

AGENCE FRANCAISE POUR LA MAITRISE DE L'ENERGIE
FONDATION DE FRANCE
REGION BASSE-NORMANDIE

BRIQUES DE TERRE CRUE ET TERRE-PAILLE
EN BASSE-NORMANDIE

Expérimentations et premières évaluations



N° inv: 6720

Association Régionale
Biomasse Normandie

Christian DELABIE

10.6.9
15

NOUVELLE ADRESSE :
MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT
Délégation Régionale
à l'Architecture et à l'Environnement
1 Bis, Rue Leroy
14037 CAEN CEDEX Tél. 31 44 45 00
21.5.87 u.1333

BRIQUES DE TERRE CRUE ET TERRE-PAILLE
EN BASSE-NORMANDIE

Expérimentations et premières évaluations

42, Avenue du Six Juin,
14 300 CAEN

S O M M A I R E

<u>I - APPROCHE DE LA TERRE</u>	1
A - LE MATERIAU TERRE EN FRANCE	1
1) La bauge	1
2) Le torchis	1
B - REDECOUVERTE DU MATERIAU TERRE	2
1) Les briques de terre compactée et stabilisée	2
2) La terre-paille	2
C - LES REALISATIONS EN NORMANDIE	2
1) La terre-paille	2
2) Les briques de terre	3
3) Situation géographique	3
4) Les terres	3
<u>II - FABRICATION DES MATERIAUX ET TECHNIQUES CONSTRUCTIVES</u>	4
A - LES BRIQUES DE TERRE COMPACTEE ET STABILISEE A FROID	4
1) Cinétique de la fabrication	4
2) Les terres utilisées	4
3) Deux presses à blocs de terre	5
a. Fabrication des briques avec la presse TERRE 2 000	5
a.1. Le malaxeur	6
a.2. La vis d'aménagement	6
a.3. La presse à briques	7

b. Fabrication des briques avec la presse ALTECH	8
b.1. Le malaxeur	8
b.2. La presse à briques	8
c. Les réalisations	9
c.1. Les abris de l'aire de loisirs de Marchésieux	9
c.2. La laiterie-fromagerie de Sartilly	10
B - LA TERRE-PAILLE	10
1) Le produit	10
2) La préparation	11
a. Le matériel	11
a.1. Le malaxeur à lisier	11
a.2. La tonne à lisier	12
a.3. L'épandeur à fumier	12
b. Les étapes	12
b.1. Elaboration de la barbotine	12
b.2. Contrôle de la qualité	13
b.3. Transport de la barbotine	13
b.4. Mélange barbotine/paille	13
c. La mise en oeuvre	14
c.1. Une ossature en bois améliorée	14
c.2. Vers une ossature bien adaptée	15
c.3. Conception de coffrages adaptés à la terre-paille	15

d. Les réalisations	16
d.1 L'étable à veaux de M. LELIMOUSIN	16
d.2. Le séchoir à foin de M. GUILLARD	16
<u>III - EVALUATION TECHNICO-ECONOMIQUE DES MATERIAUX</u>	17
<u>III.1. - ASPECTS TECHNIQUES</u>	17
A - LES BRIQUES DE TERRE CRUE	17
1) La résistance mécanique	17
a. Le matériau	17
b. Le bâtiment	18
2) Le comportement thermique	18
a. Le matériau	18
b. Le bâtiment	19
B - LA TERRE-PAILLE	19
1) La résistance mécanique	19
a. Le matériau	19
b. Le bâtiment	19
2) Le comportement hygrothermique	19
a. Le matériau	19
b. Le bâtiment	20
3) Bâtiments d'élevage et matériaux de construction	22

<u>III.2. - ASPECTS ECONOMIQUES</u>	23
A - LES BRIQUES DE TERRE CRUE	23
1) Le matériau	23
a. Briques TERRE 2 000	23
b. Briques ALTECH	24
2) Le bâtiment	26
B - LA TERRE-PAILLE	27
1) Le matériau	27
2) Le bâtiment	28
<u>CONCLUSION</u>	29

I - APPROCHE DE LA TERRE

A - LE MATERIAU TERRE EN FRANCE

Le premier fait qui apparaît quand on étudie la construction en terre crue est l'ancienneté historique de l'utilisation de ce matériau. Si l'homme a d'abord utilisé les abris naturels pour se protéger, dès qu'il a su maîtriser les techniques élémentaires de construction, il a emprunté les matériaux à son environnement immédiat.

Depuis dix siècles que l'homme s'est établi dans des villes, la terre crue a été et reste, dans de nombreuses régions du monde, un des principaux composants de ses habitations.

C'est à une époque très récente que l'on a systématisé la fabrication industrielle et le transport des divers éléments utilisés pour le bâti.

Dans notre pays, la construction en terre a connu son développement le plus important dans l'habitat rural dispersé de faible élévation. La région Lyonnaise et le Dauphiné qui comptent encore de belles constructions en pisé, la Champagne caractérisée par la technique des carreaux de terre, la Bretagne du Centre et la Vendée utilisant la bauge, la Picardie, l'Alsace aux célèbres bâtis à pan de bois, représentent les aspects les plus visibles d'une tradition plus étendue.

En Normandie, la bauge et le torchis sont les techniques les plus couramment utilisées.

1) La bauge

C'est un mélange de paille et de terre argilo-limoneuse rendue très meuble par une bonne humidification. Ce mélange plastique est façonné directement, souvent sans coffrage, et raidi à la bêche. Le temps de séchage est très long.

La bauge se rencontre principalement dans les départements de l'Eure et de la Manche (marais de Carentan).

2) Le torchis

Mélange de terre argileuse et de paille (ou de foin), il s'applique en remplissage des ossatures bois (maisons à colombage). Cette technique caractéristique du Pays d'Auge était utilisée en Pays de Caux et de Bray ainsi que dans le Mortainais, l'Ouche et le Houlme. L'apparence des constructions, propre à chaque région, est due à la conception différente des ossatures en bois ; le torchis joue toujours le même rôle.

Les débuts de l'industrialisation des matériaux de construction, à la fin du 19^{ème} siècle et à l'orée du 20^{ème}, ont correspondu avec le déclin de la terre matériau de construction sur l'ensemble de l'hexagone. Elle a subi les effets de la standardisation de la construction sans en tirer avantage. Toutes les techniques connues en France, faute d'avoir évolué à cette époque, ont disparu pratiquement pendant une soixantaine d'années.

B - REDECOUVERTE DU MATERIAU TERRE

C'est seulement depuis une décade que quelques ingénieurs et architectes redécouvrent les "vertus" de la terre à travers l'habitat du Tiers Monde et qu'ils proposent à leurs contemporains une nouvelle vision de ce matériau, permettant de dépasser les lourds a priori qui règnent.

Les techniques de terre ont ainsi réamorcé une évolution qu'elles n'avaient pas saisie à temps. En 1982, s'ouvre près de Lyon le chantier "du domaine de la terre", à Villefontaine dans la ville nouvelle de l'Isle d'Abeau, qui va permettre une expérimentation en vraie grandeur sur une soixantaine de logements. Techniques traditionnelles et nouvelles vont être appliquées ; les premières seront modernisées, les autres améliorées tout au long des trois années que dureront les travaux.

Dans l'éventail des techniques utilisées sur le chantier, deux nous sont apparues plus intéressantes à développer en Normandie : la brique de terre compactée et stabilisée à froid et la terre-paille. Les produits obtenus s'apparentent par leur aspect et par leurs spécificités, soit à la bauge, soit au torchis.

1) Les briques de terre compactée et stabilisée

Les études faites sur les caractéristiques de la terre, en fonction de sa composition, ont démontré l'intérêt du compactage. Des presses ont été fabriquées ; elles peuvent produire de quelques dizaines de briques par jour (presse manuelle) à plusieurs milliers (presse semi automatisée et automatisée).

Les caractéristiques physiques du produit peuvent être améliorées par adjonction d'un stabilisant (ciment, chaux, furfural, bitume).

2) La terre-paille

Comme le nom le laisse entendre, il s'agit d'un mélange de terre et de paille. La paille est incorporée à un limon argileux largement étendu d'eau. Le produit obtenu intervient en remplissage d'une ossature bois portante. Il s'apparente au torchis, dont il se différencie principalement par la teneur en paille (15 % pour la terre-paille, 2 à 3 % pour le torchis).

C- LES REALISATIONS EN NORMANDIE

Menées en 1985 et 1986, elles sont à caractère rural et essentiellement tournées vers des bâtiments techniques. Au nombre de quatre, elles se répartissent également entre les deux procédés de construction choisis.

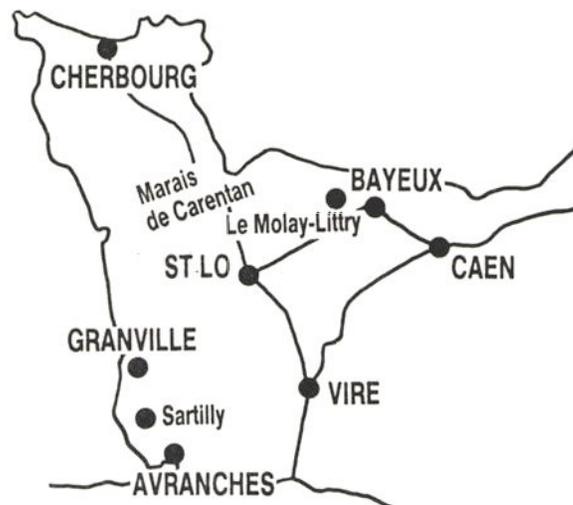
1) La terre-paille

- construction d'un bâtiment d'élevage de veaux de boucherie chez M. LELIMOUSIN au Molay-Littry (Calvados) ;
- réalisation d'un séchoir à foin solaire chez M. GUILLARD à Sartilly (Manche).

2) Les briques de terre

- construction d'abris de plein air à Marchésieux (Manche) par l'ADAME des marais (association de développement local) ;
- réalisation d'une laiterie-fromagerie chez M. GUILLARD à Sartilly (Manche).

3) Situation géographique



4) Les terres

La granulométrie d'une terre détermine ses possibilités d'utilisation. Les terres à bâtir prises en l'état ne sont pas aptes à toutes les techniques et la nature des sols varie selon les régions. Les terres fines et grasses (proportion d'argile supérieure à 15 %) sont les plus adaptées aux techniques utilisant les pailles. Les terres à forte granulométrie conviennent bien aux techniques sèches (pisé).

Les terres rencontrées (1) sur les lieux des constructions sont constituées de limons argileux contenant peu ou pas de sables, exempts de gros éléments. La teneur naturelle en eau se situe entre 15 et 20 %. Elles sont bien adaptées à la fabrication de la terre-paille. Leur utilisation pour les briques de terre compressée est moins évidente.

Les quatre chantiers ont servi à appréhender la préparation des matériaux et leur mise en oeuvre, à analyser quelques unes de leurs caractéristiques techniques et physiques, et à approcher les coûts économiques de ces filières.

(1) Annexe 1 : courbes granulométriques des terres du Molay-Littry, de Marchésieux et de Sartilly.

II - FABRICATION DES MATERIAUX ET TECHNIQUES CONSTRUCTIVES

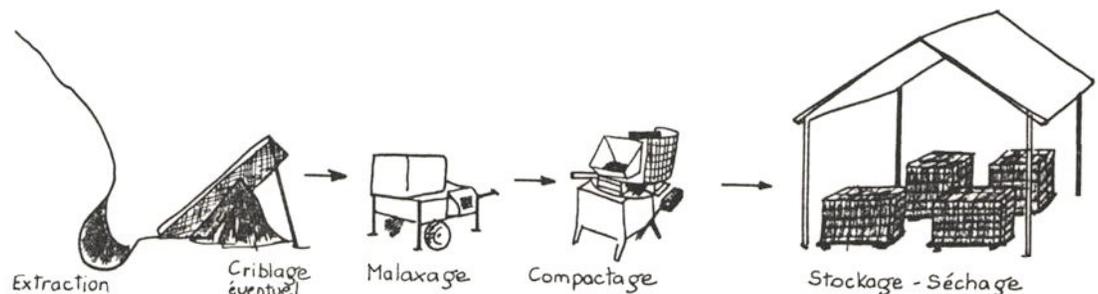
A - LES BRIQUES DE TERRE COMPACTEE ET STABILISEE A FROID

Deux arguments militaient a priori en faveur de cette technique :

- la possibilité de fabriquer les blocs et les briques sur le lieu de la construction à l'aide de presses spécifiques transportables facilement ;
- le produit obtenu se met en oeuvre comme le parpaing de ciment ou la brique cuite.

