



## **DIVISION PRODUITS DE LA CONSTRUCTION**

Domaine de Saint Paul  
102 route de Limours  
78471 SAINT REMY LES CHEVREUSE

## **DIRECTION SCIENTIFIQUE**

# **UTILISATION DE LA PAILLE EN PAROIS DE MAISONS INDIVIDUELLES A OSSATURE BOIS**

## **Extraits du Rapport final Tome 2 – Expérimentations en laboratoire Instrumentation in situ**

**Using sustainable materials as walling for  
individual housing with wood structure  
Mise à jour**

**Final report extracts  
Volume 2 – Laboratory experiments  
Site instrumentation  
Update**

## **Etude effectuée avec l'aide financière de l'A.D.E.M.E**

Convention ADEME-ITFFB n° 02.04.19 du 04/10/2002  
Durée du contrat : 14 mois      Responsable ADEME : M. Philippe LEONARDON

## **et de la Fédération Nationale du Bâtiment**

Recherche 99.031

Auteur : Alain GRELAT  
Juillet 2004

### ***CENTRE D'EXPERTISE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS***

SIEGE SOCIAL : DOMAINE DE SAINT PAUL – 102 route de Limours – 78 471 SAINT REMY LES CHEVREUSE - Tél. : 01 30 85 24 00  
S.A. au Capital de F 10 750 000 – RCS Versailles B 582 101 176 – SIREN 582 101 176 – Code APE 742 C – N° TVA : FR 27 582 101

Email : [st.remy@cebtb.fr](mailto:st.remy@cebtb.fr) – Site internet : [www.cebtb.fr](http://www.cebtb.fr)  
Qualité OPCI sous le n° 81 05 0433 – Organisme certificateur déclaré auprès du Ministère chargé de l'industrie



# SOMMAIRE

## TOME 2 ESSAIS EN LABORATOIRE INSTRUMENTATION IN SITU

### SOMMAIRE

#### 1. Essais sur les matériaux en laboratoire

La paille

#### 2. Essais de validation technique

- 2.1 Tenue au feu des parois en paille
- 2.2 Perméabilité à l'eau des enduits
- 2.3 Tenue des enduits à l'arrachement

#### 3. Principaux enseignements

#### 4. Instrumentation in situ

## RESUME

La recherche a pour but le développement rationnel des techniques de construction utilisant des matériaux dits renouvelables, susceptibles de stocker le CO<sub>2</sub> et d'offrir des débouchés non négligeables aux sous-produits de l'industrie agro-alimentaire.

Elle vise à la validation de deux procédés de construction utilisant deux de ces matériaux, la paille comprimée et le béton de chanvre, en remplissage de parois de maisons individuelles à ossature bois. Une expérimentation in situ est prévue sur deux maisons individuelles semblables, représentatives de chacune de ces deux techniques, qui seront construites dans le Jura.

Le programme de recherche comporte le suivi technique de la construction, l'expérimentation du comportement thermique des logements et de l'humidité au sein des parois, ainsi que la détermination en laboratoire des caractéristiques des matériaux et la validation technique de ces procédés constructifs.

Le présent rapport rassemble les résultats obtenus avec les divers essais effectués en laboratoire au cours de la recherche sur le matériau paille, et décrit l'instrumentation installée sur le site.

## ABSTRACT

The research has for goal the rational development of the housing techniques using so called renewable materials, susceptible to store the carbon dioxide and to offer valuable issues to the by-products of agricultural industry.

It aims at validation of two building modes using two of these materials, straw bales and hemp-lime mortar, as a filling for walls of individual houses with wood structure. A site experiment is foreseen on two similar individual houses representing each of these two techniques, that are to be built in the Jura.

The research program comprises a technical survey of the construction, site experiment of thermal behaviour of the houses and humidity within the walls, together as laboratory investigation on material characteristics and technical validation of these constructive modes.

The present volume 3 of the report gathers the results obtained from laboratory tests on straw material during the research, and also describes the site instrumentation.

## 1. ESSAIS EN LABORATOIRE SUR LES MATERIAUX

### 1.1 Construction des murs paille

Quatre maquettes de parois paille ont été construites fin septembre 2001 pour différents essais :

- Une maquette de mur de 3,30 x 2,05 x 0,40 m pour l'essai de transmission thermique au CSTB à CHAMPS-SUR-MARNE
- Un pan de mur de 1,85 x 1,90 x 0,44 m
- Un panneau de toiture de 1,80 x 2,00 x 0,39 m pour essai de stabilité au feu, au Laboratoire National d'Essais à TRAPPES
- Une maquette de mur de 1,85 x 1,90 x 0,44 m pour essais hygrothermiques in situ Au CEBTP à SAINT-REMY-LES-CHEVREUSE

#### a) Maquette pour essai thermique

Pour l'essai de transmission thermique, l'épaisseur totale du mur a dû être ramenée à 0,40 m, au lieu de 0,44 m avec enduits pour la paroi réelle, en raison des contraintes dimensionnelles propres au dispositif d'essais du CSTB.

Le mur comporte un enduit à la chaux de 20 mm sur sa face intérieure, un enduit en mortier chanvre et chaux de 20 mm, dont une couche de finition de 8 mm, sur sa face extérieure.

Les essais seront effectués après stabilisation hygrothermique de la paroi.

#### b) Maquettes pour essais au feu

##### *Maquette de mur*

Le mur est constitué de bottes de paille disposées à plat en épaisseur de 40 cm, avec 3 montants et des liteaux entre chaque assise de bottes de paille (voir construction ci-après)

Les enduits sont identiques à ceux décrits ci-dessus.

##### *Maquette de toiture*

Le panneau de toiture est constitué de bottes de paille de 36 x 40 x 85 cm disposées en épaisseur de 36 cm, contenues dans une ossature constituée de 3 montants en lamellé collé de 10 x 36 cm, et protégées côté intérieur par un parement en bois 3 plis de 27 mm. La face arrière est fermée par un panneau de toiture souple de type FELIX.

Ces deux maquettes sont destinées à être soumises à une simulation d'incendie réalisée par un feu d'hydrocarbure. Ce scénario constitue un mode d'attaque très sévère avec des élévations de température de la source rapides et très élevées (environ 800 °C).

#### c) Maquette pour essais hygrothermiques en exposition naturelle

Ce panneau de mur, de dimensions identiques à celui réalisé pour les essais au feu, est destiné aux expérimentations suivantes :

- Humidification et séchage après arrosage
- Tenue mécanique de l'enduit extérieur
- Perméabilité à l'eau des enduits

## CONSTRUCTION D'UN MUR DE PAILLE

La construction d'un mur de paille est une opération rapide, nécessitant peu d'outillage et ne mettant en œuvre que des charges peu importantes.

Les illustrations ci-dessous ont été réalisées lors de la construction d'une maquette de mur paille de 1,90 x 2,00 x 0,44 m, destinée aux essais hygrothermiques en site naturel au CEBTP à Saint-Rémy – les- Chevreuse.

Figure 1

On voit ici le matériau de base : les bottes de paille issues de la moissonneuse-batteuse, de format 0,80 x 0,40 x 0,36 m.



Figure 2

Les bottes de pailles ont été trempées sur leurs deux faces de parement, dans une barbotine de chaux afin de faciliter l'accrochage de l'enduit.



