- **TRAN Thanh Tung** (janvier à juillet 2010) : stage au LMDC qui a essentiellement porté sur la caractérisation des terres et sur les caractéristiques de base des 5 briques (résistance à la compression et conductivité thermique)

- **KUNWUFINE Deodonne** (janvier à juillet 2011) : stage au LMDC qui a complété le stage précédent et porté essentiellement sur la caractérisation des 5 briques en utilisant les procédures du projet de norme allemande (résistances et tenue à l'eau).
- **DELINIÈRE Rémi** (janvier à juillet 2011) : stage au LRPC (Dalett, cete sud-ouest) qui a porté sur la caractérisation des mélanges préfabriqués pour enduits produits par les 5 briquetiers. Les procédures utilisées ont été celles proposées dans le projet de norme allemande.
- **CAGNON Hugo** (janvier à juillet 2012) : stage au LMDC (l'indemnité de stage a été payée par les 5 briquetiers) qui a porté sur les mesures des propriétés hygrothermiques des 5 briques de terre crue.

Les résultats du projet tercruso sont présentés dans 3 rapports :

- un rapport rédigé par Laure Fernandez, Luc Floissac et Hans Valkhoff (LRA) sur l'impact environnemental de la brique de terre crue,
- un rapport rédigé par Rémi Delinière sur la caractérisation des enduits en terre crue,
- et, enfin, ce présent rapport rédigé par Jean-Emmanuel Aubert (LMDC) qui regroupe les résultats des essais menés durant les 3 stages effectués au LMDC.

II Réflexions sur les caractéristiques mesurées

Lorsque nous avons démarré ce projet de recherche, nous avons réfléchi aux caractéristiques à déterminer ainsi qu'aux procédures pour les mesurer. Pour cela, nous avons commencé à nous référer à la réglementation française existante à travers 2 textes :

- le DTU 20.1 « Ouvrages en maçonnerie de petits éléments – Parois et murs » qui portent sur les caractéristiques des petits éléments de maçonnerie (blocs béton et briques de terre crue) (2008),
- la norme XP P13-901 « Blocs de Terre Comprimée (BTC) pour murs et cloisons » (2001).

Nous avons constaté que le DTU 20.1 n'est pas très utile à notre problème car les caractéristiques mesurées et notamment les procédures utilisées ne sont pas adaptables à la terre crue essentiellement à cause de sa faible tenue à l'eau.

Quant à la norme expérimentale française sur les BTC, elle a une utilisation limitée :

- le domaine d'application de cette norme a été restreint à des blocs destinés à des ouvrages non soumis à des sollicitations de gel-dégel,
- cette norme concerne essentiellement les matériaux stabilisés et si l'on fait le bilan des essais à réaliser sur les BTC non stabilisées, il ne reste plus que la mesure de la résistance à la compression sèche avec une procédure très contestée qui consiste à casser l'éprouvette en deux et à maçonner les deux moitiés l'une sur l'autre à l'aide de mortier de ciment.

Après des compléments bibliographiques et des discussions dans le projet Tercruso, nous avons décidé de nous intéresser à trois types de caractéristiques :

- Tout d'abord, les résistances mécaniques que nous avons limitées dans un premier temps à la **résistance en compression**.
- Ensuite, il nous a paru important de quantifier les **propriétés hygrothermiques** de ces matériaux : conductivité thermique et chaleur spécifique (ce qui permet ensuite de calculer d'autres caractéristiques telles que l'effusivité) ainsi que la perméabilité et la sorption-désorption de vapeur d'eau.
- Enfin, lorsque l'on parle de construction en terre crue non stabilisée, on nous renvoie systématiquement le problème de la **tenue à l'eau**. Les venues d'eau ont principalement deux origines :

- météoriques si la terre crue est exposée sur une paroi extérieure (dans ce cas, il existe des règles ancestrales de construction pour éviter les problèmes (orientation des murs en terre crue, avancées de toit, ...))
- par l'intermédiaire des mortiers frais utilisés pour les joints ou pour les enduits. Il est donc nécessaire d' « imaginer » des essais et des critères qui permettent de rassurer les futurs utilisateurs sur la tenue à l'eau des briques.

Autant des procédures existent pour les deux premiers points même si nous avons du parfois les adapter à notre matériau, autant pour le dernier point, nous n'avons jusqu'à récemment pas trouvé d'essais proposés dans la littérature. Au début de l'année 2011, cette partie de nos travaux sur la terre crue a connu une évolution importante avec la sortie de trois projets de normes allemandes sur les mélanges prêts à l'emploi pour les enduits en terre crue, les mélanges prêts à l'emploi pour les mortiers de pose en terre crue et les briques de terre crue. Il est important de faire remarquer que ces trois projets de normes ne portent que sur la terre non stabilisée. Le détail de la norme sur les briques ne sera pas présenté ici mais nous ne présenterons ce qui nous a été utile dans le cadre du projet tercruso à savoir les essais utilisés par les allemands pour caractériser leur brique et notamment du point de vue de leur tenue à l'eau.

Premièrement, les allemands proposent de distinguer 4 classes d'utilisation des briques de terre crue en fonction des risques liés à la présence d'eau comme présenté dans le tableau 1.

Tableau 1 : Classes d'application des briques de terre crue (norme allemande)

Champ d'application	Classe d'application
Murs extérieurs enduits et exposés aux intempéries à colombages apparents	Ia
Murs extérieurs enduits sur toute la surface et exposés aux intempéries	Ib
Mur extérieur revêtu, à l'abri des intempéries Murs et cloisons intérieurs	II
Applications sèches (p. ex. remplissages de plancher ou de mur)	III

Ensuite, il existe de nombreuses caractéristiques à mesurer mais nous ne nous attarderons que sur deux d'entre elles. Tout d'abord, la procédure pour la mesure de la résistance à la compression qui est originale : elle se fait sur briques entières selon le sens de pose de la brique sauf dans le cas de briques dont la hauteur est inférieure à 71 mm. Dans ce cas, il faut réaliser l'essai de la norme XP P13-901 à savoir casser la brique en deux et maçonner les deux parties l'une sur l'autre à l'aide d'un mortier de ciment ou de plâtre. Les classes de résistance définies d'après les résultats obtenus sur au moins six corps d'épreuve sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Classes de résistance à la compression (norme allemande)

Classes de résistance à la compression	Résistance à la compression (MPa)	
	Valeur moyenne	Plus petite valeur
0	Aucun critère	Aucun critère
2	2.5	2.0
3	3.8	3.0
4	5.0	4.0
5	6.3	5.0
6	7.5	6.0

De même, cette norme propose de réaliser trois essais pour étudier la tenue à l'eau de ces briques non stabilisées (plus un essai pour le comportement au gel-dégel) :

- un essai d'immersion où les briques sont immergées pendant 10 minutes dans de l'eau et où l'on mesure la perte de masse subie,

- un essai par contact où l'on place une compresse humide à la surface de la brique durant 24 heures à l'abri de la dessiccation. L'éprouvette est ensuite conservée pendant 2 jours dans une atmosphère à 23°C et 50% HR. L'examen est visuel et l'éprouvette ne doit présenter ni gonflement ni fissure.
- un essai par absorption capillaire où la brique est posée sur un matériau fortement capillaire lui-même immergé en partie dans l'eau. L'éprouvette est observée au bout de 30 minutes, 3 heures et 24 heures et on note le temps au bout duquel des fissures apparaissent (un gonflement seul ne suffit pas).