1) Cinétique de la fabrication

Le cycle de fabrication se déroule ainsi : la terre, préalablement extraite et criblée (si nécessaire), est mise en place dans un malaxeur en action. Le stabilisant (chaux et/ou ciment), éventuellement le sable, est incorporé dans des proportions définies (3 à 7 % pour les adjuvants) selon la nature de la terre. Dès que le mélange a atteint une bonne homogénéité, il est évacué manuellement ou mécaniquement, jusqu'à la trémie-tampon de la presse. De là, la terre est amenée dans un moule et compressée. La brique formée est évacuée et stockée à l'abri pour le séchage.



2) Les terres utilisées

L'analyse des terres utilisées pour chacun des sites montre des teneurs en fines (argiles et limons) suffisantes pour la fabrication des blocs (1). L'absence de graviers et de cailloux a permis d'éviter un criblage préalable. La rareté des sables nous a fait préconiser d'en rajouter dans des proportions de 20 à 30 %. Nous n'avons pas toujours été suivi par les utilisateurs.

(1) Annexe 1.

Par contre, dans chaque cas, la forte teneur en eau après extraction, qui se situait entre 18,5 % et 22,5 % (1) a nécessité une opération de pré-séchage afin de faire descendre l'humidité pondérale de quelques points. Au delà de 16 à 17 % d'humidité, la terre est impropre à la fabrication. Pour ce faire, nous avons incorporé à la terre, dans des proportions de 4 à 5 %, de la chaux vive qui, en s'éteignant, provoque une évaporation partielle de l'eau. Cette préparation a été menée à la fin de chaque journée : la quantité de terre nécessaire à la fabrication du lendemain était prélevée d'une réserve bâchée et déposée sous abri ; on y ajoutait la quantité de chaux correspondante.

Cette mise en état de la terre, la veille au soir, laisse à la chaux le temps suffisant pour réagir complètement. Parfois, une infime quantité de chaux encore active se retrouve dans la terre ; en finissant sa réaction exothermique, elle déstructure la brique (fissuration, décollement surfacique) la rendant inutilisable.

3) Deux presses à blocs de terre

Une démarche préalable d'information, amenant à constater qu'il y avait peu de machines sur le marché des presses en France, nous a fait opter pour deux types de matériel offrant des niveaux de prestations assez différents :

- une machine hydraulique de marque RGF TERRE 2000 (type T.M.R. 6750/40) ;
- une machine mécanique de marque ALTECH (type PACT 500).

Devant les incertitudes et les indécisions des fabricants contactés, et tout particulièrement des responsables de TERRE 2000, les chantiers, prévus initialement dans le courant de septembre 1985, ont été retardés de près de deux mois, ce qui n'a pas été sans conséquences sur les résultats.

Les deux presses ont été utilisées alternativement sur deux lieux de fabrication situés dans la Manche : à Marchésieux dans les marais de Carentan et à Sartilly dans le sud du département.

a. Fabrication des briques avec la presse TERRE 2000

L'ensemble comprend, outre la presse proprement dite, un malaxeur horizontal et une vis de transfert de la terre (du malaxeur à la trémie de la presse). La presse est dotée d'un moteur thermique couplé à une centrale hydraulique qui accompagne toutes les phases de la compaction.

(1) Annexe 2 : Teneur en eau pondérale - Densité réduite. Analyse de J.P. LAURENT du C.S.T.B.

Dans l'esprit des concepteurs, ces trois éléments permettent une mécanisation maximale des opérations, réduisant d'autant l'intervention manuelle.

L'utilisation en site réel a montré que la conception d'ensemble a souffert de nombreuses faiblesses et que chaque élément a posé des problèmes.

a.1. Le malaxeur -----

Il est constitué d'une forme métallique semi-cylindrique au fond de laquelle tourne une double hélice entraînée par un moteur électrique. Le remplissage se fait par le haut et l'évacuation par une trappe située à l'extrémité opposée au moteur, en partie inférieure.

Pour préparer un $1/8$ de m^3 de terre foisonnante, il faut 6 minutes qui se décomposent de la manière suivante : 45 secondes pour le remplissage, trois minutes 15 secondes pour le malaxage et deux minutes pour la sortie de la terre.

Cette préparation permet la compaction de 10 briques. Ce rythme autorise une fabrication de 100 briques par heure, donc de 800 briques pour une journée de travail courante. La capacité de production théorique de la presse est de 2 000 briques/jour (selons les constructeurs). Même avec un fonctionnement parfait, elle ne pouvait pas matériellement atteindre la moitié de ce chiffre.

A cette première limite s'en est ajoutée une autre : l'ensemble a été conçu à Avignon et les terres utilisées pour le tester avaient une granulométrie moins fine et une teneur en eau plus faible (de 8 à 12 points) que les terres de Marchésieux ou de Sartilly. Celles-ci sont moins malléables, plus collantes. Le malaxeur a fonctionné avec difficulté et son utilisation s'est émaillée d'arrêts dûs à la rupture de pièces mécaniques.

a.2. La vis d'amenage -----

Constituée d'une vis d'Archimède logée dans un tube et animée par un moteur électrique, elle devait monter la terre depuis le malaxeur jusqu'à la presse. Elle a été totalement inefficace et remplacée dès les premiers jours de production par un tapis élévateur légèrement modifié pour l'occasion.

a.3. La presse à briques

Son asservissement hydraulique (1) diminue et simplifie à l'extrême la pénibilité du travail de l'opérateur. Le cycle de fabrication permet une production théorique de 2 000 briques par jour pour une équipe de cinq personnes dont deux à la préparation de la terre, une à la presse et deux à l'évacuation des briques.

Les différentes manipulations propres à la compaction (1) nécessitent une sophistication technique peu compatible avec les conditions difficiles d'un chantier. La quantité de pannes et d'incidents qui ont marqué le chantier de M. GUILLARD montrent à l'évidence la fragilité de la machine (2).

L'ensemble a souffert d'un ultime handicap, le poids, qui a rendu les déplacements de lieu à lieu très délicats. Les trois pièces pèsent environ trois tonnes au total et ne peuvent être manipulées qu'avec un tracteur élévateur.

La production de briques s'est trouvée considérablement altérée par la multiplicité des incidents. La presse, disponible du 1er novembre au 7 décembre pendant 29 jours ouvrables, aurait dû permettre :

- selon le constructeur, une fabrication de	56 000 briques
- selon les réelles possibilités du matériel	22 400 briques
Sur les chantiers témoins, on a atteint le cinquième des performances annoncées	11 000 briques

Les dimensions des briques, 15 cm x 15 cm x 30 cm, autorisent peu d'appareillages de maçonnerie.

Ce bilan, finalement très médiocre, est à tempérer du fait que la presse et ses accessoires étaient des prototypes qui n'avaient tourné qu'en atelier.

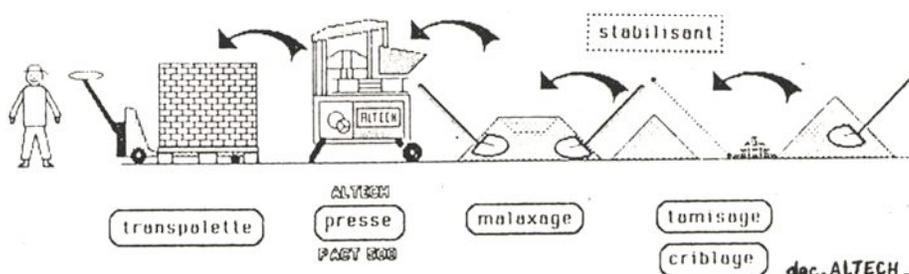
(1) Un opérateur, en actionnant un levier, commande l'asservissement hydraulique. Un chariot creux, par un mouvement de translation en avant, emmène, de la trémie, la quantité de terre nécessaire à la fabrication de la brique jusqu'au-dessus du moule, de manière à le remplir. Le retour du chariot à sa position initiale permet l'égalisation de la terre dans le moule. A ce moment là, le bloc de compaction, de dimensions égales à celles du moule (aux jeux de fonctionnement près), descend. L'effort de compression qu'il fournit peut varier de 50 à 200 bars, en fonction de la composition de la terre ou de son taux d'humidité. Le bloc remonte ; un vérin, placé en fond de moule, fait suivre la brique ; le chariot, en amenant la terre dans le moule, la pousse à l'avant de la table de travail d'où elle est reprise manuellement pour être stockée et séchée.

(2) Annexe 3 : Liste des pannes subies par M. GUILLARD sur son chantier de fabrication.

Cette grande simplicité a comme conséquence un automatisme des fonctions de fabrication réduit, donc une plus grande pénibilité du travail des opérateurs et une moindre productivité.

Les briques, 9,5 cm x 15 cm x 29,5 cm (plus petites de moitié que celles de TERRE 2000) sont facilement appareillables. Elles peuvent être fabriquées à 1 200 exemplaires par jour selon les constructeurs. Ce chiffre a été atteint sur les chantiers, mais l'équipe a dû soutenir un rythme éprouvant.

En fait, la fabrication journalière s'est située le plus souvent autour de 1 000 briques. Enfin, le faible encombrement de la machine et son poids réduit (420 kg) la rendent facilement transportable.



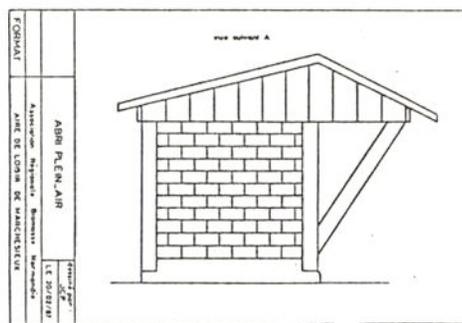
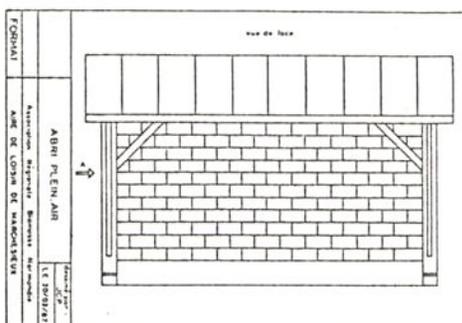
c. Les réalisations

Les briques fabriquées sur les deux sites de la Manche ont été mises en oeuvre pour des constructions à usage très différent.

c.1. Les abris de l'aire de loisirs de Marchésieux

Petites réalisations de 8 à 10 m², au nombre de huit, elles ont été montées par les membres d'une association intercommunale de mise en valeur des marais de Carentan (ADAME).