Figure 3

L'ossature du mur est amenée pré-découpée. Elle est posée sur un socle en bois destiné à permettre le transport de la maquette.



Figure 4

Elle est constituée de montants de 200 x 40 mm, espacés de 900 mm, et de liteaux de précontrainte de 40 x 40 mm.



Figure 5

Une légère pression sur les liteaux assure la mise en place des bottes de paille



Figure 6

Les liteaux sont vissés sur les montants.



Figure 7

Mise en place d'une nouvelle botte.



Figure 8

Vissage du nouveau liteau sur le montant.



Figure 9

Les bottes de paille fournissent un marchepied confortable pour mettre en place les derniers éléments



Figure 10

Des plaques de Fibralth sont fixées sur les tranches de la maquette.





Figure 11  
Fixation du dernier liteau



Figure 12  
Vérification des fixations



Figure 13  
La planéité du mur laisse encore à désirer



Figure 14  
Rectification de la position des bottes



Figure 15  
Dernières retouches



Figure 16  
Vérification : la planéité est maintenant satisfaisante



## 1.2 Programme d'essais

Les essais suivants ont été réalisés au CSTB de janvier à novembre 2002 :

Mesure de la conductivité thermique à différents taux d'humidité  
 Mesure du coefficient U sur une maquette de mur paille



Figure 17– Les bottes de paille d'origine

### 1.2.1 Mesures de conductivité thermique

Les essais ont été effectués au CSTB par la méthode fluxmétrique NF X 10-025 sur des plaques de 50 x 50 x 5 cm ou de 60 x 60 x 10 cm reconstituées à partir des bottes de paille livrées (photo 17 ci-dessus), directement issues de la moissonneuse- batteuse et conservées au sec, de manière à reproduire la même masse volumique.

Les essais ont été effectués à 23°C, d'abord à l'état sec (séchage en étuve à 70°C), puis sur le matériau en état d'équilibre avec des ambiances à 50 % et à 90 % HR. Les masses volumiques correspondantes ont été mesurées.

Les résultats sont donnés par le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1

Conditionnement	Epaisseur (mm)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Taux d'humidité (%)	Conductivité thermique (W/m.K)
0 % HR	100	66	0	0,064
	50	67	0	0,065
50 % HR	100	76	16	0,069
	50	77	15	0,066
90 % HR	100	82	24	0,072
	50	85	22	0,069

Ils nous permettent donc

- d'obtenir la conductivité thermique utile du matériau paille :  $\lambda_{\text{utile}} = 0,07 \text{ W/m.K}$
- d'obtenir la variation de  $\lambda$  en fonction de la teneur en eau
- d'approcher la courbe d'absorption du matériau

qui sont représentés par les graphiques ci-après.



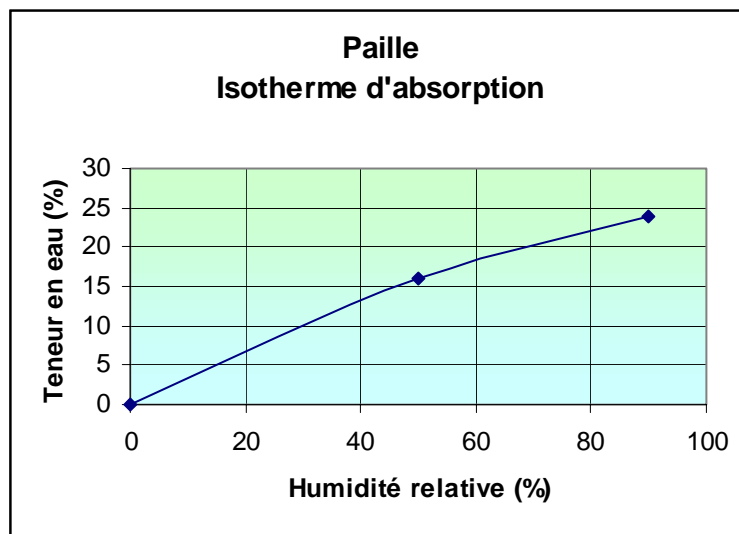
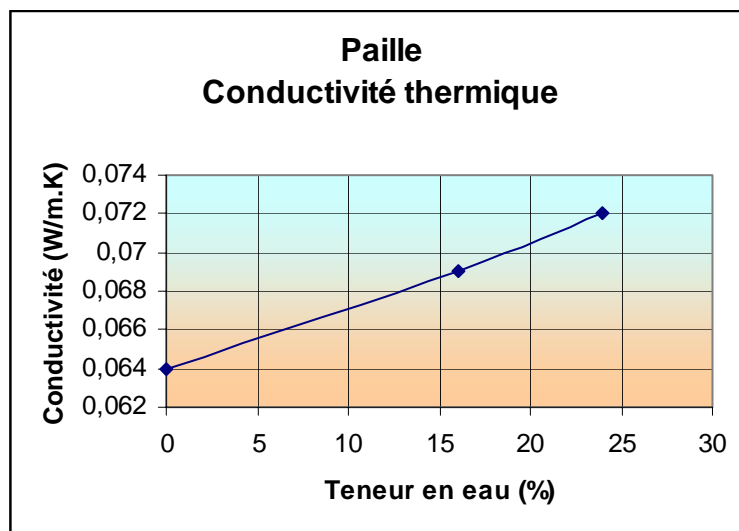


Figure 18 – Isotherme de sorption de la paille

Figure 19 – Conductivité thermique de la paille en fonction de la teneur en eau



Compte tenu du fait que la perméabilité à la vapeur d'eau de la paille est très grande, ces éléments peuvent fournir la base des données de simulation hygrothermique du matériau.

Il manque pour l'identification complète des indications quantitatives sur la cinétique d'absorption.

On notera la faible densité du matériau (environ **80 kg/m<sup>3</sup>** à 50 % HR), bien inférieure à celle du matériau référencé dans les règles Th-U sous le terme "paille comprimée" :

### 1.3 Mesure du coefficient de transmission thermique d'un mur paille

Les cotes 2,05 x 3,30 x 0,40 m hors tout étaient imposées par l'utilisation du cadre métallique à l'intérieur duquel doit être construite la maquette, ce qui limitait l'épaisseur de paille à 36 cm, soit 40 cm avec enduits. La paroi réelle aura en fait une épaisseur totale de 44 cm.

Un mur de paille de dimensions 2,05 m x 3,30 m, d'épaisseur de paille 36 cm, a été réalisé avec ossature et enduits pour mesurer le coefficient U de la paroi. Il comportait deux enduits de chacun 2 cm, l'un en enduit chaux classique, l'autre en enduit chanvre chaux comme dans les parois réelles de MONTHOLIER.

Figure 20  
Mur paille avant enduits



Figure 21  
Mur paille avec enduits



Le résultat suivant a été obtenu :

Mur de 36 cm avec enduits chaux:

$$\mathbf{U = 0,25 \text{ W/m}^2.\text{K}}$$

Compte tenu des enduits, ce résultat correspond à une conductivité équivalente de la paille de :

$$\mathbf{\lambda_{eq} = 0,095 \text{ W/m.K}}$$

Cette valeur est supérieure à la conductivité du matériau, car ceci inclut :

la présence de l'ossature bois ( $\lambda = 0,12$  à  $0,15$ )

un remplissage partiel au mortier de chanvre des vides entre les bottes

On peut retenir cette valeur comme équivalence pour une paroi complète en paille comprimée.