Les critères relatifs à ces quatre essais sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 3 : Comportement au gel et à l'humidité (norme allemande)

Classe d'application	Essai par immersion Perte de masse (%)	Essai par contact	Essai d'absorption capillaire (Heures)	Essai au gel (Nombre de cycles)
la	≤ 5	Aucune fissure ni gonflement	≥ 24	≥ 15
lb			≥ 3	≥ 5
II	≤ 15		≥ 0.5	Aucun critère
III	Aucun critère			

Ces différents essais de la norme allemande ont été réalisés dans le cadre du projet Tercuso. D'autres essais que l'on avait mis en place avant l'apparition de ces projets de normes ont également été réalisés. La suite du rapport va s'articuler autour de 3 parties :

- la caractérisation chimique, physique et minéralogique des terres utilisées dans la fabrication des briques de terre crue,
- la résistance en compression et la tenue à l'eau des briques de terre crue,
- les propriétés hygrothermiques des briques de terre crue.

III Caractérisation des sols utilisés dans la fabrication des briques de terre crue

Dans la suite de ce chapitre, les mélanges utilisés pour la confection des briques seront désignés par une lettre. En fonction de la nature des terres issues de leur carrière, les briquetiers utilisent ou non un « dégraissant ». Le « dégraissant » est un matériau qui permet de réduire la proportion d'argile dans les terres. La plupart du temps c'est un « sable » prélevé dans une autre partie de la carrière ou dans d'autres cas plus rare, le sable est acheté à l'extérieur. Le cas de la brique de Barthe est particulier puisque le chanvre ajouté à ces terres est essentiellement utilisé comme dégraissant.

Au démarrage de cette étude, nous souhaitions étudier séparément les terres et les dégraissants éventuels des différentes briqueteries. Ceci s'est avéré assez complexe car dans certaines briqueteries, les matériaux sont homogénéisés à la pelleuse directement à la carrière et il est assez difficile de maîtriser la qualité et la quantité des matériaux mélangés. Aussi, nous avons trouvé plus simple de caractériser uniquement les mélanges utilisés pour la confection des briques.

Avant de passer à la présentation des résultats, il est nécessaire de faire quelques commentaires sur les origines des différents matériaux que nous avons testés. Tous les échantillons provenant de la vallée de la Garonne sont d'aspects similaires (couleur beige classique) sauf la terre de Bouisset qui est rouge et dans laquelle on retrouve beaucoup de mica (paillettes brillantes) observables surtout lorsque la terre est humide. L'ancien adobe a été prélevé dans une bâtisse de la région de Caraman (31). Dans cet échantillon, on peut observer la présence de grains de quelques millimètres de calcaire.

III.1 Caractérisation chimique

Le tableau 4 présente les compositions chimiques des terres utilisées pour la fabrication des briques.

Tableau 4: Compositions chimiques des mélanges utilisés dans les briques (%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF	Total
Ancien adobe	55.9	11.7	3.4	0.0	1.2	11.0	0.5	2.4	0.4	0.2	14.0	100.6
Barthe	57.5	14.0	4.8	0.1	2.0	6.1	0.5	2.5	0.6	0.1	10.5	98.8
Bouisset	64.7	16.6	4.8	0.0	1.1	1.1	0.2	4.0	0.6	0.1	6.4	99.6
Capelle	57.7	14.8	4.9	0.1	1.9	6.0	0.6	3.1	0.6	0.2	11.1	100.9
Nagen	63.1	13.2	3.7	0.0	1.7	4.9	1.0	3.1	0.4	0.1	8.8	100.2
Savès	58.9	16.0	5.7	0.1	1.7	4.2	0.8	2.7	0.7	0.1	8.9	99.8

Les compositions des différents mélanges sont apparemment assez proches mais des particularités peuvent être soulignées :

- l'élément le plus variable est le calcium : on remarque qu'il est très abondant dans l'ancien adobe et presque nul dans la brique de Bouisset. La présence de cet élément est essentiellement liée à la proportion de calcaire présent dans le sol (on retrouve d'ailleurs la même tendance et les mêmes différences sur les valeurs de la perte au feu).
- les teneurs en fer sont assez proches les unes des autres malgré la différence de couleur marquée entre la terre rouge de Bouisset et les autres terres. La couleur des sols est essentiellement liée aux oxydes de fer mais pas forcément à la proportion mais plutôt à la nature des phases minéralogiques qui contiennent ces oxydes de fer.

III.2 Caractérisation physique

La figure 2 présente les courbes granulométriques des six mélanges étudiés obtenues par tamisage sous eau pour les particules supérieures à 80 µm et par sédimentométrie pour les particules inférieures à 80 µm.

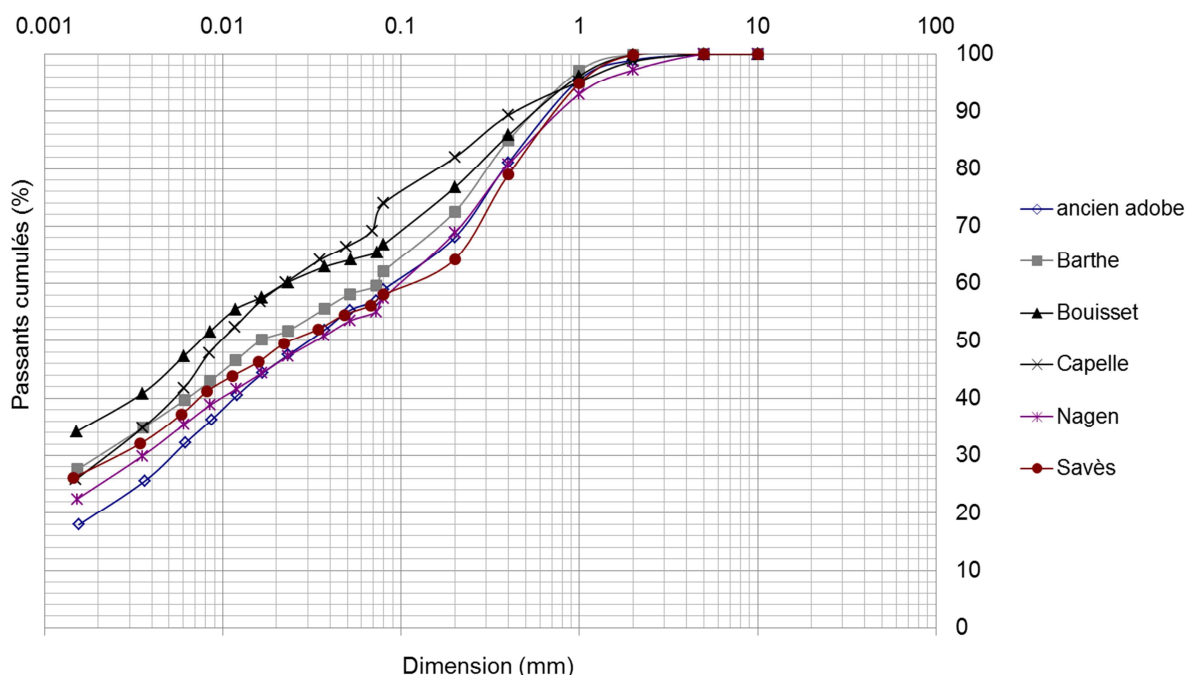


Figure 2 : Granularité des mélanges (tamisage par voie humide et sédimentométrie)

Afin de comparer plus facilement ces courbes, le tableau 2 présent les valeurs des D90, D50 et du passant à 2 µm qui est souvent considéré comme la teneur en argile d'un sol.