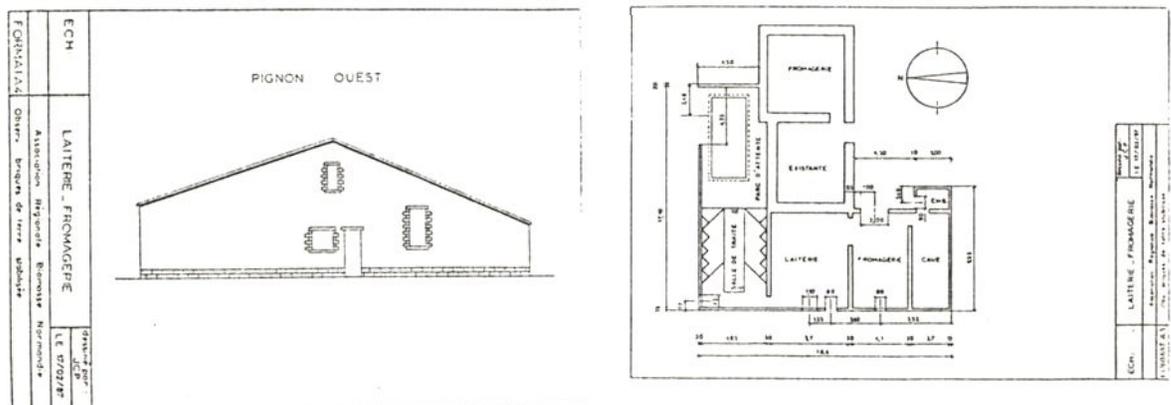
L'utilisation de la terre pour les murs se justifie moins pour des raisons thermiques que pour des raisons culturelles. Le patrimoine de maisons en bauge de Marchésieux et des communes avoisinantes est le plus important de la région des marais.



c.2. La laiterie-fromagerie de Sartilly chez M. GUILLARD

C'est le plus grand chantier de blocs de terre mené dans la région. Ce bâtiment de 9,5 m sur 18,7 m est hybride dans sa composition. L'aire d'exercice et la salle de traite sont montées en parpaing de ciment. Les autres salles (laiterie-fromagerie, salle de maturation, salle d'emballage) sont construites en blocs de terre (TERRE 2 000 et ALTECH). Les murs du rez-de-chaussée ont, par leur appareillage, une épaisseur de 30 cm ; ceux de l'étage font 15 cm.

On a recherché pour ce bâtiment une bonne inertie thermique et le maintien d'une humidité d'ambiance élevée.



B - LA TERRE-PAILLE

Mode de construction répandu en Allemagne, la terre-paille a été réhabilitée depuis plusieurs années dans ce pays par Frantz VOLHARD, architecte à Darmstadt (1). Elle est introduite en France par Paul WAGNER qui l'a utilisée pour l'un des projets de l'Isle d'Abeau, près de Lyon.

1) Le produit

Deux éléments, en dehors de l'eau, interviennent dans l'élaboration de la terre-paille.

La terre : non végétale, constituée de fines (argiles et limons argileux), elle doit être débarrassée des gros graviers ou des cailloux (tamis de 2 cm). Dans les régions à torchis ou à bauge, on trouve fréquemment une terre qui peut être utilisée telle quelle, ce qui a été le cas notamment pour les deux projets pilotés (2).

(1) Frantz VOLHARD, Jahnstrabe - 53 6100 DARMSTADT.

(2) Annexe 1.

La paille : elle doit être assez résistante ; la paille d'orge est recommandée, la paille de blé convient.

Elle est utilisée coupée en brins de 10 à 30 cm ou laissée entière. Sur les deux sites, de la paille de blé non coupée a été utilisée.

La terre-paille intervient comme matériau de remplissage d'une ossature en bois porteuse. Elle est habituellement préparée manuellement et demande des temps d'élaboration très longs.

L'une des originalités de notre démarche a consisté dans la mécanisation de la fabrication du produit.

2) La préparation

La terre est étendue d'eau, dans des proportions de 45 litres d'eau pour 90 kg de terre, à moduler en fonction de la teneur initiale en eau de la terre. Les deux éléments sont mélangés jusqu'à l'obtention d'un produit semi-liquide appelé barbotine qui, elle-même, est associée à de la paille d'orge ou de blé, à raison de 15 kg pour 90 litres. C'est ce produit qui est utilisé pour le remplissage de l'ossature bois.

Une mécanisation de la préparation

Lors de notre première expérience, nous n'avions pas connaissance d'un procédé mécanisé propre à la terre-paille. A l'Isle d'Abeau, la fabrication était artisanale (barbotine homogénéisée à l'aide d'une perceuse électrique et mélangée à la paille avec des fourches à main).

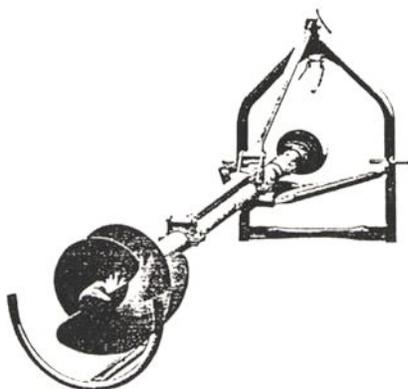
Par ailleurs, en milieu rural, la terre et la paille sont des matériaux abondants qui font partie de l'environnement immédiat.

A partir de ce double constat, nous avons essayé d'imaginer une mécanisation de la fabrication du produit avec du matériel non spécifique, utilisé couramment par les exploitants agricoles.

a. Le matériel

Parmi les machines agricoles retenues pour l'élaboration de la terre-paille, il existe une variété de modèles propres à chaque constructeur, dont certains sont peu ou pas adaptés.

a.1. Le malaxeur à lisier



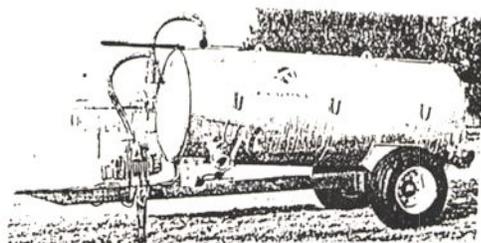
Cet appareil qui se monte sur le trois points du tracteur sert à homogénéiser des produits semi-liquides tels que les lisiers.

Les malaxeurs à arbre rectiligne ont un encombrement important (longueur 4 à 4,5 m) qui diminue leur maniabilité et rend plus difficile l'accès à la fosse.

L'agitateur monté en bout d'arbre peut être soit une hélice à trois pales, soit une portion de vis sans fin. Elles ont une efficacité identique, mais la deuxième fait appel à une puissance motrice supérieure.

Les malaxeurs à arbre dévié, conçus pour des fosses à accès difficile, sont d'une utilisation très aisée ; ils permettent un bon mixage, quelle que soit la forme du trou à barbotine.

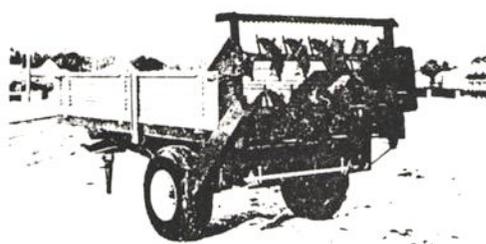
a.1. La tonne à lisier



Elle permet le pompage, le transport et l'épandage des lisiers sur les terres. Elle doit être munie d'une pompe à dépression, ce qui est le cas de la quasi-totalité des tonnes à lisier. La contenance ne doit pas excéder 6 à 7 000 litres. Il faut éviter l'utilisation de matériels encombrants sur des aires de travail réduites.

La tonne pourrait être remplacée par une pompe à moteur électrique ou thermique, ce qui diminuerait les manoeuvres de tracteur. Il semble ne pas exister de matériel adapté sur le marché.

a.3. L'épandeur à fumier



C'est une remorque disposant d'un fond mouvant et d'un système d'évacuation à l'arrière.

Le hérissron doit être double pour la fabrication de la terre-paille. La capacité utilisable n'est limitée que par les dimensions des matériels proposés.

b. Les étapes

De la terre extraite (éventuellement criblée) jusqu'à la terre-paille prête à l'emploi, la préparation compte trois étapes.

b.1. Elaboration de la barbotine

L'excavation, issue de l'extraction de la terre qui sera utilisée pour la réalisation du bâtiment, est étanchée avec un film de polyane. De la terre y est reversée jusqu'à mi-hauteur ; de l'eau y est ajoutée dans les proportions citées et en fonction de la quantité de terre mise en place.

Il est souhaitable de faire cette préparation la veille au soir afin de laisser la terre détremper toute la nuit.

La barbotine est obtenue par malaxage des deux éléments à l'aide d'un mixeur à lisier monté sur un tracteur. Cette opération nécessite de 15 à 30 minutes selon la quantité préparée (4 à 8 m³).

b.2. Contrôle de la qualité de la barbotine

Un échantillon de 10 cm³ est prélevé et versé d'une hauteur de 20 cm sur une surface lisse (plaque de verre). La barbotine s'étend en rond, sur la surface réceptrice. Si le diamètre est égal à 16 cm, la barbotine a la consistance souhaitée ; s'il est supérieur, la barbotine est trop liquide et il faut rajouter de la terre ; s'il est inférieur, la barbotine est trop épaisse et il faut remettre de l'eau.

b.3. Transport de la barbotine

La barbotine préparée doit être pompée pour être mélangée à la paille.

Lors des manipulations préliminaires effectuées au CETE (1) de Rouen, différentes pompes ont été essayées sans résultats probants. Sur le premier chantier mené en septembre-octobre 1985, au Molay-Littry, la tonne à lisier du maître d'ouvrage a été utilisée avec succès.

Fonctionnant sur le principe de l'aspiration par la création d'une dépression à l'intérieur de la cuve, et du refoulement par la création d'une surpression, la tonne à lisier permet de pomper et de transporter la barbotine du lieu de malaxage jusqu'à l'épandeur dans lequel s'effectue le mélange avec la paille. 7 à 15 minutes sont nécessaires à cette opération.

b.4. Mélange barbotine-paille

Cette étape nécessite une intervention manuelle ; un opérateur prépare le mélange. Il étend, dans le fond de l'épandeur, une botte de paille de 15 kg sur laquelle il verse 90 litres de barbotine en prenant soin de bien l'étaler. Il dispose une deuxième botte de paille qu'il recouvre à nouveau de la même quantité de barbotine et répète l'opération jusqu'au remplissage de l'épandeur qui, selon ses dimensions, nécessitera de 10 à 20 bottes. L'épandeur est alors mis en action ; les racleurs poussent la paille et la barbotine vers les hérissons arrière en rotation, qui les expulsent en contrebas. 30 à 50 minutes suffisent pour mener à bien l'opération.

(1) CETE : Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement.

Le produit obtenu, d'une bonne homogénéité, sera prêt à l'emploi après quelques heures de ressuyage.

Ce procédé de fabrication, après avoir été testé au cours de l'été 1985, a été appliqué par deux fois en chantier réel sans qu'il ait été nécessaire de modifier le processus.

c. La mise en oeuvre

La terre-paille produite, il reste à la mettre en place dans les panneaux délimités par l'ossature en bois.

Une série de coffrages montés sur la longueur de la paroi délimitent un volume à combler avec la terre-paille. Reprise et amenée sur le lieu de remplissage à la fourche hydraulique, elle est chargée et déposée entre banches à la fourche à main par un premier opérateur, puis tassée par un second. L'ensemble des volumes délimités par une levée correspondant à une série de coffrages en ligne, sur la longueur ou la largeur du bâtiment, ne peuvent être décoffrés avant que la suivante ne soit réalisée. Un tasseau de bois, de la largeur du panneau, est incorporé dans l'épaisseur de la paroi pour la consolider, à chaque levée.

Alors que l'on pensait achopper sur la préparation de la terre-paille, lors de la construction du premier bâtiment, c'est le banchage qui a été à l'origine de plusieurs difficultés. En raison de la faible épaisseur des murs (22 cm) conditionnée par les sections de la charpente, un compactage manuel a été nécessaire. Les coffrages en bois trop grands étaient peu maniables et n'autorisaient pas une ventilation du matériau avant décoffrage. Maintenus par serre-joints en serrage sur l'ossature, ils étaient d'une mise en place délicate.

Les panneaux, délimités par l'ossature principale et secondaire qui avaient une longueur de 2,5 m pour une hauteur de 3 m, sont apparus à l'usage trop grands.

c.1. Une ossature en bois améliorée

Pour la deuxième réalisation, une ossature secondaire mieux adaptée (1) a été prévue. Elle divise l'espace compris entre chaque poteau porteur en cadres d'une largeur maximale de 1,5 m, d'une épaisseur de 30 cm et d'une hauteur de 4,5 m. Il apparaît après observation que cette dernière dimension est trop importante.