## 2. ESSAIS DE VALIDATION TECHNIQUE

### 2.1 Résistance au feu des parois paille

L'un des questionnements principaux vis-à-vis des parois en paille était leur **résistance au feu**.

Deux éléments de parois en paille ont été testés vis-à-vis de leur comportement au feu :

- une maquette de toiture, de dimensions 1,80 x 2,00 x 0,30 m
- une maquette de mur, de dimensions 1,85 x 1,90 x 0,44 m

Les essais ont été effectués au Laboratoire National d'Essais à TRAPPES, avec une simulation d'incendie réalisée par un feu d'heptane sur la largeur des maquettes. Le scénario feu d'hydrocarbures a été retenu car il constitue un mode d'attaque très sévère avec des élévations de température de la source rapides et très élevées (environ 900°C). Les essais sont réalisés à l'extérieur, sous un abri en tôle.

Ces essais ont un caractère exploratoire. Leur objet principal est de s'assurer de la tenue au feu d'un quart d'heure des parois en paille des pavillons expérimentaux devant être construits à MONTHOLIER.

#### *Constitution des parois et points de mesure*

##### *Panneau de toiture paille*

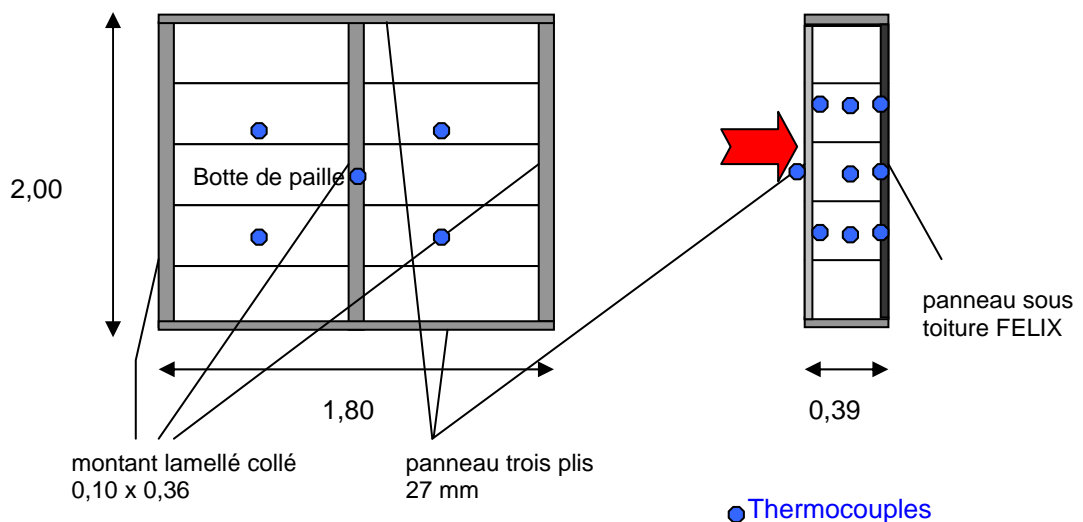
Le panneau de toiture est constitué de bottes de paille de 36 x 40 x 85 cm, posées sur chant, en épaisseur de 36 cm, contenues dans une ossature constituée de 3 montants en lamellé collé de 10x36 cm et protégées par un parement en bois 3 plis de 27 mm d'épaisseur en face avant et latéralement. La face arrière est fermée par un panneau de toiture souple de type FELIX. La périphérie est protégée par un revêtement incombustible en silicate de calcium.

Il est équipé de 17 thermocouples :

- 1 thermocouple de surface au centre de la face exposée au feu
- 4 thermocouples à l'interface entre le parement 3 plis et la paille
- 7 thermocouples dans le plan médian du panneau de toiture, dont l'un inséré au centre du montant central
- 5 thermocouples en face arrière du panneau

La constitution du panneau essayé et la position des points de mesure sont indiquées sur le schéma ci-dessous.

Figure 22 - Panneau de toiture paille



### Panneau mur paille

Le mur est constitué de bottes de paille disposées à plat en épaisseur de 40 cm, avec 3 montants et des liteaux entre chaque assise de bottes de paille.

Le parement intérieur est réalisé par un enduit à la chaux de 20 mm ( corps d'enduit de 12 mm en mélange chaux et sable STRASSERLITH M, avec armature polyamide noyée dans le corps d'enduit, couche de finition de 8 mm d'enduit STRASSERLITH M).

Le parement extérieur étant constitué d'un enduit chanvre et chaux (mélange TRADICHANVRE + CHANVRIBAT) de 20 mm également avec armature.

L'accrochage des enduits sur la paille est préparé avant le montage de la maquette par trempage des faces des bottes de paille dans un lait de chaux adjuventé.

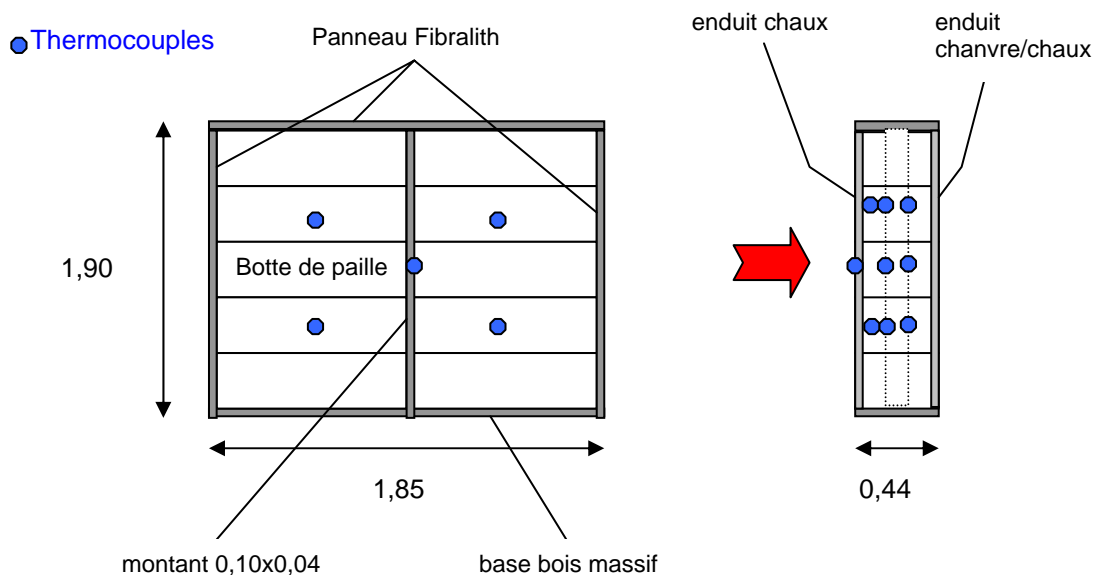
Les espaces entre bottes correspondant à l'ossature bois sont remplis par un mélange TRADICHANVRE-CHANVRIBAT.

La construction du mur et la mise en œuvre des enduits ont été réalisés les 21 et 22 septembre 2001. Le mur a été conservé à l'ambiance intérieure du laboratoire jusqu'au jour de l'essai.