Tableau 5 : Caractéristiques granulaires des mélanges

	Ancien adobe	Barthe	Bouisset	Capelle	Nagen	Savès
D90 (µm)	700	550	550	400	800	700
D50 (µm)	30	17	7.5	9.5	35	20
Passant à 2 µm (%)	20	30	38	29	23	29

Les caractéristiques granulaires des six mélanges sont assez variables surtout pour la valeur du D50 qui varie de 7.5 µm pour la brique de Barthe à 35 µm pour celle de Nagen. Les valeurs du tableau 2 montrent que la brique de Nagen est celle qui est la plus proche de l'ancien adobe. Si la nature des espèces minéralogiques et des argiles en particulier sont identiques pour ces deux briques, elles devraient avoir des comportements similaires (la seule différence serait alors la mise en place : extrusion pour Nagen et moulage pour l'ancien adobe). Nous verrons que ces briques ont pourtant des comportements très différents notamment en ce qui concerne leur tenue à l'eau.

III.3 Caractérisation minéralogique

La caractérisation minéralogique des mélanges est excessivement complexe et nous avons prévu de réaliser une étude qualitative et quantitative des phases contenues dans les différents mélanges en couplant plusieurs outils (DRX, analyses thermiques, composition chimique, calcimétrie...).

Il reste encore du travail pour atteindre des compositions minéralogiques quantitatives fiables mais nous pouvons déjà donner les compositions minéralogiques qualitatives des différents mélanges (tableau 6).

Tableau 6 : Compositions minéralogiques qualitatives des mélanges

		Ancien adobe	Barthe	Bouisset	Capelle	Nagen	Savès
Goethite	FeOOH			X			
Muscovite	Mica			X			
Albite	Feldspaths	X	X		X	X	X
Orthose				X		X	
Illite	Argile	X	X		X	X	X
Montmorillonite		X	X		X	X	X
Chlorite			X		X	X	X
Kaolinite					X		
Quartz	SiO ₂	X	X	X	X	X	X
Calcite	CaCO ₃	X	X	faible	X	X	X

Nous pouvons voir que deux types d'échantillons se distinguent :

- ceux de la vallée de la Garonne (ancien adobe, Barthe, Capelle, Nagen et Savès) qui contiennent du quartz, de la calcite, des feldspaths et comme argile de l'illite, de la montmorillonite et de la chlorite,
- le mélange de Bouisset qui contient du quartz, des feldspaths, des micas et comme argile de la kaolinite.

Ces différences marquées de minéralogie permettront de voir si la minéralogie (et en particulier la nature des argiles) a un effet sur les caractéristiques des briques de terre crue. Il serait intéressant d'aller plus loin en connaissant la teneur de chacune de ces phases (et notamment des phases argileuses) ce qui pourrait être très utile pour interpréter les éventuelles différences de comportement de ces mélanges. Cette partie du travail est encore en cours à la rédaction de ce rapport.

IV Résistance en compression et tenue à l'eau des briques de terre crue

IV.1 Résistances en compression

Le tableau 7 présente les six briques étudiées dans le projet Tercruso. Dans ce tableau sont présentées les teneurs en eau des briques au moment de l'essai ainsi que les masses volumiques sèches mesurées après séchage à 50°C.

Deux procédures ont été suivies pour la mesure de la résistance à la compression:

- celle de la norme allemande,
- une procédure que nous avons mise en place pour nos essais et qui consiste à préparer des échantillons de dimensions 5*5*10 cm et à les écraser directement en compression (dans le sens de la hauteur pour avoir un élancement de 2 et ainsi réduire les effets du frettage) avec une vitesse de chargement imposée de 0.2 kN/s.

Dans les deux cas, les échantillons ont été conservés à 20°C et 50% HR jusqu'à masse constante, la teneur en eau des éprouvettes en terre crue pouvant faire varier de manière très importante leur résistance en compression. Le nombre d'échantillons testés est variable allant de 3 à 6. Pour des raisons de clarté, nous n'avons pas présenté tous les résultats mais uniquement les valeurs minimales et maximales ainsi que la moyenne obtenue (en gras).

Tableau 7 : Présentation des briques et résistances en compression

	Unité	Ancien adobe	Barthe	Bouisset	Capelle	Nagen	Savès
Dimensions	cm	5x27x40	5x10.5x22	8x15x37	10x10x33	5x13.5x40.5	5x10.5x22
Type	-	Moulée	Extrudée chanvrée	Extrudée	Extrudée	Extrudée	Moulée
$\rho_{\text{sèche mesurée}}$	g/cm ³	1.66	1.98	2.02	2.06	2.00	1.89
R_c allemand	MPa	Non mesurée	3.9-5.4 4.7	2.8-4.7 3.6	3.5-5.3 4.5	5.8-6.4 6.2	3.1-3.3 3.2
R_c 5*5*10		1.2-2.5 2.0	4.0-4.5 4.3	3.4-3.8 3.6	3.3-5.3 4.5	4.9-5.3 5.1	2.6-3.6 3.0
Classe allemande	-	-	3	2	3	4	2

Nous constatons, tout d'abord, que les résistances obtenues sur éprouvettes 5*5*10 cm sont très proches malgré des différences de mélanges (terres différentes, briques chanvrées ou non), de modes de fabrication (moulée ou extrudée). De plus, ces résistances sont nettement supérieures à celle de l'ancien adobe ce qui peut s'expliquer par une différence importante de densité (1.66 g/cm³ dans le cas de l'ancien adobe contre 2 g/cm³ de moyenne pour les briques filées). De ce point de vue, la fabrication des briques de Savès est tout à fait spécifique. En effet, on la considère comme « moulée » (effectivement, la terre est bien placée dans un moule) mais la technique est tout à fait différente de celle des adobes classiques : dans la briqueterie, la terre à une teneur en eau proche de la limite de plasticité passe dans une sorte de « presse-purée » qui écrase la terre dans le moule : il y a donc un effort de compactage assez important. La technique classique consiste à mettre la terre très humide en place dans le moule sans autre compactage que l'élan donné par la personne qui fabrique. Les masses volumiques sèches rendent bien compte de ces différences : la brique de Savès est à mi-chemin entre un adobe classique et une brique comprimée...

Ensuite, contre toute attente, les résultats sont assez comparables entre les deux procédures alors que le phénomène de frettage ne se manifeste pas du tout de la même manière dans les deux cas. Il faut toutefois être prudent avec cette conclusion car le nombre d'essais est trop faible pour pouvoir généraliser ces premières analyses.

Enfin, la dispersion des résultats (toujours pour un nombre d'échantillons faible) est acceptable et les résultats ne laissent pas non plus apparaître de différence marquante entre les deux procédures mais là encore, ces premiers résultats devront être confirmés par d'autres plus nombreux.

IV.2 Tenue à l'eau

Le tableau 8 présente les résultats des trois essais de tenue à l'eau préconisés dans le projet de norme allemande et réalisés sur les 6 briques que nous avons étudiées.

Tableau 8 : Tenue à l'eau des briques

		Ancien adobe	Barthe	Bouisset	Capelle	Nagen	Savès
Immersion	Perte de masse (%)	8.8	0.5	0.5	8.2	15.5	21.4
	Classe	II	I	I	II	III	III
Contact	Fissuration	oui	oui	non	oui	oui	oui
	Gonflement	oui	oui	non	oui	oui	oui
	Classe	III	III	I-II	III	III	III
Absorption capillaire	Temps (h)	≥ 24	≥ 3	≥ 24	≥ 3	≥ 3	≥ 24
	Classe	Ia	Ib	Ia	Ib	Ib	Ia

On constate tout d'abord que ces 3 essais ne donnent pas les mêmes résultats. Celui qui est de loin le plus sévère est l'essai par contact alors que de prime abord on aurait pu penser que le test par immersion dans l'eau durant 10 minutes aurait été plus exigeant. L'essai le moins discriminant est l'essai par capillarité. Les résultats obtenus avec l'essai par contact suggèrent que toutes les briques ne résistent pas à l'eau et doivent être utilisées pour des applications sèches (sans mortier de pose) même pour l'ancien adobe qui a fait ses preuves durant plusieurs décennies. Seule la brique de Bouisset (certainement grâce à la nature des argiles qu'elle contient (kaolinite et illite)) résiste parfaitement aux trois essais.