(1) Annexe 4 : Plan et coupe de l'ossature portante du séchoir solaire à foin de M. GUILLARD.

Il est préférable de se limiter à des hauteurs n'excédant pas 3,5 m. Cette seconde opération a montré qu'il est nécessaire de concevoir l'ossature portante, non comme une partie indépendante ayant un rôle spécifique et servant accessoirement à recevoir la terre-paille, mais comme un élément faisant partie intégrante de l'ensemble.

c.2 Vers une ossature bien adaptée

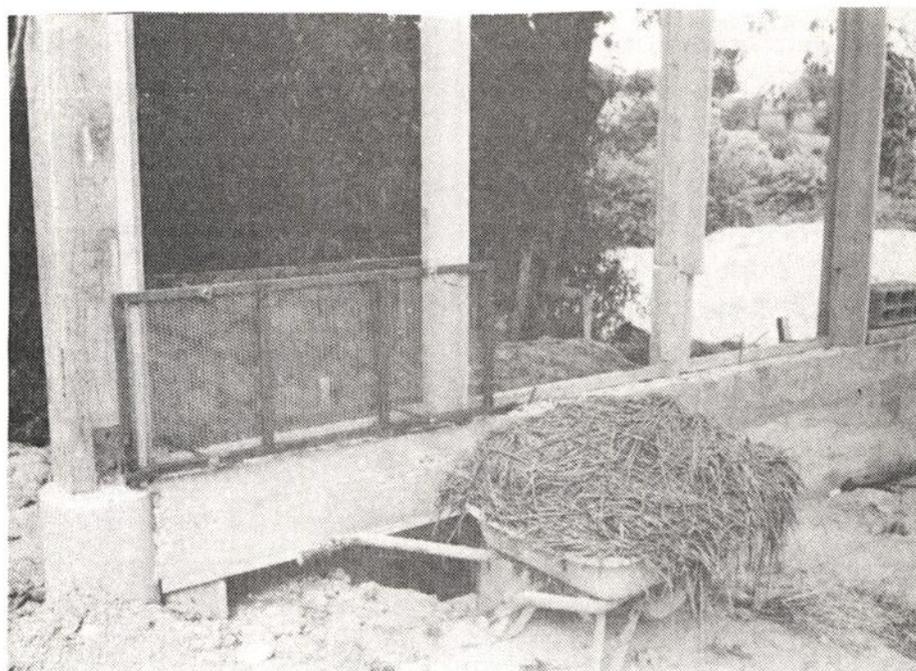
Dans cette perspective, l'ossature principale et l'ossature secondaire ne font qu'une. Elles constituent des cadres servant à recevoir la terre-paille et supportant les fermettes de la toiture. Toute cette charpente réalisée en bois de petite section (bois de pays !) est préfabriquée en atelier et montée sur le lieu du chantier. Cette conception permet entre autres de résoudre les difficultés de banchage rencontrées aux angles.

L'autre amélioration importante essayée sur le deuxième chantier a résidé dans les banches spécifiques.

c.3. Conception de coffrages adaptés à la terre-paille

L'observation des problèmes rencontrés nous a amené à étudier et à réaliser des coffrages prenant en compte la nature du matériau à bancher et la forme de l'ossature secondaire.

Fabriqués en tubes carrés de 40 x 40 renforcés par deux entretoises, ils sont recouverts de grillage étiré. L'accrochage sur l'ossature se fait par le serrage exercé par quatre axes traversant les banches.

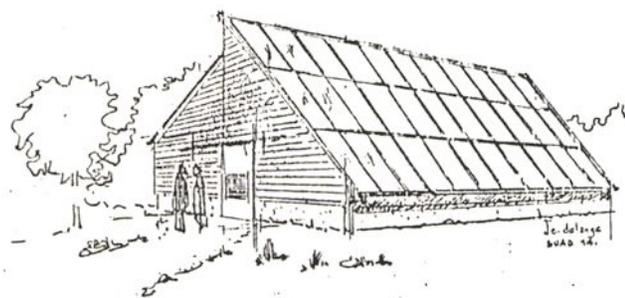


d. Les réalisations

L'une des opérations a été menée dans le Calvados, l'autre dans la Manche.

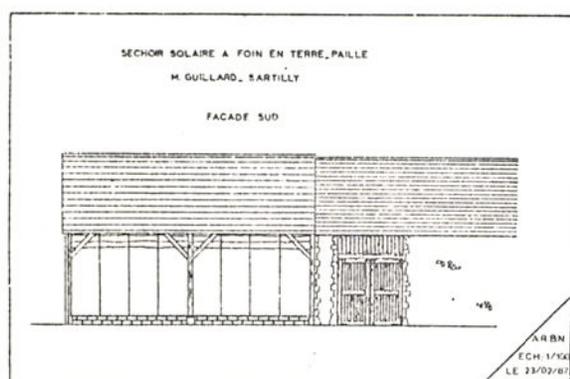
Ces réalisations concernent deux bâtiments à usage agricole. Le premier, construit en octobre 1985, est une étable à veaux ; le deuxième, monté à la fin de l'été 1986, est un séchoir solaire à foin.

d.1. L'étable à veaux de M. LELIMOUSIN au Molay-Littry



Ce bâtiment rectangulaire, de 7 m x 15 m, abrite 46 veaux d'engraissement. Sa forme peu conventionnelle est due à l'utilisation de la couverture sud comme toiture solaire. L'ossature portante en charpente moisée est en bois de pays. Les murs de terre-paille font 22 cm d'épaisseur.

d.2. Le séchoir à foin de M. GUILLARD à Sartilly (50)



Cette construction, de 12,3 m x 7,3 m, est destinée à finir de sécher le foin sous abri. Le projet prévu initialement pour du séchage en vrac a été modifié pour du foin en balles rondes.

La terre-paille avait dans le premier projet un rôle thermique et hygrique important qui devenait sans objet pour le projet final. Néanmoins, le remplissage des panneaux avec de la terre-paille a été maintenu, pour des raisons économiques et esthétiques (coût plus bas que pour les autres bardages, tradition régionale de bâtiments agricoles en terre) et pour des motifs techniques. En effet, ce deuxième chantier nous a permis d'affiner la disposition de la structure secondaire et ses dimensions optimales et de mettre au point le système de coffrage adapté à la terre-paille.

III - EVALUATION TECHNICO-ECONOMIQUE DES MATERIAUX

L'ensemble des observations données dans ce chapitre sont tirées de deux expériences de chantier, menées dans la région bas-normande. Elles ne prennent toute leur valeur que dans ce contexte régional spécifique.

Les évaluations ont porté uniquement sur les caractéristiques physiques (mécaniques et thermiques) d'une part, et les critères économiques d'autre part.

L'appréciation générale des données se fait dans une perspective d'évolution et d'amélioration des filières.

III.1. - ASPECTS TECHNIQUES

A - LES BRIQUES DE TERRE CRUE

1) La résistance mécanique

a) Le matériau

Les essais de résistance à l'écrasement ont porté sur des briques ALTECH et TERRE 2 000, fabriquées à Sartilly.

Les mesures ont été effectuées par Jean-Pierre DEVARS, Technicien au Centre d'Etudes Routières du Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement de Rouen (C.E.R. du C.E.T.E.). Les deux types de briques étaient dosés à 5 % de ciment (CPA).

Les essais de compression ont été menés avec deux vitesses d'écrasement ; l'une de $5 \cdot 10^{-4}$ bars/seconde et l'autre de 5 bars/seconde. La première valeur, normalisée pour les blocs pleins perforés (NF P 14 304), est celle préconisée par le CRATERre pour les briques de terre crue ; l'autre est celle utilisée pour les briques pleines cuites (NF P 13 306). Il n'existe pas de références normalisées pour les briques de terre. Une comparaison avec d'autres matériaux de construction permet de les situer.

Tableau comparatif des résistances à l'écrasement de quelques matériaux de construction :

Matériaux		Bloc de ciment creux (25)	Brique creuse	Bloc en béton cellul.	Brique ALTECH 5 % ciment	Brique TERRE 2 000 5 % ciment
σ _c en MPa	Maxi	←	2	3,5	2	2,4
	Mini	2,5	1,6	3,6	1,2	1,6

	Valeurs normalisées (NF P 13 301) (NF P 14 304) (NF P 14 306)
	Valeurs mesurées

Les valeurs obtenues sont comparables à celles des briques creuses imposées par la norme. Suffisantes pour le type de construction projetée ($R + 1$ maximum), elles sont faibles, voire médiocres ; elles s'expliquent par la forte teneur en eau de la terre même après le traitement subi et par sa finesse.

b. Le bâtiment

Le bâtiment achevé depuis la fin de l'automne 1986 ne présente pas de désordres importants en dehors de deux micro-fissures, l'une au-dessus de l'arc surbaissé de la porte principale (et en relation avec celui-ci), l'autre en façade principale entre le chaînage et l'appui de la fenêtre du premier étage.

Même si un bâtiment se stabilise toujours dans les premiers mois qui suivent sa construction, il est prématuré de tirer des conclusions définitives.

2) Le comportement thermique

a. Le matériau

Les mesures effectuées par J.P. LAURENT, au C.S.T.B. de Grenoble, ont porté sur des briques fabriquées avec la terre de Marchésieux. Les observations préliminaires ont montré une bonne homogénéité du matériau, mais une teneur en eau pondérale très élevée, d'où une densité faible qui donne des coefficients de conductivité thermique de bonne valeur à sec.

Tableau comparatif des coefficients de conductivité thermique λ , des résistances thermiques R et des densités DS des différents matériaux :

Matériaux	Bloc de ciment creux	Bloc en béton cellul.	TERRE 2 000	ALTECH
			W % O %	W % O %
λ	1,40	0,27	0,56	0,56
R	0,15	0,55	0,27	0,27
DS	1,00	0,60	1,69	1,73

Les résistances thermiques mesurées sont intéressantes et donnent une capacité d'isolation correcte. La densité des briques de terre est nettement au-dessus des valeurs des autres matériaux (une fois et demi le parpaing de ciment). C'est cette masse volumique élevée qui confère aux briques de terre leur bonne inertie thermique.

b. Le bâtiment

L'aménagement intérieur de la laiterie-fromagerie n'étant pas achevé, il n'a pas encore été possible d'y mener un suivi hygrothermique. Une étude (1) menée par Dominique GAMON, du CEMAGREF de Rennes (2), au cours de l'année dernière dans une maison en mâssé des marais de Carentan, donne un aperçu sans doute amplifié de l'ambiance interne d'une enveloppe épaisse en terre. Il en ressort que l'amplitude de variation de la température est extrêmement réduite par rapport à celle de l'extérieur, quel que soit l'endroit de la sonde (cuisine ventilée ou chambre non ventilée) ; l'hygrométrie intérieure est d'une grande stabilité face aux variations extérieures et elle n'excède que rarement 80 %.

B - LA TERRE-PAILLE

1) La résistance mécanique

a. Le matériau

Il sert au remplissage d'une ossature portante, ce qui sous-entend qu'il n'est pas porteur. Pourtant, et c'est un paradoxe, son comportement à l'écrasement est excellent. Mais il est sensible aux effets de flambement qui le rendent impropre à supporter des charges.

b. Le bâtiment

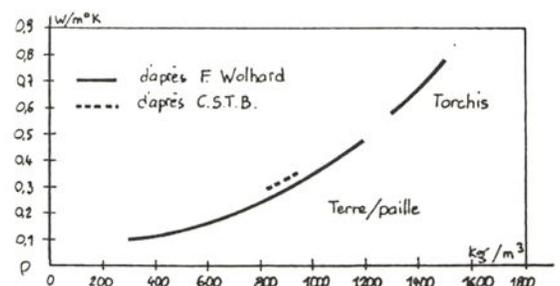
La charge du bâtiment étant entièrement supportée par l'ossature, elle n'a pas d'effet sur la terre-paille. Ce matériau n'offre pas une plus grande fragilité aux effets latéraux (poussées d'animaux) que d'autres produits. Sa masse importante lui donne une très bonne inertie aux chocs.