Le panneau est équipé de 15 thermocouples :

- 1 thermocouple de surface au centre de la face exposée au feu
- 4 thermocouples à l'interface entre l'enduit et la paille
- 5 thermocouples dans un plan situé à 10 cm du parement
- 5 thermocouples dans un plan situé à 20 cm du parement

Figure 23 - Panneau de mur paille



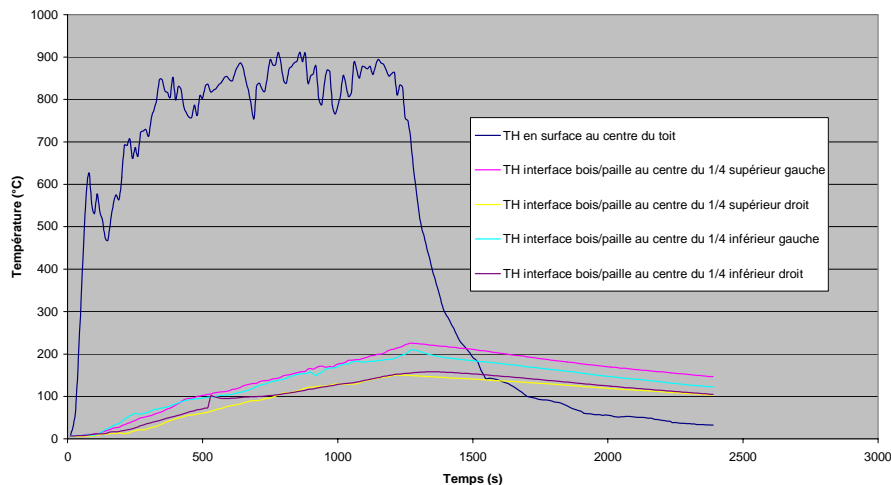
## Essai du panneau de toiture paille

L'essai au feu du panneau de toiture paille a été réalisé au LNE le 16 novembre 2001.

Le panneau de toiture est essayé en position inclinée à 45° au dessus d'un réservoir contenant 37 litres d'heptane.

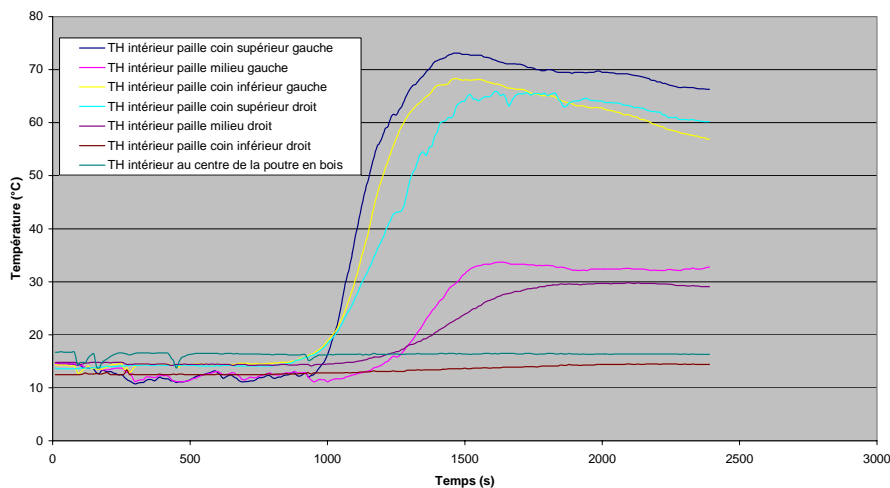
La durée totale du feu a été de l'ordre de 20 minutes, correspondant à la combustion de la totalité du contenu du réservoir d'heptane. La température de la surface exposée au feu s'est située entre 800 et 900°C à partir de la mise en régime du feu. Pendant cette durée, le panneau est resté stable. Les températures mesurées dans le panneau côté feu, à l'interface entre le parement trois plis et la paille, ont atteint au maximum 230°, et décroissent dès l'arrêt du feu.

Figure 24 Thermocouples sur la face exposée à la flamme



Les températures mesurées dans l'intérieur du panneau ne dépassent pas 75°C.

Figure 25 Thermocouples à l'intérieur de la maquette du toit



La température du thermocouple fixé à l'intérieur du montant bois n'a pas évolué au cours de l'essai.

Après extinction du feu, on constate que seule la première couche du panneau de parement trois plis a été calcinée, la couche suivante paraissant intacte (voir photo). Cependant, il subsiste dans le parement des zones incandescentes.

Le panneau a été volontairement laissé en l'état. Sous l'effet du vent, les braises se sont rallumées, entraînant au bout de plusieurs la calcination d'une partie du panneau et la destruction d'un volume limité de bottes de paille, sans atteindre de volume voisin.



**Essai du panneau de toiture paille - Photos**

Figure 27 Construction de la maquette



Figure 28 Maquette prête pour l'essai



Figure 29 Début de l'incendie simulé



Figure 30 Essai en cours après 10 minutes



Figure 31 -Essai en cours après 15 minutes



Figure 32 - Vue du parement après extinction



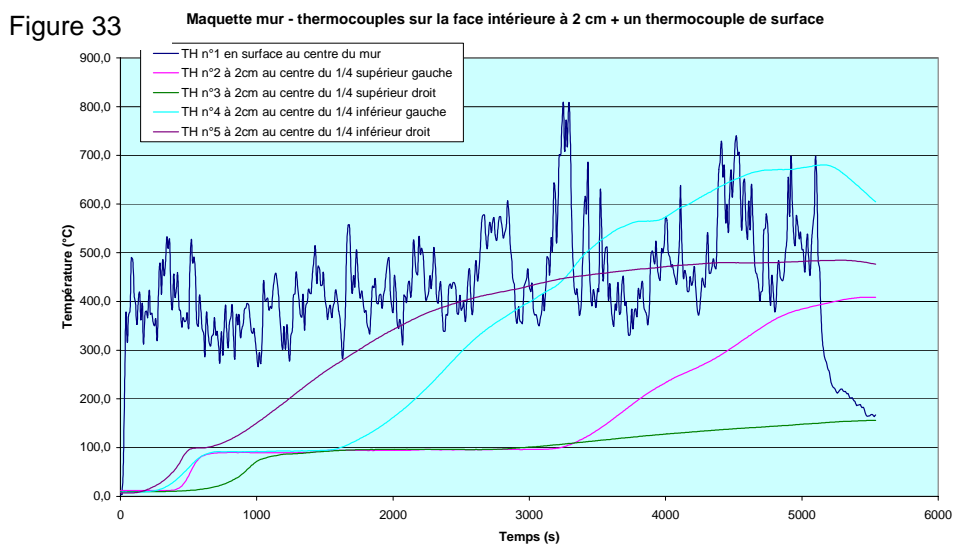
### Essai du mur paille

Le mur a été essayé au LNE le 20 décembre 2001. L'essai a été réalisé avec la maquette en position verticale, avec un bac de 137 litres d'heptane au bas de la maquette, de manière à assurer une combustion de durée de l'ordre d'une heure.

La durée effective du feu a été d'environ 1h 25 minutes.

Après quelques minutes d'exposition au feu, la couche supérieure de l'enduit à la chaux (appliqué sur la face intérieure du mur) a cloqué sur une zone d'environ 80 cm de diamètre. Cette couche, solidarisée par l'armature, ne s'est effondrée qu'après 45 mn environ. Après le décollement, la couche suivante n'a pas paru significativement endommagée.