Ces résultats soulèvent de nombreuses questions. L'essai par contact ne semble pas adapté : il est trop sévère et il n'est pas discriminant, et l'ancien adobe comme la plupart des autres briques ne passe pas ce test. D'ailleurs, cet adobe ne passe pas non plus le test à l'immersion. Enfin, le classement des briques dépend fortement de la nature de l'essai utilisé ce qui peut aussi être critiqué.

Toutefois, ces procédures sont très intéressantes et ont surtout le mérite d'exister. Nous pensons qu'il serait à présent intéressant de s'en inspirer pour réaliser des essais dans différents laboratoires sur différentes briques (en incorporant aussi le plus possible d'anciens adobes pour servir de témoins pertinents) afin de proposer une norme aboutie.

V Propriétés hygrothermiques des briques de terre crue

Pour ces essais, les procédures suivies sont présentées en annexe.

V.1 Isothermes de sorption et désorption

Toutes les courbes de sorption obtenues par la DVS, présentées dans la figure 3, ont une allure très proche les unes des autres.

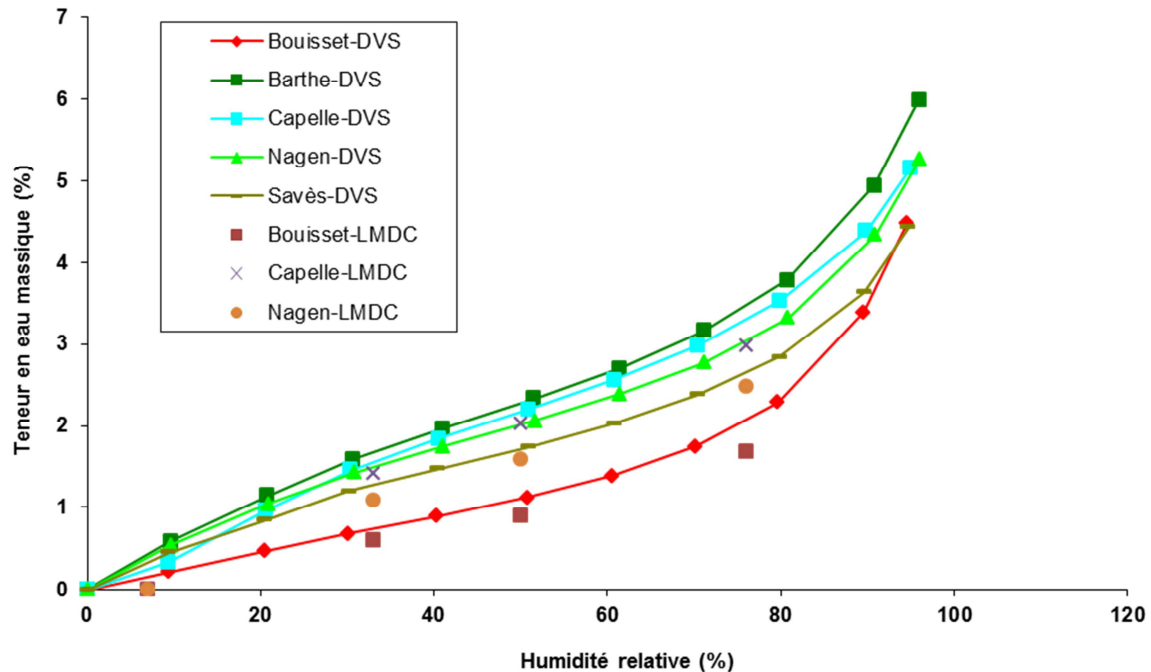


Figure 3 : Isothermes de sorption de la vapeur d'eau des différentes briques de terre crue à 20°C

Pour les briqueteries de Barthe, Capelle, Nagen et Savès, les différentes teneurs en eau massique sont comparables. La courbe de sorption de la briqueterie de Bouisset est légèrement en dessous, ce qui montre que sa capacité d'adsorption est plus faible. Cela peut s'expliquer par sa meilleure compacité et par la nature de l'argile qu'elle contient (kaolinite) comparé aux autres terres crues.

Les points représentant la sorption obtenus par la méthode des solutions salines saturées sont parfaitement couplés aux précédents. Les deux méthodes donnent les mêmes résultats même si on observe un léger décalage entre les deux essais. Cet espacement entre les courbes peut provenir de l'hygrométrie résiduelle des échantillons à 50°C et 7 % HR qui est pris comme l'état hydrique sec pour la méthode des solutions salines saturées.

Les courbes de désorption déterminées par DVS sont présentées figure 4. Comme pour la sorption, les briques de Bouisset ont une teneur en eau plus faible que les autres.

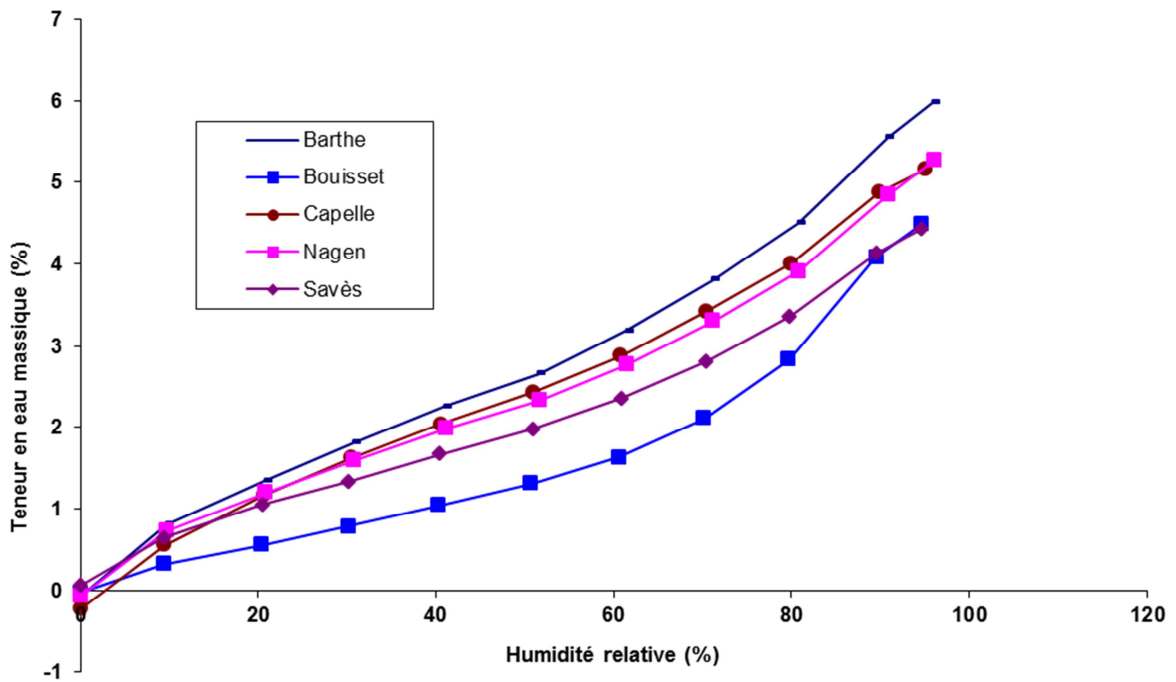


Figure 4 : Isothermes de désorption de la vapeur d'eau des différentes briques de terre crue à 20°C

La comparaison des isothermes de sorption-désorption permet de mettre en évidence un phénomène d'hystérésis. Ce phénomène traduit la différence qu'il existe entre la courbe d'adsorption et celle de désorption. Ce phénomène a largement été étudié notamment sur béton (Baroghel-Bouny, 2007) ou sur de la bentonite (Mihoubi et al., 2006).