2) Le comportement hygrothermique

a. Le matériau

Ce matériau a des capacités d'isolation tout à fait intéressantes, variables en fonction de la teneur en paille ou en terre qui font fluctuer sa masse volumique (3).

Conductivité thermique de la terre-paille



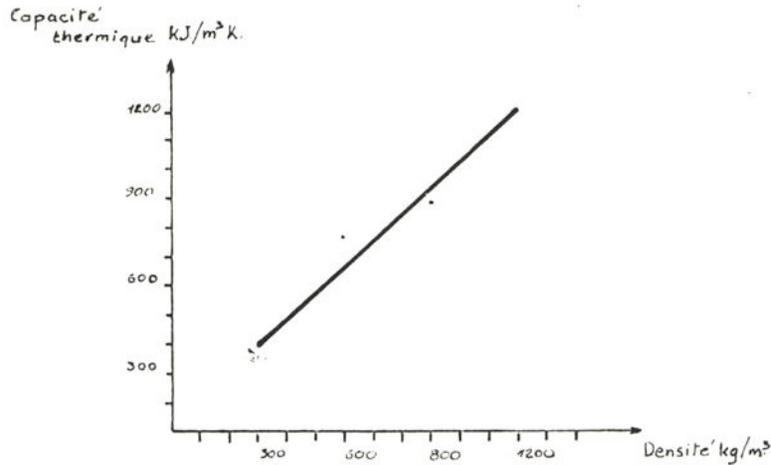
(1) Annexe 5 : Courbe de température et d'hygrométrie été/hiver dans une maison : la mâsse des marais de Carentan.

(2) CEMAGREF : Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts.

(3) Annexe 6 : Tableau comparatif de différentes terre-paille et autres matériaux terre.

La capacité d'isolation de la terre-paille se double d'une propension à l'inertie thermique qui varie inversement (1).

Capacités thermiques de la terre-paille en fonction de la densité (selon Frantz VOLHARD)



Cette double qualité thermique se conjugue avec une propriété hygroscopique. De par sa structure très aérée qui lui donne une bonne porosité (variable en fonction de la force de compaction et de l'humidité latente de la terre à la mise en oeuvre), la terre offre une capacité d'absorption, de transfert et de restitution de l'eau sous forme de vapeur.

b. Le bâtiment

Des suivis menés avec la collaboration technique du CEMAGREF de Rennes (2) sur le bâtiment d'élevage de veaux du Molay-Littry apportent une confirmation in situ des caractéristiques déterminées en laboratoire.

Les observations ont été menées sur deux périodes, une en été, l'autre en hiver. Elles ont porté sur quatre variables :

- la température extérieure sous abri ;
- la température d'ambiance au centre de la salle (hauteur 1,9 m) ;
- l'humidité extérieure et intérieure ;
- la vitesse de l'air à la hauteur d'une case.

Les capteurs d'hygrométrie extérieure et de vitesse de l'air n'ont pas fonctionné pour la période du suivi hivernal.

(1) Annexe 7 : Tableau des caractéristiques thermiques de la terre-paille en fonction de la densité.

(2) Etudes réalisées par Dominique GAMON.

Les observations n'ont porté que sur un seul bâtiment. Pour quantifier avec précision l'apport du matériau sur l'ambiance intérieure, il est nécessaire de comparer deux unités d'élevage tout à fait identiques, à l'exclusion du matériau de construction, ce qui ne peut se concevoir que dans un cadre expérimental. Un suivi de ce type doit se mettre en place avec le Lycée Agricole de Vire au cours des prochains mois. Les résultats obtenus pendant les suivis estival et hivernal ne donnent que des tendances.

Observations

. Période d'hiver (1)

L'effet de tamponnage du bâtiment, c'est-à-dire la faculté qu'a celui-ci d'affaiblir les effets climatiques extérieurs sur l'environnement intérieur, est lisible sur le graphe d'enregistrement. L'écrêtage constaté des températures et de l'hygrométrie est important si l'on veut bien considérer que le bâtiment est soumis constamment à une ventilation statique (et non dynamique, donc plus difficilement contrôlable).

Cet effet de l'enveloppe est plus net pour les températures minima que pour les maxima (presque 9 °C de décalage entre les minima intérieures/extérieures pour moins de 4 °C entre les maxima). L'ambiance intérieure subit moins les effets de baisse de température que les effets de hausse.

A l'action de l'enveloppe, il faut ajouter l'apport calorifique des animaux et la diminution de la ventilation par la fermeture partielle des trappes qui tend à retarder la descente de la température.

. Période d'été (2)

Les observations menées sur le mois d'août 1986 confirment les impressions dégagées sur la période d'hiver. L'ambiance interne réagit plus vivement aux montées de température qu'aux baisses. La régulation hygrométrique joue à plein dans les périodes froides (nuit). Cette stabilité est liée à la température intérieure nocturne du bâtiment qui se maintient à un niveau élevé. Le 26 août 1986, l'hygrométrie interne a atteint l'optimum de la période en se calquant sur les niveaux extérieurs. Parallèlement, les températures intérieures s'écroulent pour atteindre le niveau des températures extérieures. Elles subissent l'effet de la conjonction d'une ventilation assez soutenue et d'une baisse des températures extérieures prolongées. Un renouvellement d'air important diminue considérablement l'effet d'inertie des parois et influence négativement la sonde de température par convection. De manière générale, l'hygrométrie reste à des niveaux inférieurs à ceux enregistrés dans les bâtiments conventionnels.

(1) Annexe 8 : Courbe de températures et d'hygrométrie intérieures et extérieures. Suivi d'hiver.

(2) Annexe 9 : Courbe de températures et d'hygrométrie intérieures et extérieures. Suivi d'été.

3) Bâtiments d'élevage et matériaux de construction

En bâtiment d'élevage hors sol, l'enveloppe joue essentiellement un rôle de protection contre les effets climatiques (vent, pluie, neige, froid et chaleur) et doit contribuer à l'optimisation des critères de production.

Actuellement, les zootechniciens s'accordent pour penser que ces deux facteurs principaux interviennent par ordre d'importance sur ces critères du point de vue du bâtiment :

- l'hygrométrie interne,
- la temporisation et la diminution des effets thermiques.

Peu de matériaux de construction courants ont la propriété de réguler l'**hygrométrie interne**. Cela suppose que l'organisation structurelle des éléments constitutants autorise le transfert de l'humidité à l'intérieur du matériau dans des proportions limitées (quelques pour/cent) sans altération de sa cohésion.

Les **effets thermiques** sont amoindris par la capacité d'isolation du matériau qui s'exprime par le coefficient de conductivité thermique. Plus il est faible, plus le matériau est isolant. Le déphasage des effets des variations de température extérieure est dû à l'inertie thermique du matériau (les matériaux fortement isolants ont une inertie faible). Il s'agit donc de trouver un compromis entre ces deux propriétés contradictoires pour atteindre un équilibre satisfaisant en conservant des épaisseurs de paroi acceptables.

Observations sur quelques matériaux de construction

Tous les produits à base de **liants hydrauliques** (ciment, chaux) sont assez inertes à l'eau sous forme de vapeur et peu isolants. Bien que très utilisés pour la construction de bâtiments d'élevage, ils sont inadaptés en regard des trois critères définis ci-dessus. S'il est possible de compenser les insuffisances de leur pouvoir isolant par l'ajout de produits de synthèse à faible conductivité thermique, il est impossible d'en modifier les qualités hygroscopiques.

Le **bois** a des propriétés d'isolation et de régulation hygrométrique qui agissent positivement sur le confort intérieur, mais il n'a aucune capacité d'inertie thermique.

Les **matières plastiques** sont encore peu utilisées pour la construction de bâtiments d'élevage. Toutefois, quelques applications en bâtiment tunnel montrent qu'avec une mise en oeuvre adaptée, ce matériau offre tout au plus une qualité d'isolation correcte.

La terre agit sur l'hygrométrie interne et sur les effets thermiques. Ceux-ci se trouvent modulés en fonction de la technique utilisée, c'est-à-dire de l'intégration ou non de liants organiques (paille, foin). Si l'on construit dans une région à fort contraste climatique, aux amplitudes de température importantes, il est préférable d'opter pour une bonne inertie. Pour les régions à faible amplitude de température, les matériaux à bonne capacité isolante sont recommandés. Pour les climats tempérés de l'Ouest de la France, le torchis ou la terre-paille conviennent bien ; la bauge peut être utilisée.

III.2. - ASPECTS ECONOMIQUES

A - LES BRIQUES DE TERRE CRUE

1) Le matériau (fabrication)

Calculer le prix de revient des briques de terre en partant de cette expérience n'a, en regard de tous ces faits, que peu d'intérêt si on ne place pas en comparaison des calculs théoriques, des bases vraisemblables, dans l'hypothèse d'une future amélioration des matériels. Afin de garder une cohérence entre les équipements analysés, l'étude englobera pour ALTECH la presse et le malaxeur S.E.D.

a. Briques TERRE 2 000

Rappelons que ce matériel n'a pas donné les résultats escomptés.

Afin de mettre en évidence les effets de la productivité sur le prix de revient d'une brique, nous raisonnerons sur les deux valeurs retenues que nous nommerons productivité P1 (2 000 briques/jour) et P2 (800 briques/jour).

L'investissement nécessaire à l'acquisition de l'ensemble presse/malaxeur/vis est de 360 000 F, amortissables sur 7 ans. Il pourrait être couvert par un prêt à un taux annuel de 10 % donnant des charges fixes de 7 400 F. La maintenance du matériel est estimée à 7 000 F/an pour 2 000 heures de fonctionnement. Le coût horaire moyen d'utilisation est de 40 F, soit :

- 0,16 F/brique pour P1
- 0,40 F/brique pour P2

La fabrication nécessite cinq personnes ayant une qualification de manoeuvre, payées au taux horaire moyen de 35 F. Pour une journée de 8 heures, le coût salarial sera de 1 400 F, soit :

- 0,70 F/brique pour P1
- 1,75 F/brique pour P2

Le stabilisant, troisième poste de dépense significatif dans la fabrication des briques, est bien évidemment fonction du dosage appliqué. Nous prendrons pour le calcul une stabilisation moyenne (5 %) et plus forte (7 %), soit :

- 0,38 F/brique à 5 %
- 0,54 F/brique à 7 %

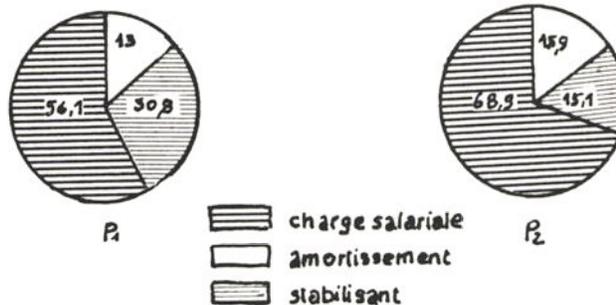
Le prix de revient d'une brique est extrêmement soumis aux aléas de fonctionnement de la presse ou de son matériel de périphérie. De la productivité théorique idéale à la réalité en chantier, le coût de fonctionnement rapporté à l'unité produite passe du simple au double (voir infra).

	P1	P2
5 %	1,25	2,5
7 %	1,4	2,7

Prix des briques
TERRE 2 000 en
fonction de la
productivité et
du pourcentage
de stabilisant

La main-d'oeuvre a une part très élevée dans le prix global de la brique qui varie de 20 %, du cas le plus favorable au plus défavorable. Les charges fixes et la maintenance représentent une part relativement faible.