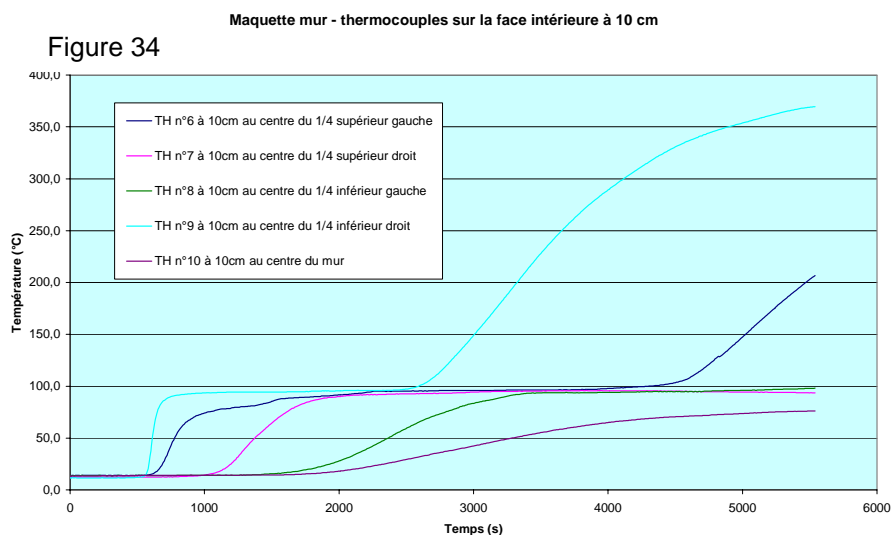
La température du thermocouple de surface situé au centre de la face exposée ne s'est trouvée que rarement à la température de 800°C. On voit en effet que la surface la plus exposée aux flammes, concrétisée par l'étendue du cloquage, se situait en dessous de ce thermocouple.



On peut considérer que sur la partie la plus exposée la température de surface était, comme dans l'essai précédent, de l'ordre de 800 à 900°C pendant la durée du feu.

En raison de cette localisation, les températures mesurées à l'interface entre l'enduit et la paille sont assez dispersées. On remarque un palier à 100° correspondant à l'évaporation de l'eau de l'enduit. Durant les 15 premières minutes de combustion de l'heptane, les températures sont restées inférieures à 150°C derrière l'enduit.

Après 40 minutes, une inflammation se propage dans l'épaisseur au niveau de la partie inférieure droite du mur, visible notamment avec l'élévation de température du thermocouple n°9.



*Essai du mur paille - Photos*

Figure 35 - Maquette de mur équipée de thermocouples



Figure 36 - Mise en place du réservoir d'heptane



Figure 37 - Essai en cours après 10 minutes



Figure 38 - Essai en cours après une heure environ



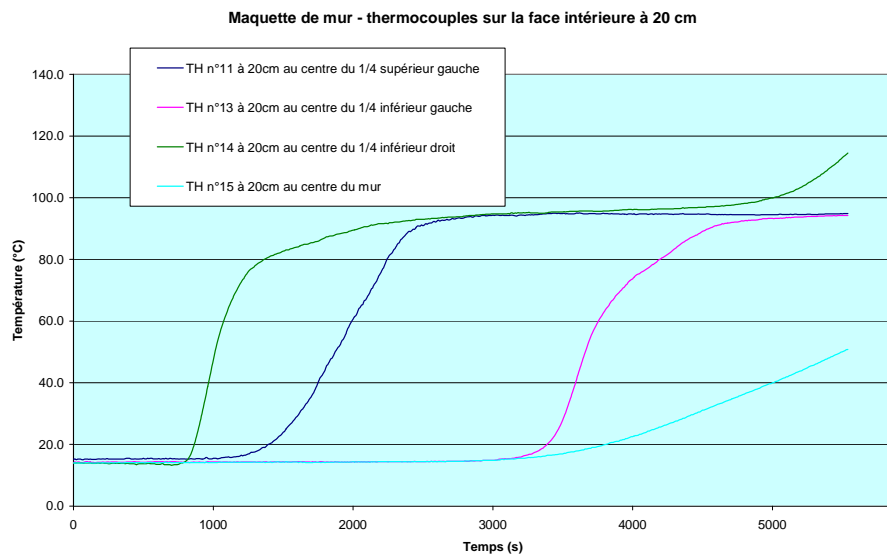
Figure 39- Après extinction du feu



Figure 40 - La couche extérieure de l'enduit a cloqué, laissant voir la trace de l'armature



Figure 41



### Conclusions sur la tenue au feu

Dans les deux cas, la stabilité de l'élément essayé est conservée pendant une durée supérieure à un quart d'heure : aucun effondrement même partiel n'a été constaté pendant toute la durée du feu, qui a été de 20 minutes sur l'élément de toiture et de 85 minutes pour le mur.

Les températures mesurées sous l'enduit ou le parement bois ne dépassent pas 200°C après un quart d'heure d'exposition au feu. Les éléments porteurs ne peuvent donc subir aucune détérioration pendant cette durée.

Cependant, à partir du moment où le feu a pu traverser le panneau – ce qui a nécessité une durée d'environ 30 minutes dans les conditions très sévères de l'essai – les feux couvants se propagent à l'intérieur de l'élément, amenant sa destruction partielle en plusieurs heures, et leur extinction par tous moyens devient difficile.

## 2.2 Perméabilité à l'eau des enduits

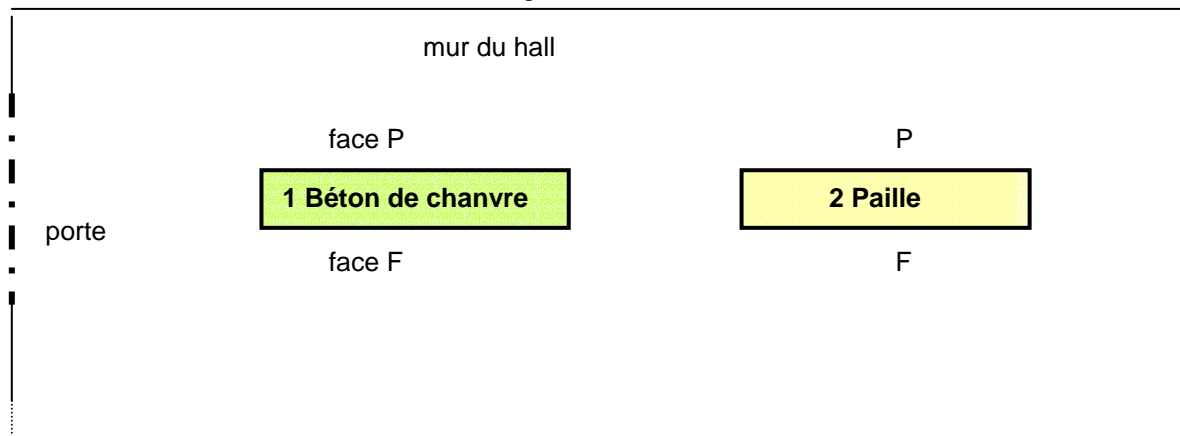
Un essai de perméabilité à la boîte a été effectué sur les deux murs conservés dans le hall d'essais, l'un en paille, l'autre en béton de chanvre, enduits sur chaque face. Une face a un enduit chaux classique, l'autre un corps d'enduit en mélange chanvre-chaux et une couche de finition en enduit chaux.