Le phénomène d'hystérésis observé sur les briques de terre crue n'est pas très important. Au maximum, on note 0.7% de différence pour le palier à 80%. A titre de comparaison, le béton a une différence maximale de 7% entre la courbe de sorption et celle de désorption pour le palier à 80% d'humidité relative. Cette valeur est dix fois supérieure à celle que nous obtenons sur des briques de terre crue.

Les isothermes de sorption montrent que la terre crue possède un caractère hygroscopique très marqué. De plus, les courbes de stabilisation obtenues par DVS ou solutions salines saturées (non présentées ici) ont montré que les cinétiques de sorption-désorption de vapeur sont très rapides pour les briques de terre ce qui est une propriété intéressante pour la régulation en humidité de l'habitat. Cette approche dynamique de la régulation est encore malheureusement mal prise en compte dans les mesures des propriétés hygrothermiques des matériaux de construction.

V.2 Perméabilité à la vapeur d'eau

Le tableau 9 présente les facteurs de résistance à la vapeur d'eau et la perméabilité obtenus pour les 5 échantillons pour les essais à la coupelle sèche et humide.

Tableau 9 : Perméabilité et facteur de résistance à la vapeur d'eau

	Echantillon	Barthe			Bouisset			Capelle			Nagen			Savès		
Coupelle sèche	$\bar{\delta}$ (kg.m ⁻¹ .s ⁻¹ .Pa ⁻¹)x10 ⁻¹¹	2.6	2.5	2.4	1.3	1.3	1.3	2.2	2.0	2.1	0.7	1.2	1.2	2.8	2.8	2.5
	μ	7	7	8	15	14	14	9	9	9	27	15	16	7	7	8
	$\bar{\delta}$ (kg.m ⁻¹ .s ⁻¹ .Pa ⁻¹)x10 ⁻¹¹	2.5			1.3			2.1			1.0			2.7		
	$\bar{\mu}$	7			14			9			19			7		
Coupelle humide	$\bar{\delta}$ (kg.m ⁻¹ .s ⁻¹ .Pa ⁻¹)x10 ⁻¹¹	7.1	6.1	5.5	3.1	3.1	1.9	3.0	2.7	3.2	3.8	3.7	3.8	5.1	4.5	4.3
	μ	3	3	3	6	6	10	6	7	6	5	5	5	4	4	4
	$\bar{\delta}$ (kg.m ⁻¹ .s ⁻¹ .Pa ⁻¹)x10 ⁻¹¹	6.2			2.7			3.0			3.7			4.7		
	$\bar{\mu}$	3			7			6			5			4		

Les résultats du tableau 9 montrent que la répétabilité des mesures est bonne. Des chercheurs ont réalisé plusieurs essais sur des briques en terre crue de dix centimètres de diamètre et deux centimètres d'épaisseur (Dondi et al., 2003). Les résultats conduisent à des perméabilités à la vapeur d'eau comprises entre 0.3 et 1.3.10⁻¹¹kg.m⁻¹.s⁻¹.Pa⁻¹ ce qui est comparable avec les résultats que nous avons obtenus.

On remarque que la valeur de la perméabilité à la vapeur d'eau pour l'essai à la coupelle humide est plus grande que celle obtenue pour la coupelle sèche. Ce résultat concorde avec des résultats obtenus dans d'autres études (Kherrouf, 2010). Quand le matériau contient suffisamment d'eau (domaine de la zone capillaire), le phénomène de condensation/évaporation peut être à l'origine de l'accélération du déplacement de la vapeur d'eau à travers le matériau. Le facteur de résistance est donc diminué.

En guise de comparaison, la RT 2000 fournit des valeurs de référence pour certains matériaux : le béton de construction a, par exemple, un facteur de résistance de 130 à l'état sec et 80 à l'état humide et on considère que le caoutchouc a un facteur de résistance à la vapeur d'eau infini. Il n'y a pas de valeur pour les matériaux de construction en terre crue dans cette réglementation. On trouve par contre une valeur dans le projet de norme allemande sur les briques de terre crue. Dans ce projet de norme, il est stipulé que la valeur de la résistance de diffusion à la vapeur d'eau μ doit être définie par le fabricant et qu'elle peut être admise sans essai comme étant comprise entre 5 et 10 ce qui est très proche des valeurs que nous avons mesurées.

Les 5 briques de terre crue testées ont donc une très faible résistance à la vapeur d'eau ce qui confirme le caractère très perspirant de ce matériau. De plus, pour cette propriété, les 5 briques ont un comportement tout à fait équivalent.

V.3 Effusivité thermique

La figure 5 présente l'effusivité des 5 briques en fonction de leur teneur en eau.

L'effusivité augmente avec la teneur en eau du matériau. On voit que les courbes ont sensiblement la même allure. Les variations entre les différents échantillons ne sont pas importantes. L'effusivité est une caractéristique importante dans le domaine du bâtiment puisqu'elle nous informe sur la sensation que va donner le matériau au contact de la peau.

Avec les valeurs d'effusivité mesurées, la terre crue est un matériau qui va sembler plus chaud que l'acier ($E = 14\,000 \text{ J.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s.}^{-1/2}$), à même température, au contact de la peau car son effusivité se rapproche de celle du corps humain ($E = 400 \text{ J.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s.}^{-1/2}$). Ce phénomène favorise le confort intérieur d'un bâtiment en terre crue.

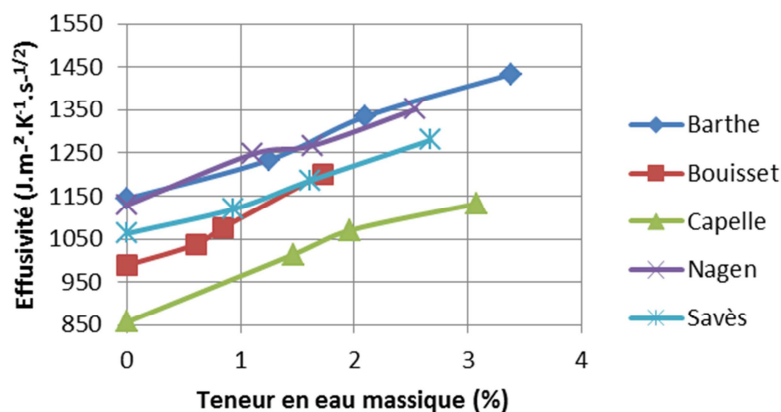


Figure 5 : Évolution de l'effusivité thermique en fonction de la teneur en eau

V.4 Chaleur massique

Le Tableau 2 présente les résultats des mesures de chaleur massique réalisées à l'aide de 2 appareils différents (calorimètre et effusivimètre DEsProTherm).