Charges de production des briques de terre



b. Briques ALTECH

Deux niveaux de productivité ont été retenus pour le calcul. Au prix de la presse, 65 000 F, nous devons ajouter celui du malaxeur qui est de 22 000 F.

Le montant de l'investissement, 87 000 F, amortissable en 7 ans, est couvert par un emprunt à un taux annuel de 10 % entraînant des charges fixes de 17 870 F.

La maintenance du matériel est fixée à 2 000 F par an pour 2 000 heures de fonctionnement. Le coût horaire moyen est donc de 9,90 F, soit :

- 0,07 F/brique pour une productivité P1 de 1 200 briques/jour ;
- 0,08 F/brique pour une productivité P2 de 1 000 briques/jour.

Quatre personnes sont nécessaires au bon déroulement de la fabrication. Payées au taux horaire moyen de 35 F, elles représentent en charges salariales 1 120 F/jour, soit :

- 0,9 F/brique pour P1
- 1,1 F/brique pour P2

Le stabilisant est incorporé dans des proportions identiques à celles des briques TERRE 2 000, soit :

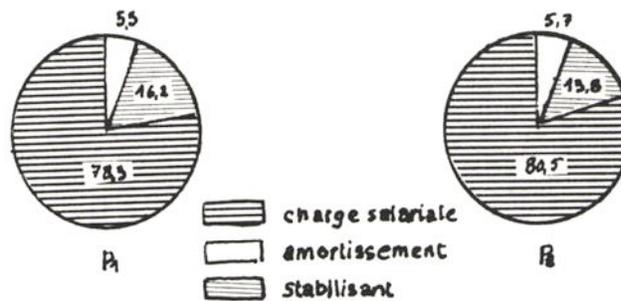
- 0,11 F/brique à 5 % de stabilisant
- 0,27 F/brique à 7 % de stabilisant

Prix des briques de terre ALTECH en fonction de la productivité et du pourcentage de stabilisant :

	P1	P2
5 %	1,2	1,4
7 %	1,3	1,5

De même que pour les briques TERRE 2 000, la part de la main-d'oeuvre dans la fabrication est très élevée

Charges de production des briques de terre



L'observation des répartitions des coûts pour les deux types de briques montre :

- que la part salariale est importante dans les deux cas de figure. Les presses sont définies, conçues et fabriquées pour être exportées vers des pays où la main-d'oeuvre est très bon marché (Tiers Monde) ;
- que cette part salariale diminue avec une automatisation grandissante ;
- que le stabilisant intervient de manière importante quand les productivités sont correctes ;
- que la chute de productivité a des répercussions plus négatives pour TERRE 2 000.

Tableau comparatif du prix des blocs de ciment creux, des briques de terre et des blocs de béton cellulaire :

La comparaison des prix de ces matériaux est faite en dehors du critère d'isolation, d'inertie ou de confort.

Afin d'être comparables, les coûts vont être ramenés à l'unité de surface pour une épaisseur de mur de 15 cm.

Matériaux	Quantité à l'unité de surface (m ²)	Prix Unitaire (F)	Prix au m ²
Blocs de ciment creux 15x20x50	10	3,5	35
Blocs béton cellul. 15x25x60	8	16,2	130
Briques TERRE 2 000 P1 15 x 15 x 30	20	1,25	25
Briques TERRE 2 000 P2	20	2,5	51
Briques ALTECH P1 9,5x15 x29,5	31	1,2	37
Briques ALTECH P2	31	1,4	43

Il apparaît à la lecture de ce tableau que les briques de terre crue ont un coût de production rapporté au m² comparable (ALTECH), voire plus faible (TERRE 2 000), que celui du parpaing de ciment, à condition que les fabricants optimisent les performances de leur matériel. Encore faut-il tenir compte de la mise en oeuvre !

2) Le bâtiment (mise en oeuvre)

Le temps de mise en oeuvre varie selon le type de produit (brique, parpaing...).

Sur un chantier expérimental comme celui de Sartilly, il est difficile de mesurer la mise en oeuvre des briques de terre au moins pour deux raisons :

1° Les murs ont, selon les besoins, une épaisseur de 15 ou 30 cm, nécessitant des appareillages différents pour leur montage.

2° L'élévation des murs a été réalisée en partie avec des stagiaires d'un organisme de formation.

Renseignements pris auprès d'un maçon (1) spécialisé dans les constructions en terre, le temps moyen de pose varie de 1,17 à 1,56 h/m², selon que l'on travaille sur un rez-de-chaussée ou un étage, avec une main-d'oeuvre qualifiée et un chantier bien organisé.

(1) Jacky MOUGIN, entreprise ALTECH (prix moyen observé sur chantier réel prenant en compte toutes les difficultés inhérentes. Ce n'est pas un temps chronométré !)

A titre comparatif, le tableau ci-dessous donne des valeurs pour divers matériaux :

Matériaux	Temps de pose moyen/h/m ²
Blocs de ciment creux 15 x 20 x 50	1,25
Briques creuses 15 x 20 x 50	1,20
Blocs béton cellulaire 15 x 25 x 60	0,8
Briques de terre 9,5 x 15 x 29,5	1,17 1,56 \approx 1,36

Nous n'avons pas de valeur pour les briques TERRE 2000. Si l'on cumule fabrication et mise en oeuvre, les briques de terre crue perdent encore de leur compétitivité. Le temps de maçonnerie est plus important, en partie du fait de leurs dimensions plus réduites que celles des autres produits pour des poids importants (6 kg pour ALTECH, 12 kg pour TERRE 2 000).

Dès lors, elles n'ont plus que leurs qualités intrinsèques (capacité de régulation hydrique et thermique, confort d'habitation) pour faire oublier leurs faiblesses économiques.

B - LA TERRE-PAILLE

1) Le matériau (fabrication)

Les calculs concernant le prix de revient de la terre-paille ont été faits à partir des deux chantiers expérimentaux. Pour le matériau, ils n'ont pas varié d'une construction à l'autre.

Le calcul porte sur trois éléments : la main-d'oeuvre, la paille, l'amortissement. Pour ce dernier poste, nous avons choisi l'hypothèse d'une utilisation très réduite des matériels agricoles, ce qui majore le prix dégagé.

Prix de revient total au m ³	250 F	%
dont :		
paille	60 F	24
main-d'oeuvre	20 F	8
matériels	170 F	68

2) Le bâtiment (mise en oeuvre)

Le calcul a été effectué pour une paroi en terre-paille d'1 m², en 30 cm d'épaisseur.

Prix de revient total au m ²	120 F	%
dont :		
main-d'oeuvre	35 F	29
matériels	9 F	8
matériau terre-paille	76 F	63

La mise en oeuvre ayant été améliorée d'un chantier à l'autre, le prix du m² de panneau s'en trouve diminué. Pour une même épaisseur, le panneau rempli serait revenu, sur le site du Molay-Littry, à 160 F le m². L'utilisation des banches métalliques a donc permis de baisser le coût de 40 F (25 %). Cette diminution notable rend encore plus compétitif ce matériau sur le marché de la construction.

Tableau comparatif de matériaux de construction : fourniture + mise en oeuvre (1)

Matériaux	Blocs ciment creux 0,20	Blocs béton cellul. 0,20	Terre-paille 0,30
Prix au m ² , février 1986	163	260	118

Les résultats obtenus sont assez favorables à la terre-paille. Cet avantage est dû principalement à la mécanisation de la fabrication du produit et à l'utilisation de matériels agricoles non spécifiques.

Cette phase de fabrication est prépondérante dans le cycle du produit et doit être soumise constamment à des améliorations.

(1) Déboursé nécessaire à la réalisation de l'ouvrage : main-d'oeuvre + charges sociales + ensemble fournitures.

CONCLUSION

En 1984, lorsque nous avons choisi les briques de terre crue et la terre-paille, nous l'avons fait en regard des indications fournies par le patrimoine local existant et des qualités supposées des procédés sélectionnés.

Près de trois ans ont passé depuis ; quatre chantiers expérimentaux ont été menés avec les deux techniques. Le bilan tiré d'elles est très différent.

Les briques de terre

Même si l'on excepte les difficultés de fabrication rencontrées avec les machines utilisées (particulièrement, le prototype), la brique de terre compactée et stabilisée à froid n'est pas vouée à un développement important dans les pays occidentaux :

- . La fabrication requiert un matériel spécifique qui suppose un investissement préalable non négligeable (de 90 000 F à 400 000 F) pour les presses utilisées.
- . Le fonctionnement fait appel à une main-d'oeuvre importante bien que non qualifiée, quel que soit le degré d'automatisation de la machine.
- . Les cycles de fabrication, de séchage et de mise en oeuvre, propres à ce type de produit, impliquent des rythmes inadaptés au fonctionnement d'une entreprise de bâtiment conventionnelle.
- . Dans les régions à pluviométrie importante, la terre utilisée doit être préalablement séchée. Les deux premiers cycles (fabrication, séchage) sont menés à l'abri et en dehors des périodes de gel.
- . Le produit obtenu autorise des constructions de qualité, tant sur le plan esthétique que sur le plan du confort, mais sa mise en oeuvre assez longue accroît le coût de la construction.

Les presses à briques de terre crue ont été conçues et fabriquées en vue d'être commercialisées vers le Tiers Monde où la main-d'oeuvre est abondante et bon marché.

Un développement de cette filière dans les pays occidentaux suppose une réorientation vers une production semi-industrielle, à partir d'unités de fabrication de parpaings de ciment modifiés. Les briques de terre crue seraient plus légères (en partie évidées) et adaptées aux chantiers de construction habituels. Une expérience de ce type a été menée avec une entreprise de la région grenobloise pour la construction de certains immeubles du "domaine de la terre" de l'Isle d'Abeau.

La terre-paille

Les deux opérations, menées en 1985 et 1986, ont permis de comprendre et d'améliorer une technique de fabrication et de mise en oeuvre orientée vers une mécanisation, dans l'optique d'une diminution des coûts de production.

L'originalité de la démarche consiste à fabriquer un matériau avec de la terre et de la paille (produit standard) par le truchement de matériels non spécifiques, très courants en milieu rural.

La filière proposée est fiable quant à la fabrication bien que celle-ci pourrait être simplifiée par l'usage d'une pompe adaptée, en remplacement de la tonne à lisier.

Quant à la mise en oeuvre de la terre-paille, des modifications ont été apportées d'un chantier à l'autre. Elle peut être améliorée, en particulier par l'utilisation d'une charpente bien adaptée à ce produit. Cette charpente, constituée par des bois de petites sections, donnerait à des cadres délimitant les panneaux de terre-paille un rôle porteur en les associant à des fermettes légères. A chaque paire de cadres, correspondrait une fermette. L'ossature secondaire et l'ossature primaire ne feraient plus qu'une. Cette charpente serait préfabriquée et assemblée en partie en ateliers. Le coût de revient diminuerait de 30 à 40 %. Des discussions avec une entreprise de charpente sont engagées, en collaboration avec le Service Bâtiment d'Elevage de la Chambre Départementale d'Agriculture (Calvados) pour l'étude d'une ossature de ce type.

Sur le plan thermique, la terre-paille offre un compromis satisfaisant entre les capacités d'isolation et d'inertie auxquelles s'ajoute un bon comportement hygroscopique.

Toutefois, ce matériau comporte quelques inconvénients. Il est long à atteindre sa stabilité (plusieurs mois). Sa forte teneur en eau lors de sa mise en place, lui confère une grande sensibilité aux phénomènes de tassement et de retrait. Fragile aux pluies battantes et aux eaux de rejaillissement, il est nécessaire de le protéger, soit par un bardage de bois, soit par un enduit souple à base de chaux aérienne posé après un séchage de trois mois.

Le matériau terre-paille, plus satisfaisant que les briques de terre crue compactée, a atteint un stade qui nécessite l'élaboration d'un cahier technique, c'est-à-dire une normalisation du produit en vue de son développement en milieu agricole.