Le mur 1 en béton de chanvre a pour dimensions 1.91 x 1.72 x 0.33 m

Le mur 2 en paille a pour dimensions 1.90 x 1.57 x 0.43 m

Leur localisation dans le hall est la suivante.

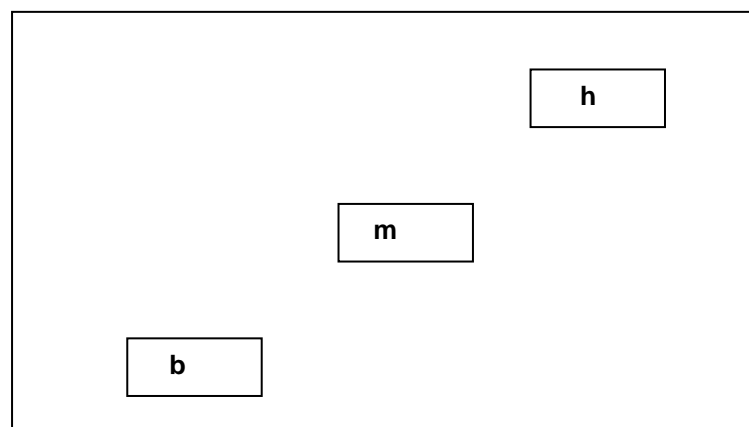
Figure 42



### Position des points de mesure

Trois essais ont été réalisés sur chaque face des 2 murs, comme indiqué sur le schéma ci dessous :

Figure 43 – Position des zones d'essai





### Description de l'essai

L'essai à la boîte de perméabilité consiste à appliquer sur le mur une chambre qui permet d'isoler une surface de pénétration rectangulaire  $540\text{cm}^2$ . L'étanchéité de contact est maintenue par un joint en caoutchouc mousse.

Après sa mise en place, la chambre est remplie d'eau par un orifice existant à sa partie supérieure. Le remplissage étant terminé, le niveau est maintenu constant grâce à un tube de MARIOTTE gradué, dont le débit vient compenser l'écoulement d'eau percolant à travers le mur.

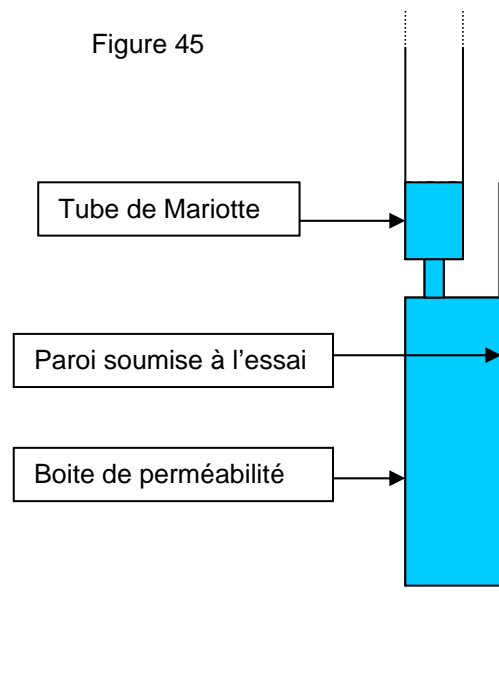
L'essai dure 30 minutes, pendant lesquelles on mesure à intervalle de temps régulier la quantité d'eau absorbée par le mur sous une charge d'eau constante moyenne de 15 cm, en prenant comme référence la surface d'écoulement.

Figure 44



Principe de l'essai  
sur un mur de brique

Figure 45



### 2.3 Résultats

Les résultats, exprimés en  $\text{l/m}^2$ , sont donnés dans les tableaux ci après :

**Tableau 8 - Mur 1 Béton de chanvre**

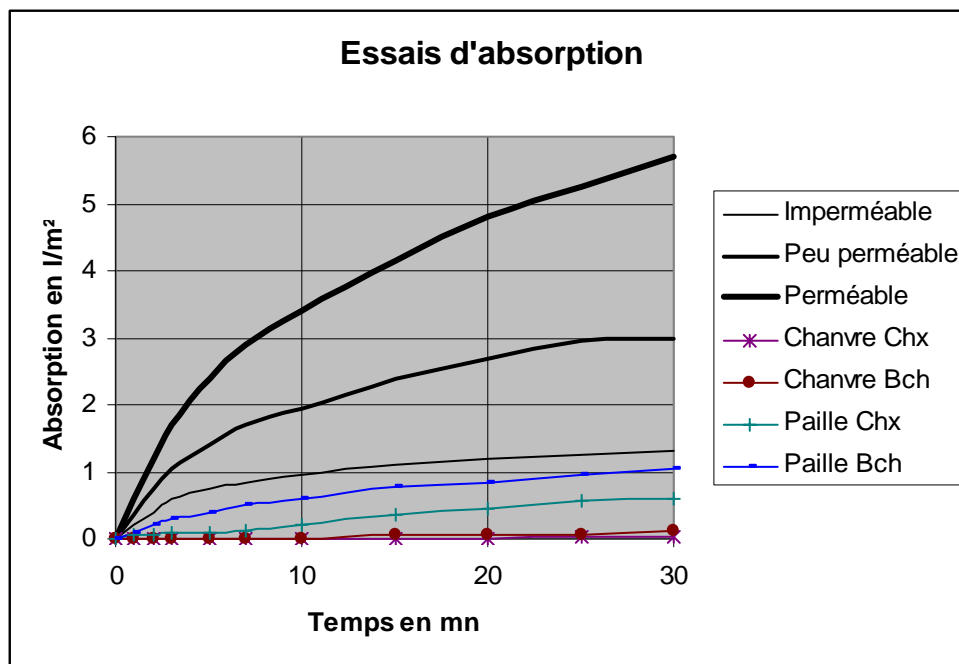
Temps minutes	Quantité d'eau absorbée en $\text{l/m}^2$					
	Face Enduit chaux			Face Enduit chanvre-chaux		
	b	m	h	b	m	h
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1
20	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1
25	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1
30	0.0	0.1	0.0	0.1	0.2	0.1

Tableau 9 - Mur 2 - Paille

Temps minutes	Quantité d'eau absorbée en l/m <sup>2</sup>					
	Face Enduit chaux			Face Enduit chanvre-chaux		
	b	m	h	b	m	h
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	0.0	0.2	0.0	0.1	0.1	0.1
2	0.0	0.2	0.0	0.2	0.2	0.2
3	0.1	0.2	0.0	0.3	0.3	0.3
5	0.1	0.2	0.0	0.4	0.4	0.4
7	0.1	0.3	0.0	0.4	0.5	0.6
10	0.2	0.2	0.2	0.5	0.6	0.7
15	0.4	0.3	0.4	0.7	0.8	0.8
20	0.5	0.4	0.4	0.8	0.8	0.9
25	0.7	0.5	0.5	0.9	1.0	1.0
30	0.8	0.5	0.5	0.9	1.1	1.1

Les courbes d'interprétation pour les enduits sont données ci dessous.