Tableau 10 : Chaleur massique des briques de terre crue ($\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

Echantillon	Barthe	Bouisset	Capelle	Nagen	Savès
Calorimètre	960	910	940	900	940
DEsProTherm	1020	950	960	960	1030

On constate que les valeurs mesurées à l'aide des deux appareils sont tout à fait similaires. De plus, les valeurs de chaleur massique des différentes briques sont très proches les unes des autres puisqu'elles ne varient que de 900 à 960 $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$. On peut noter que ces valeurs sont assez proches de celles trouvées par Laurent en 1987 (Laurent, 1987) qui avait mesuré le C_p de 9 échantillons de terre à l'aide d'un calorimètre de type « Calvet ». Les valeurs qu'il avait trouvées variaient de 807 à 897 $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Plus récemment, la RT 2000 a fourni des données de référence pour le sable (910-1180 $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$) et pour l'argile (1670-2500 $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$). Les valeurs que nous mesurons sont donc sensiblement différentes de celles données dans la RT 2000, les briques de terre crue étant constituées en première approximation d'autant de sable que d'argile.

V.5 Conductivité thermique

A partir des mesures d'effusivité, de masse volumique et de C_p en fonction de l'humidité, il est possible de calculer la conductivité thermique. La figure 6 présente les valeurs de la conductivité thermique des 5 briques « sèches » (7% HR) et en équilibre avec une atmosphère contrôlée à 50% HR.

On remarque que les valeurs des conductivités thermiques des différentes briques à l'état sec sont comparables et toutes comprises entre 0.4 et 0.7 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. De plus, ces conductivités augmentent avec la teneur en eau ce qui est un résultat classique dans les matériaux poreux. Cette augmentation de la conductivité thermique avec l'augmentation du degré de saturation du matériau s'explique simplement car l'eau remplace l'air à l'intérieur des pores accessibles. Avec une conductivité thermique de l'ordre de $3.10^{-2} \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, l'air est un bon isolant en comparaison de l'eau.

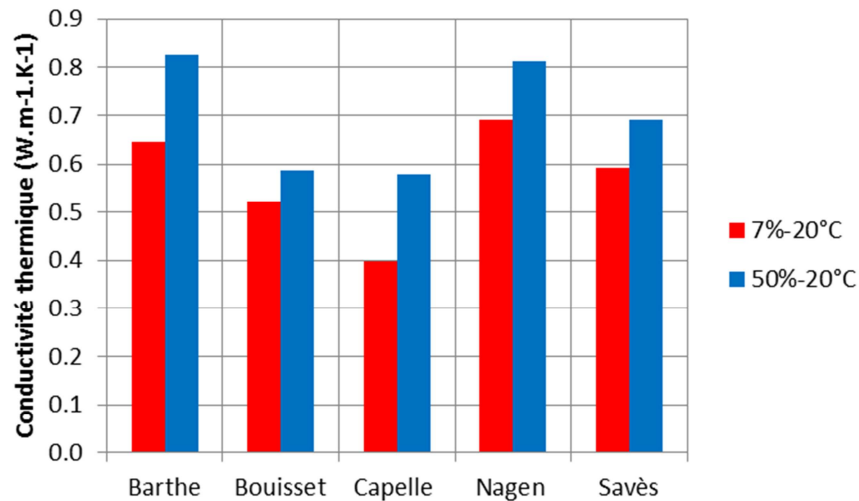


Figure 6 : Conductivité thermique des briques en terre crue en fonction de l'humidité relative

Le Tableau 11 présente une comparaison des conductivités thermiques des 5 briques sèches (50°C, 7%HR) mesurées directement (plaque chaude gardée) ou calculées à partir de l'effusivité.

Tableau 11 : Comparaison de la conductivité thermique à l'état sec pour les deux méthodes utilisées

Nom	λ_{sec} (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)			λ_{sec} (W.m ⁻¹ .K ⁻¹) Calcul à partir de l'effusivité
	Essai à la plaque chaude gardée			
Barthe	0,58	0,59	0,61	0,65
Bouisset	0,46	0,46	0,50	0,52
Capelle	0,45	0,61	0,62	0,40
Nagen	0,39	0,54	0,64	0,69
Savès	0,54	0,54	0,60	0,59

Les valeurs obtenues pour les essais à la plaque chaude gardée sont relativement dispersées : on passe, par exemple, de 0.39 à 0.64 W.m⁻¹.K⁻¹ pour la brique de Nagen. Compte tenu de cette dispersion, les valeurs trouvées avec les 2 méthodes sont assez proches ce qui permet de valider les résultats donnés par l'effusivimètre (effusivité et Cp). De plus, comme pour les autres caractéristiques hygrothermiques, les valeurs de conductivité mesurées sur les 5 briques sont très proches les unes des autres.

Enfin, il est possible de comparer les valeurs que nous trouvons avec certaines issues de la littérature. Dans la RT 2000, une valeur unique est donnée pour les matériaux « terre » (pisé, bauge, béton de terre stabilisé ou blocs de terre comprimée) égale à 1.1 W.m⁻¹.K⁻¹ ce qui est plus élevé que l'ensemble de nos mesures. Dans son étude, Laurent avait trouvé des valeurs variant de 0.5 à 1.5 W.m⁻¹.K⁻¹ en fonction de la densité sèche des matériaux (Laurent, 1987). Les nombreuses valeurs obtenues par l'auteur lui ont permis de tracer une courbe de tendance de la conductivité thermique en fonction de la densité sèche du matériau. Pour des matériaux de 2000 kg/m³ de densité sèche (ce qui correspond à la valeur moyenne des briques que nous avons étudiées), la valeur de la conductivité thermique correspondante est comme dans la RT 2000 de 1.1 W.m⁻¹.K⁻¹.

VI Conclusions et perspectives

Afin d'organiser les conclusions générales de ce rapport, nous rappelons les objectifs de ce projet Tercruso:

- enrichir les bases de données sur les caractéristiques des produits en terre crue,
- apporter des preuves scientifiques du bien-fondé de la construction en terre crue,
- proposer des prescriptions pertinentes en fonction du type d'ouvrage et de l'utilisation des produits en terre crue,
- 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.

En dehors des prescriptions sur lesquelles nous n'avons pas eu le temps de travailler, les autres objectifs ont été remplis.

Du point de vue des performances des briques de terre crue étudiées, nous pouvons tirer les conclusions suivantes.

- Bien qu'ayant des compositions différentes et étant parfois fabriquées avec des technologies différentes, les caractéristiques des briques testées sont toujours très proches les unes des autres SAUF pour leur tenue à l'eau qui est la seule des caractéristique où nous avons pu mettre en avant des différences de comportement importantes.
- Les caractéristiques des briques modernes mesurées sont meilleures que celles de l'ancien adobe testé (Rc et tenue à l'eau souvent) : les adobes du patrimoine du type de celui que nous avons testés sont souvent utilisés dans des murs porteurs pour des ouvrages en R+1. Les performances des briques modernes étant plus élevées, elles devraient par voie de conséquence convenir pour ce type de construction.
- La mesure des performances hygrothermiques sur les briques de terre crue valident la réputation qu'a le matériau terre d'être un matériau confortable utilisé à l'intérieur de l'habitat. Du point de vue thermique, la valeur de la conductivité des briques pleines en terre crue montrent que ce matériau n'est pas un bon isolant. Par contre, et c'est sa principale qualité recherchée, sa faible conductivité couplée à une masse volumique et une chaleur massique élevées confirme la forte inertie thermique de ce matériau. Du point de vue hygroscopique, les résultats ont montré que ce matériau a une perméabilité et des capacités de sorption à la vapeur d'eau très élevées. En d'autres termes, les murs en terre se laissent traverser facilement par la vapeur d'eau et sont capables d'en stocker une quantité importante. De plus, les premiers essais qualitatifs sur l'aspect dynamique montrent que les échanges d'humidité avec la terre crue sont excessivement rapides ce qui est un atout très fort de ce matériau. Il serait intéressant dans l'avenir de définir une troisième caractéristique hygroscopique qui pourrait rendre compte de cette propriété.