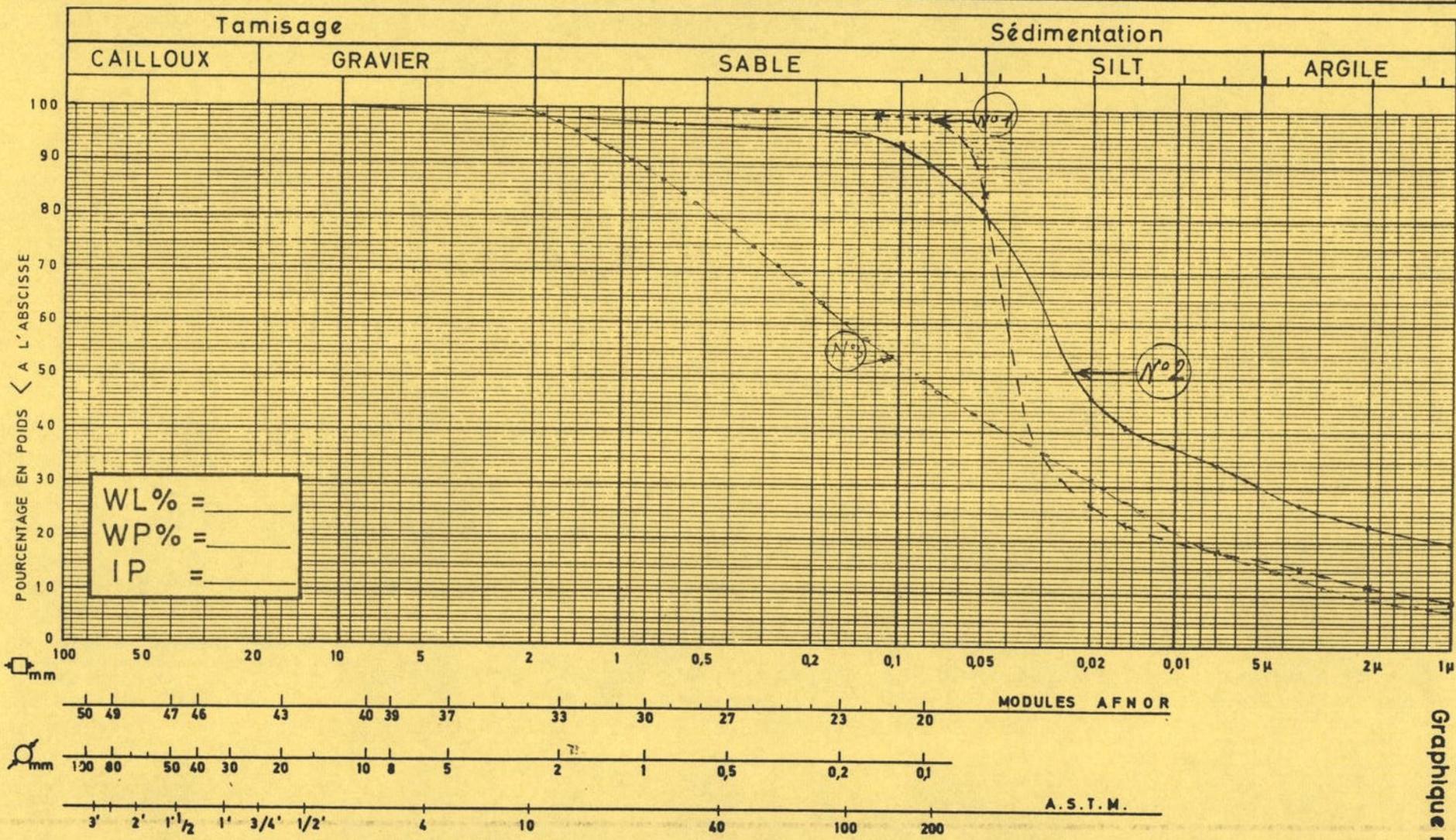
A N N E X E S

Dossier _____

ANALYSE GRANULOMETRIQUE

Sondage : *Sartilly*
Echantillon : *---* N°1
Profondeur : *Marchesieux* N°3

Hay-Litry N°2



Graphique n°

REMARQUES CONCERNANT LES MESURES DE CONDUCTIVITE THERMIQUE

par Jean-Paul LAURENT, C.S.T.B.

- La précision des mesures de λ est de l'ordre de 5 %.
- Les dispersions indiquées (σ_n/\bar{x}) correspondent à des mesures effectuées en différents points de l'échantillon. Pour les deux blocs 1 et 2, elle reste faible, ce qui indique une bonne homogénéité du matériau.
- Les valeurs de teneur en eau pondérale relevées à la réception des échantillons sont exceptionnellement élevées. Ceci est corrélé avec la faible densité sèche du matériau. La porosité globale estimée du matériau (volume air / volume total) est donc élevée (≈ 35 %). Ceci permet d'atteindre une bonne valeur de λ à sec mais risque de poser des problèmes au niveau des comportements mécaniques et à l'eau (λ humide / λ sec $> 2,5$!)
- La densité des échantillons de terre-paille est plus élevée que dans le cas de la terre-paille de L'Isle d'Abeau (ρ 650 kg/m³). Ceci se traduit par un λ à sec sensiblement plus élevé (0,35, 0,3 au lieu de 0,27).

Mercredi 4 décembre : recherche d'un BTR - Granville/Bréville - 2h30 - 55 km
redémarrage 11h
rupture du pot d'échappement : brasure 14h-15h

Jeudi 5 décembre : nouvelle rupture du pot d'échappement ; torsion d'une
des deux ellipses du malaxeur
Avranches - 2h - 30 km - tuyau articulé
redémarrage du chantier à 14h30
décrochage d'une des bavettes de maintien de l'ellipse
extérieure à son extrémité gauche
desserrage des vis de liaison - vérin horizontal - tiroir
altération de l'entonnoir (trémie)

Vendredi 6 décembre : réparation du malaxeur - 1h30
désolidarisation du piston - vérin horizontal à double
effet actionnant le tiroir de remplissage du moule 2h
fuite d'huile flexible - 18h - cassure d'une des vis -
remplacement

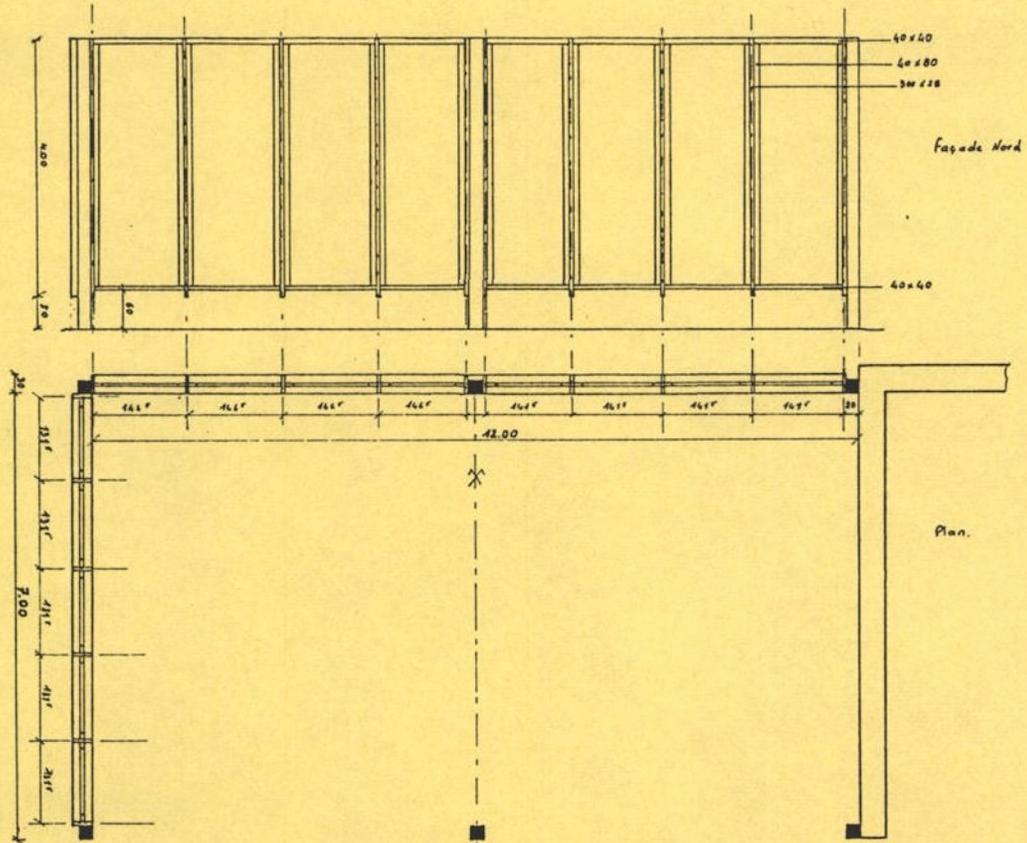
Samedi 7 décembre : réparation 1h30 - 30 km travail de 10h à 20h30

Dimanche 8 décembre : rupture du levier de commande de la presse - $\frac{1}{4}$ heure
travail de 9h à 21h

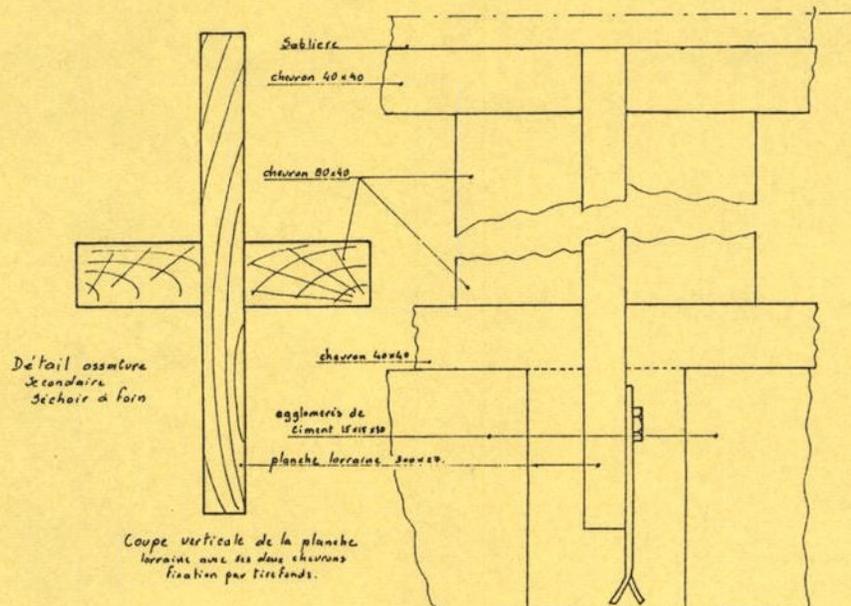
Lundi 9 décembre : travail de 9h à 12h - nettoyage - départ de la machine 15h

Cycle du malaxeur :
- remplissage : 45 secondes
- malaxage : 3mn15secondes
- évacuation : 2 mn
Total 6 mn pour 10 briques
soit 100 briques/heure ou 800 briques/jour

PLAN ET COUPE DE L'OSSATURE SECONDAIRE
DU SECHOIR SOLAIRE A FOIN DE M. GUILLARD



Ossature secondaire pour remplissage en terre-paille. éch 20m/m.