Figure 46



On note une perméabilité à l'eau un peu plus importante pour les enduits du mur 2 (paille), et pour chaque mur un peu plus importante pour l'enduit chanvre chaux (Bch) que pour l'enduit chaux (Chx). Mais dans les quatre cas, les enduits sont considérés comme très imperméables.

## 2.3 Résistance à l'arrachement des enduits

### Mur paille

Des essais d'arrachement de l'enduit ont été effectués sur le mur paille.

Ils consistent en un essai de traction sur une empreinte de 50 x 50 mm prédécoupée.

Cinq essais ont été réalisés, répartis sur chaque face du mur de dimensions 1.90 x 1.57 m. La face, référencée P, est tournée vers le mur fond du hall ; la face, référencée F, est tournée vers le hall .

Les empreintes carrées de 5 cm de côté ont été réalisées à l'aide d'une disqueuse. Après collage des pastilles métalliques, de forme parallélépipédique à base carrée (5 cm de côté), un effort de traction a été exercé avec un appareil électronique CEBTP.

Les résultats sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 10 – Résistance à l'arrachement des enduits – Mur paille

N°	Face du mur	Force de rupture en N	Surface en mm <sup>2</sup>	Contrainte en MPa	Type de rupture
1	P Enduit chaux	25	2304	0.01	Adhésive support -enduit
2		250	2162	0.12	Cohésive dans enduit
3		25	2256	0.01	½ adhésive support –enduit ½ dans enduit au niveau treillis
4		400	2400	0.17	Cohésive dans enduit
5		200	2450	0.08	Cohésive dans enduit
<b>moy.</b>				<b>0.08</b>	
6	F Enduit chanvre chaux	50	2205	0.02	Cohésive enduit
7		25	2500	0.01	Cohésive enduit
8		25	2162	0.01	Cohésive enduit au niveau du treillis
9		25	2350	0.01	Cohésive enduit
10		25	2116	0.01	Cohésive enduit au niveau du treillis
<b>moy.</b>				<b>0.01</b>	

**A titre d'information, nous rappelons que le D.T.U. sur les enduits demande une adhérence d'au moins 0.3 MPa pour des enduits traditionnels à base de liant hydraulique sur des supports « traditionnels ».**

Cependant, une contrainte de 0,01 Mpa représente un effort de traction de 1 tonne par m<sup>2</sup>.

Le but de cet essai était principalement de rassurer l'entrepreneur chargé des enduits sur la maison paille. Le poids de ces enduits, compte tenu des surcharges moyennes pour rattraper la planéité, ne représente que environ 60 kg/m<sup>2</sup>.

### 3. PRINCIPAUX ENSEIGNEMENTS

Il ressort de cette série d'essais les résultats principaux suivants .

#### Matériau paille

Avec une masse volumique de 80 kg/m<sup>3</sup>, les bottes de paille utilisées pour la construction ont une conductivité thermique utile de :

$$\lambda_{\text{utile}} = 0,07 \text{ W/m.K}$$

Ce résultat est utilisable pour le remplissage de la toiture.

Pour les murs, compte tenu de la présence de l'ossature et du remplissage des joints au mélange chanvre-chaux, la conductivité thermique équivalente obtenue par un essai de transmission thermique sur un modèle de mur est de :

$$\lambda_{\text{eq}} = 0,10 \text{ W/m.K}$$

soit un coefficient de transmission thermique moyen des murs de :  $U = 0,25 \text{ W/m}^2.\text{K}$

La perméabilité du matériau à la vapeur est très grande ( $\mu = 1$ )

Pour une humidité relative de 50 %, la teneur en eau de la paille est de l'ordre de 15% en masse. Elle atteint 25 % pour HR = 90% .

#### Comportement au feu des parois paille

Les essais effectués sur une maquette de toiture et une maquette de mur montrent une stabilité au feu supérieure à ¼ h, ce qui était l'objectif.

Dans le cas de la toiture paille, la résistance est apportée par le panneau 3 plis de 27 mm.

Lorsque le feu a pu pénétrer à l'intérieur de la paroi, son extinction est quasi impossible. La combustion, lente, reste limitée à quelques bottes face au point de pénétration de la flamme.

#### Etanchéité des enduits à l'eau

Les deux types d'enduits réalisés sur murets – enduit chaux traditionnel et enduit avec corps d'enduit en mélange chanvre chaux – tels que prévus au DCE et réalisés sur chantier, essayés à la boîte sur les deux types de supports , paille et béton de chanvre, sont classés très étanches à l'eau. Ceci suppose bien sûr l'absence de fissures sur le parement extérieur.

#### Tenue mécanique des enduits sur la paille

La résistance à l'arrachement des enduits des deux types sur la paroi paille est faible : 0,01 Mpa au minimum.

Dans le cas de l'enduit chanvre-chaux, il s'agit de ruptures cohésives au niveau de la trame entre corps d'enduit et la couche de finition.

Bien que très inférieure à la valeur imposée par le DTU pour les enduits sur maçonneries traditionnelles ( 0,3 MPa) , elle permet d'assurer que la paroi paille supportera le poids des enduits (environ 60 kg/m<sup>2</sup> sur chaque face).

## 4. INSTRUMENTATION SUR LE SITE

### 4.1 Instrumentation des locaux

L'instrumentation de chaque maison comporte :

**3 compteurs électriques**

- convecteurs électriques
  - production d'ECS
  - autres usages
- marque ERGI type CMEI

**6 capteurs de température ambiante et hygrométrie intérieure**

GENERAL EASTERN RHT 2 IS

**2 capteurs de température intérieure seule**

**1 capteur de température ambiante et hygrométrie extérieure**

GENERAL EASTERN RHT 2 IO

Sur le site : **un solarimètre vertical en façade sud** d'un des pavillons.

KIPP et SONNEN CM 10

Les **débits de ventilation** aux bouches d'extraction seront mesurés de manière ponctuelle. S'agissant d'une ventilation hygro-réglable, un enregistrement de **vitesse d'air** par un thermo-anémomètre situé dans la gaine de rejet sera effectué, et corrélé aux mesures ponctuelles de débit de manière à obtenir à chaque scrutation une valeur du **débit extrait**.

L'ensemble des mesures est raccordé à une centrale d'acquisition TBC 32 (NAPAC) permettant le télé-suivi des mesures.