Du point de vue méthodologique, le projet Tercruso a permis un nombre important d'avancées mais il reste encore du travail à faire.

La mesure de la résistance à la compression est l'essai qui semble à priori le plus simple à mettre en œuvre mais il pose encore de nombreuses questions. En effet, la valeur de la résistance mesurée va dépendre fortement de la géométrie des échantillons. Ainsi, il est difficile de faire une mesure directe sur brique sans prendre un maximum de précautions. L'autre solution qui consiste à découper des échantillons de forme prédéfinie ou à les préparer à la sortie de la filière est difficile à mettre en œuvre. Nous n'avons pour le moment pas trouvé le meilleur compromis et nous y travaillons encore avec d'autres laboratoires français (CTMNC, ENTPE, IFSTTAR). Quoiqu'il en soit, il nous semble que la procédure proposée par la norme allemande qui consiste à découper les briques d'hauteur inférieure à 71 mm en deux et à maçonner les deux moitiés les unes sur les autres n'est pas satisfaisante.

Les procédures mises en œuvre pour l'évaluation de la tenue à l'eau des briques de terre crue sont issues de la norme allemande. Ces mesures sont importantes car nous avons vu que c'étaient les seules qui étaient discriminantes d'une brique à l'autre. Cependant, nous jugeons trop sévères les critères établis, l'ancien adobe ne passant, par exemple, qu'un test sur 3. Les bases de ces procédures sont intéressantes mais il conviendrait encore de les travailler pour les améliorer en utilisant notamment des adobes du patrimoine qui ont fait leur preuve au cours de plusieurs décennies.

Enfin, concernant la mesure des propriétés hygrothermiques, l'adaptation des procédures couramment utilisées sur d'autres matériaux aux briques de terre crue n'a pas soulevé de problèmes importants hormis la préparation des échantillons (comme dans le cas de l'essai en compression). La chance dans ce projet a été de travailler sur des briques extrudées qu'il était facile de découper aux bonnes dimensions à la sortie de la filière. Ainsi, nous avons pu obtenir des échantillons directement utilisables pour nos essais.

Les perspectives à ce travail sont nombreuses.

Tout d'abord, du point de vue mécanique, il va falloir solutionner une fois pour toute la procédure à mettre en œuvre pour mesurer la résistance à la compression. Ensuite, il va falloir passer de la résistance de l'élément à celle de la partie d'ouvrage (mur) : peu de travaux ont porté sur ces aspects complexes qui vont faire intervenir les mortiers de liaison tout aussi peu étudiés dans la bibliographie. Ces recherches porteront autant sur l'expérimental que sur la modélisation et demanderont sans doute des développements importants. Mais, pour le moment, tout ceci est en statique et compte tenu des évolutions sur la réglementation parasismique, il faudra aussi un jour prochain travailler sur ces aspects mais du point de vue dynamique.

L'autre chantier important concerne le problème de la tenue à l'eau et on entre ici dans quelque chose de quasi mystique qui relève plus de peurs et de croyances que de la réalité scientifique : « il faut absolument que les briques de terre crue résistent à l'eau sinon on ne peut pas les utiliser à l'extérieur ou en porteur ». On pense alors immédiatement stabilisation (chaux naturelles ou ciments). Or, les anciens adobes utilisés en murs extérieurs porteurs n'ont jamais été stabilisés et continuent pourtant d'abriter des milliers de personnes en Midi-Pyrénées. Comme l'a montré notre étude, ils ne résistent pourtant pas à l'eau mais l'intelligence constructive des anciens bâtisseurs a permis de contourner ce problème. Il est stupéfiant de constater que la (quasi) totalité des artisans fabricants des BTC (brique de terre compressée) stabilise leur brique (quelques pourcents, il est vrai, ce qui dans bien des cas représente autant de liant que dans un bloc béton...). Cette tenue à l'eau des briques de terre crue méritera donc d'être étudiée de manière approfondie et aussi objectivement que possible dans une société où le principe de précaution prévaut la plupart du temps sur le reste. Ces études devront être accompagnées d'une analyse de cycle de vie ou d'un bilan carbone dans les cas où la solution de stabiliser la terre serait retenue.

Enfin, les études d'impact de la terre crue sur le confort et la santé des occupants devront être développées car c'est sans doute un des atouts principaux de ce matériau. Les premiers essais réalisés dans le projet Tercruso ont confirmé l'intérêt de la terre crue pour la régulation hydrique des ambiances. Il convient d'aller plus loin notamment en prenant en compte les aspects dynamiques au niveau de ces échanges. Enfin, des études sur la non-prolifération microbienne à la surface des briques de terre crue (surtout dans le cas d'une introduction de fibres végétales) devront aussi être réalisées pour vérifier l'innocuité sanitaire de ce matériau.

Bibliographie

Baroghel-Bouny V. (2007), Water vapor sorption experiments on hardened cementitious materials Part I: essential tool for analysis of hygrothermal behaviour and its relation to pore structure, *Cement and Concrete Research*, 37: 414-437.

Dondi M., Principi P., Raimondo M., Zanarini G. (2003), Water vapor permeability of clay bricks, *Construction and Building Materials*, 17: 253-258.

Kherrouf S. Covallet D. (2010), Mieux comprendre les transferts de masse pour maîtriser les transferts de chaleur, *EDF R&D Département EnerBAT*.

Laurent J.P. (1987). Propriétés thermiques du matériau terre. Cahiers du CSTB - Mai 1987.

Mihoubi D., Bellagi A. (2006), Thermodynamic analysis of sorption isotherms of bentonite, *J. Chem Thermodynamics*, 38: 1105-1110.

ANNEXE

Procédures pour les mesures des propriétés hygrothermiques

1. Isothermes de sorption

Deux essais permettront d'avoir les isothermes de sorption. Le premier consiste à mettre des échantillons dans une boîte hermétique réglée en température et en humidité et à déterminer la teneur en eau massique pour chaque palier (LiBr : 7%, $MgCl_2$: 33%, enceinte climatique : 50%, NaCl : 76% et K_2SO_4 : 97% le tout à 20° C) : cela représente la courbe de sorption. Le cheminement inverse permet de déterminer la courbe de désorption. Ces essais ont été réalisés en suivant la norme NF EN ISO 12571. La taille des échantillons est de 6x4x2 cm et sont séchés pour atteindre une variation de masse inférieure à 0,1% entre trois pesées consécutives effectuées à au moins 24 h d'intervalle.

Le second essai est basé sur le même principe ; mais il est réalisé à l'aide d'un appareil spécifique basé sur la technique de la DVS (Dynamic Vapour Sorption). Cet essai est plus rapide et plus précis puisque les échantillons sont plus petits. Pour des raisons pratiques les échantillons mesurent 1x1x0,3 cm. Pour les deux essais, nous ferons les manipulations sur 3 échantillons différents pour les cinq briqueteries concernées.