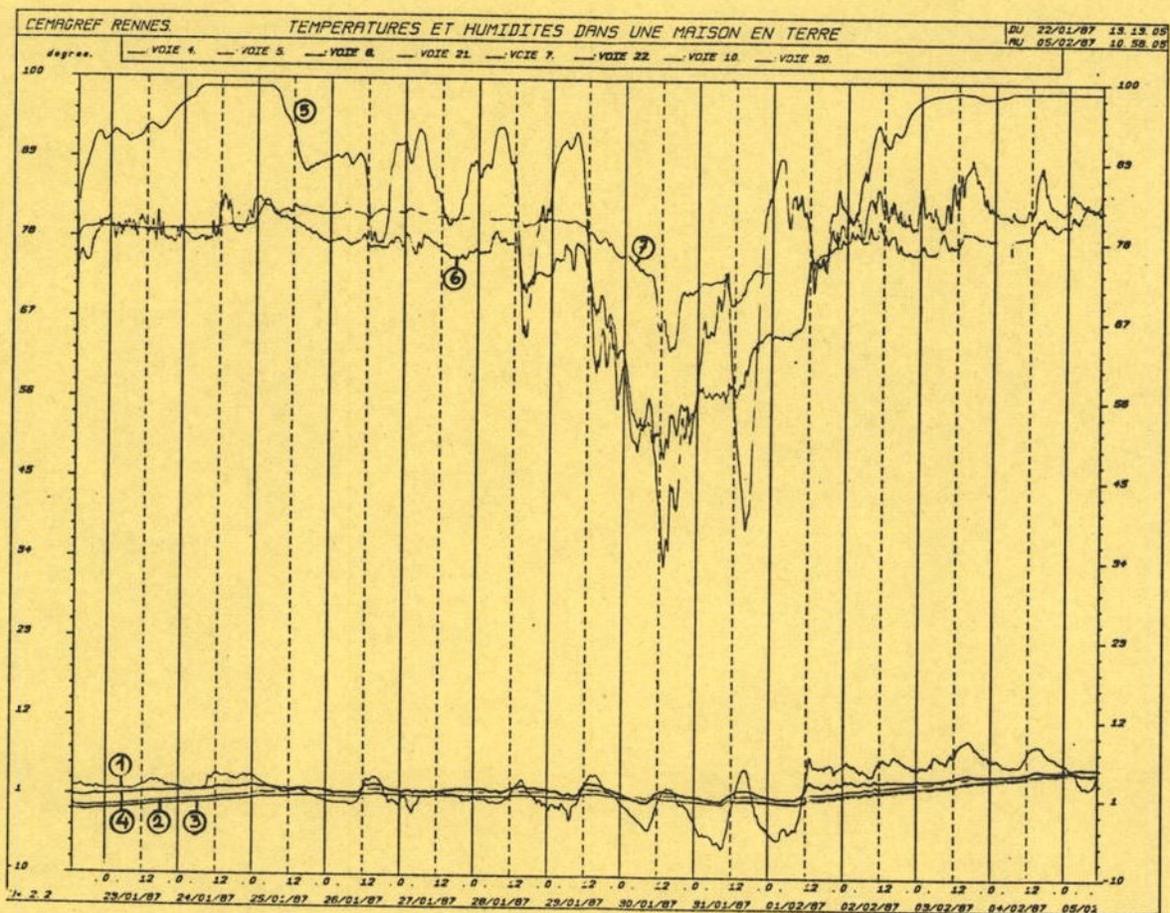
Détail ossature
secondaire
Séchoir à foin

Coupe verticale de la planche
lorraine avec ses deux chevrons
fixation par tirefonds.

COURBES DE TEMPERATURE ET D'HYGROMETRIE
DANS UNE MAISON EN TERRE

HIVER

- Voie 1 température extérieure
2 température ambiante 1er étage salle 1
3 " " " " salle 2
4 " " dans la cuisine
5 hygrométrie extérieure
6 hygrométrie dans la cuisine
7 hygrométrie au 1er étage salle 1



COURBES DE TEMPERATURE DANS UNE MAISON EN TERRE

- Voie 1 Température de paroi au 1er étage
2 Température ambiante dans la cuisine
3 Température ambiante au 1er étage
4 Température extérieure sous abri

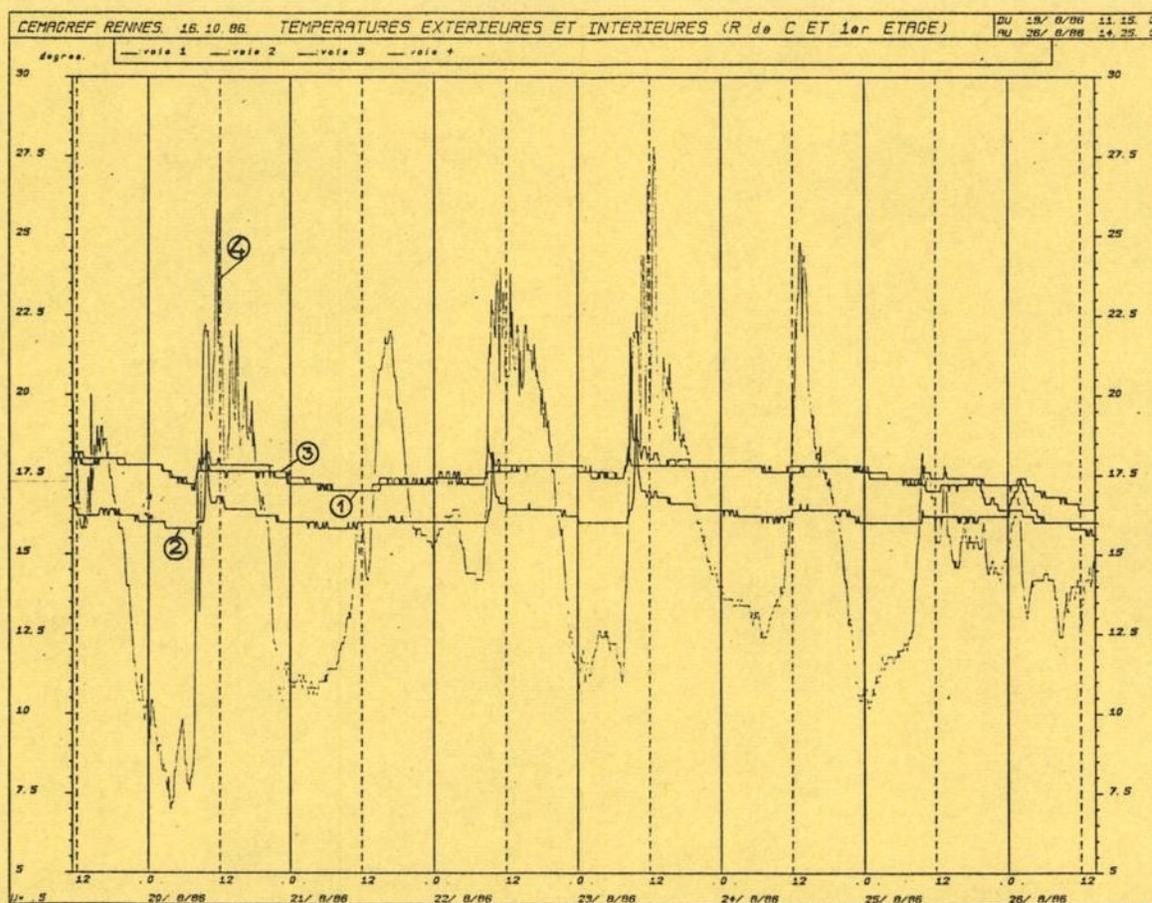


Tableau comparatif de différentes terre-paille et autres matériaux terre (communiqué par Frantz VOLHARD)

	Densité kg/m ³	Conductivité W/mK
Terre-paille	300	0,1
	400	0,12
	600	0,17
	800	0,25
	1 000	0,35
	1 200	0,47
● Terre-paille	830	0,30
● Terre-paille	944	0,36
Torchis	1 400	0,59
	1 600	0,73
Pisé	1 800	0,91
	2 000	1,13

● Provenant du Molay-Littry

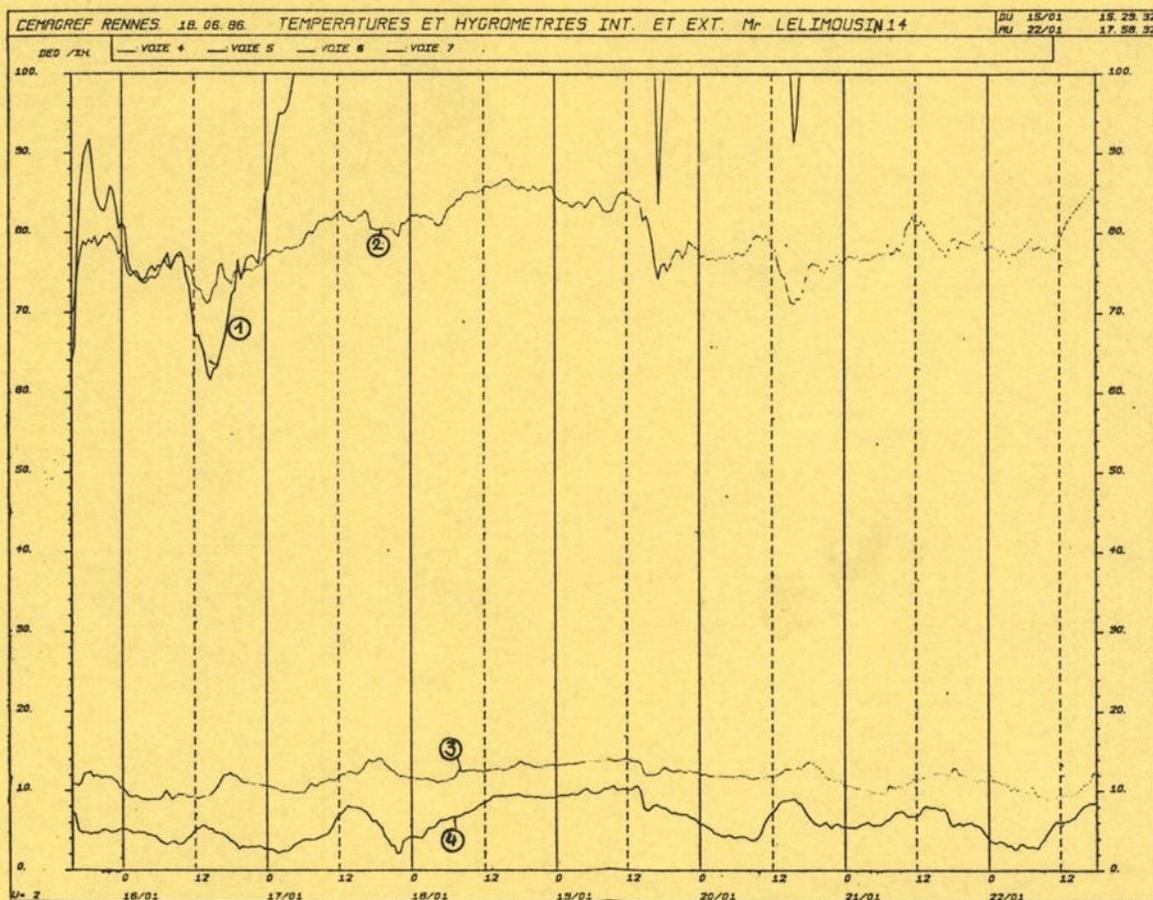
Tableau des caractéristiques thermiques de la terre-paille en fonction de la densité (communiqué par Frantz VOLHARD)

Densité e kg/m ³	Chaleur spécifique (chaleur massique) c kJ/kgk	Capacité thermique S = c. kJ/m ³ k
300	1.3	390
400	1.2	480
600	1.1	660
800	1.1	880
1000	1.1	1100
1200	1.0	1200

COURBE DE TEMPERATURE ET D'HYGROMETRIE
DANS LE BATIMENT D'ELEVAGE DE VEAUX DU MOLAY-LITTRY

HIVER

- 1 Hygrométrie extérieure (la sonde est tombée en panne le 2ème jour)
- 2 Hygrométrie intérieure
- 3 Température extérieure
- 4 Température intérieure



COURBE DE TEMPERATURE
D'HYGROMETRIE ET DE VITESSE DE L'AIR
DANS LE BATIMENT D'ELEVAGE DE VEAUX DU MOLAY-LITTRY

ETE

- 1 Hygrométrie extérieure
- 2 Hygrométrie intérieure
- 3 Température extérieure
- 4 Température intérieure
- 5 Vitesse de l'air