2. Perméabilité à la vapeur d'eau

Ces essais ont été réalisés en suivant la norme NF EN ISO 12572. Pour l'essai à la coupelle sèche, une solution saline saturée au $MgCl_2$ est placée dans une coupelle au fond de la boîte, elle maintient une humidité relative de 33% à 20° C. Pour l'essai à la coupelle humide, une solution saline saturée de NaCl est placée en fond de coupelle, et assure une humidité relative de 86% à 20° C. Trois échantillons sont testés pour chaque condition. Ils sont carré (10x10x2 cm) et préalablement conservés dans une étuve à 50° C et 7 % d'humidité relative. L'étanchéité du contour de l'échantillon est assurée par un mélange de paraffine (40%) et de cire d'abeille (60%). Cet essai permet de déterminer la résistance à la vapeur d'eau qui renseigne sur la capacité du matériau à laisser pénétrer l'eau facilement ou pas à l'intérieur de celui-ci. La résistance à la vapeur d'eau n'a pas d'unité et est comprise entre zéro et l'infini. La figure A1 présente le schéma de principe de la perméabilité à la vapeur d'eau.

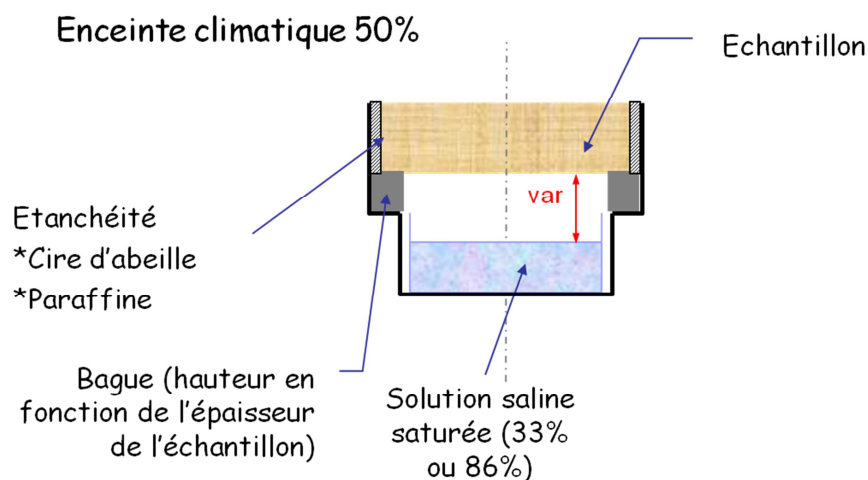


Figure A1 : Schéma de principe de fonctionnement de la perméabilité à la vapeur d'eau

3. Effusivité thermique

L'effusivité thermique est déterminée avec le dispositif DEsProTherm (Dispositif d'Estimation de Propriétés Thermiques). Les mesures se font sur des échantillons mesurant 6x4x2 cm. Ces dimensions permettent de respecter deux hypothèses fondamentales. D'une part, la cellule de mesure est entièrement recouverte, ce qui est absolument primordial dans la détermination de l'effusivité. D'autre part, le matériau est considéré comme semi-infini, c'est-à-dire que le flux de chaleur ne doit en aucun cas traverser l'échantillon. Avant toute mesure, le dispositif vérifie la stabilité des thermocouples (variation inférieure à 10⁻³ entre deux températures prises à 100 secondes d'intervalle). Lorsque ce critère est atteint, le dispositif envoie le flux électrique dans la résistance chauffante (transformé en flux thermique par Effet Joule) et relève les températures sur les différents capteurs ainsi que le flux envoyé. Ensuite le programme enregistre les mesures pour pouvoir les traiter. Pour optimiser les mesures les échantillons doivent être stockés dans la même salle que l'appareil. La durée d'une mesure est variable mais si la dernière condition est respectée une mesure est possible tous les quarts d'heure.



Figure A2 : Appareil de mesure DEsProTherm et dispositif d'acquisition des données

4. Chaleur massique

La chaleur massique a été mesurée en utilisant deux méthodes : à l'aide d'un calorimètre et avec l'appareil DesProTherm.

Pour l'essai avec le calorimètre, on pèse le calorimètre et ses accessoires et on note sa masse m . On ajoute une masse d'eau m_1 dans le calorimètre ($\approx 1,5$ kg). On pèse l'ensemble, pour déterminer la masse d'eau exacte. Après quelques minutes, on note la température θ_1 ($\approx 22^\circ$ C) de l'ensemble. On place notre échantillon solide à l'intérieur du calorimètre conservé à température ambiante. En agitant délicatement, le système se met à l'équilibre et on relève la température d'équilibre $\theta_{\text{éq}}$. Pour finir, on pèse le calorimètre et son contenu pour déterminer la masse exacte de matériau introduite. L'équation suivante permet de trouver la chaleur massique de l'échantillon :

$$(m_{\text{calo}} \times c_{p\text{calo}} + m_{\text{eau}} \times c_{p\text{eau}}) \times (\theta_{\text{ref}} - \theta_1) = m_{\text{mat}} \times c_{p\text{mat}} \times (\theta_2 - \theta_{\text{ref}})$$

Pour l'essai avec le DEsProTherm, l'échantillon est placé entre deux cellules. Pour valider l'essai, on doit obtenir une élévation de 2° C en face arrière du matériau grâce à une tension d'entrée à ajuster. Pour l'essai à l'aide du DesProTherm, nous avons fait les mesures sur trois échantillons.

Dans les deux cas, les essais ont été réalisés sur des échantillons séchés à 50° C ($\theta_2=50^\circ$ C pour l'essai au calorimètre).

5. Conductivité thermique

A partir des résultats de l'effusivité (E) et de la chaleur massique (C_p) obtenu par le DesProTherm, la conductivité thermique (λ) est calculée à partir de la relation suivante :

$$E = \sqrt{\lambda \times \rho \times c_p} \Leftrightarrow \lambda = \frac{E^2}{\rho \times c_p} \left[W . m^{-1} . K^{-1} \right]$$

Où ρ est la masse volumique apparente moyenne de l'échantillon testé.

Pour déterminer directement la conductivité thermique à l'état sec, nous avons utilisé la méthode de la plaque chaude gardée. L'échantillon de terre crue (15x15x5 cm), est séché à 50° C jusqu'à atteindre une variation de masse inférieure à 0,1% entre trois pesées successives espacées d'au moins 24 h. Il est placé entre les deux plaques et entouré d'une mousse isolante pour éviter les pertes latérales du flux de chaleur. On descend la plaque supérieure, chaude, jusqu'à atteindre le contact entre celle-ci et le matériau et on lance l'acquisition comme représenté dans la figure A3.

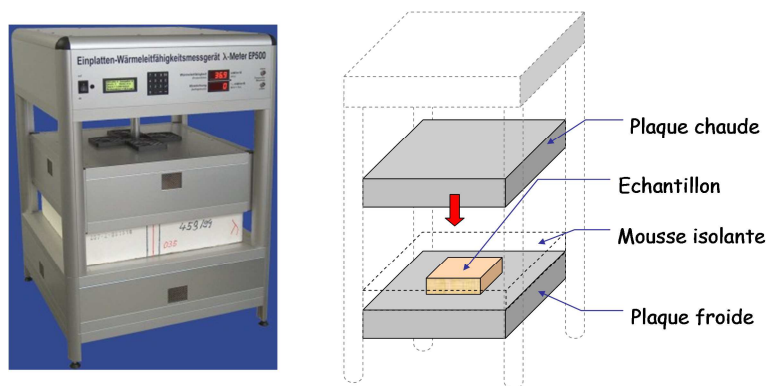


Figure A3 : Essai à la plaque chaude gardée

C'est une méthode de mesure stationnaire de la conductivité thermique des matériaux. L'essai est réalisé à 20° C pour pouvoir comparer les résultats avec ceux obtenus par le DEsProTherm. La différence de température entre les deux plaques est de 5° K car on considère qu'il faut environ 1° K d'écart par cm de matériau. La stabilisation est atteinte lorsque la variation de la conductivité est inférieure à 1% entre deux mesures prises à 90 minutes d'intervalle.