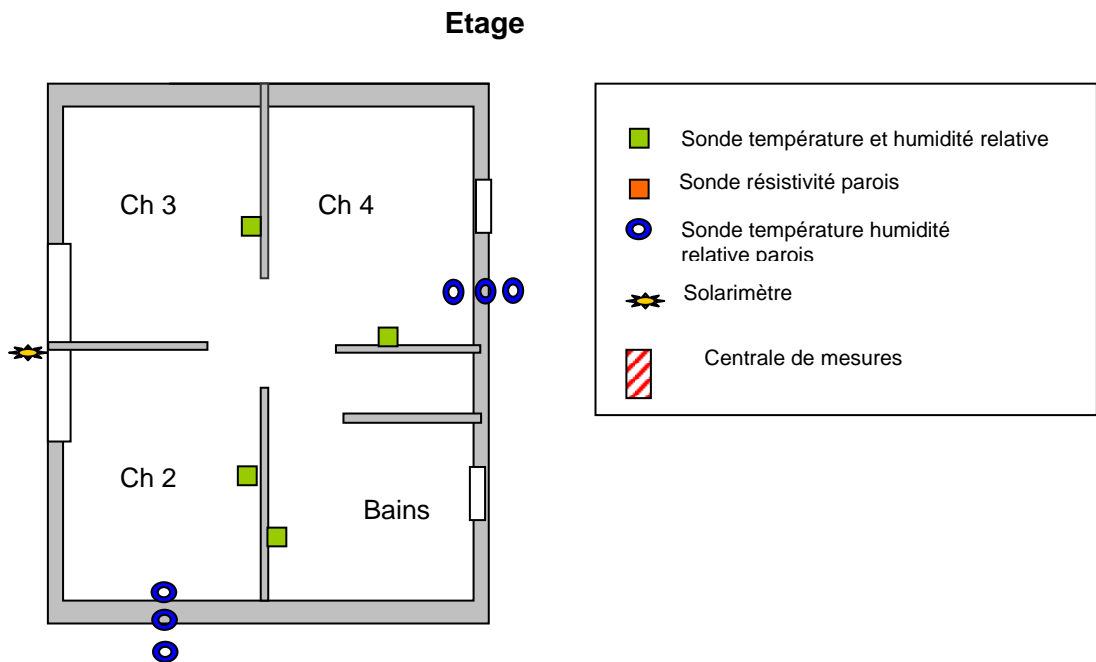
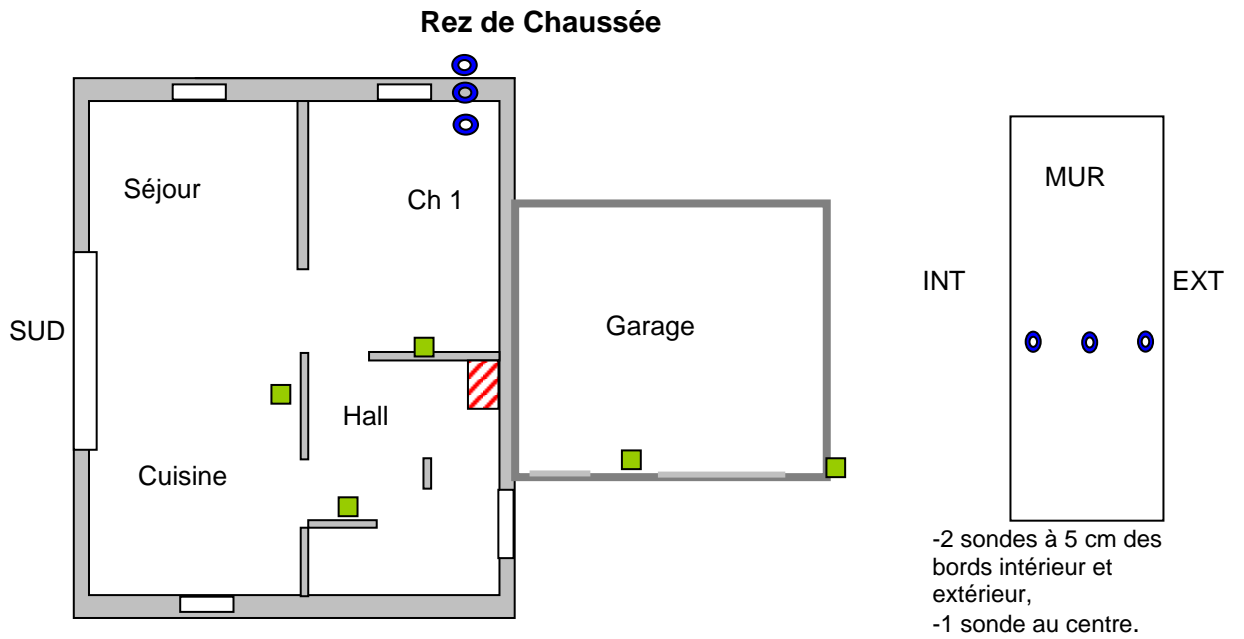
### 4.2 Instrumentation des parois

L'instrumentation prévue pour la mesure de l'humidité dans les parois comporte des capteurs d'humidité relative et de température à sonde séparée, de type GENERAL EASTERN RHT2.IR, sortie 4-20 mA.

Pour les protéger du contact direct avec l'humidité, les sondes seront incorporées dans le mur avec un filtre en bronze fritté.



Figure 47 Schéma de principe des mesures (Maison paille)



Maison Paille					
Repère	Local	Emplacement sonde	Emplacement convertisseur	Référence matériel	Fourniture
<b>Comptage Energie Electrique</b>					
E CONV	Cellier		Tableau électrique d'abonné		BATI THERM
E ECS	Cellier		Tableau électrique d'abonné		BATI THERM
E GEN	Cellier		Tableau électrique d'abonné		BATI THERM
<b>Température et Humidité Relative Ambiance Intérieure</b>					
TH AI 1	Chambre 1	Chambre 1 sur cloison cage d'escalier	ditto sonde	ROTRONIC M22W2HT-1X	CEBTP
TH AI 2	Chambre 2	Chambre 2 sur dégagement	ditto sonde	ROTRONIC M22W2HT-1X	CEBTP
TH AI 3	Chambre 3	Chambre 3 sur dégagement	ditto sonde	ROTRONIC M22W2HT-1X	CEBTP
TH AI 4	Chambre 4	Chambre 4 sur cloison escalier	ditto sonde	ROTRONIC M22W2HT-1X	CEBTP
TH AI 5	Séjour	Séjour sur cloison chambre 1	ditto sonde	ROTRONIC M23W2HT-1D	CEBTP
TH AI 6	Salle de bain	Contre gaine technique	ditto sonde	ROTRONIC M22W2HT-1X	CEBTP
<b>Température et Humidité Relative Ambiance Extérieure</b>					
TH AE 1	Exterieur	Sous débord de toit Nord	Garage	GENERAL EASTERN	CEBTP
<b>Température ambiance intérieure</b>					
T AI 1	Couloir - Entrée	Cloison Cellier	Cellier	PT 1000	BATI THERM
T AI 2	Garage	Paroi Est	Cellier	PT 1000	BATI THERM
<b>Température et Humidité Relative Matériau</b>					
TH M 11	Chambre 1	Mur Ouest - extérieur	sous escalier	GENERAL EASTERN	CEBTP
TH M 12	Chambre 1	Mur Ouest - milieu	sous escalier	GENERAL EASTERN	CEBTP
TH M 13	Chambre 1	Mur Ouest - intérieur	sous escalier	GENERAL EASTERN	CEBTP
TH M 21	Chambre 2	Mur Est - extérieur	sous escalier	GENERAL EASTERN	CEBTP
TH M 22	Chambre 2	Mur Est - milieu	sous escalier	GENERAL EASTERN	CEBTP
TH M 23	Chambre 2	Mur Est - intérieur	sous escalier	GENERAL EASTERN	CEBTP
TH M 31	Chambre 4	Mur Nord - extérieur	sous escalier	GENERAL EASTERN	CEBTP
TH M 32	Chambre 4	Mur Nord - milieu	sous escalier	GENERAL EASTERN	CEBTP
TH M 33	Chambre 4	Mur Nord - intérieur	sous escalier	GENERAL EASTERN	CEBTP
<b>Température Surface Matériau</b>					
T M 1	Chambre 1	A l'interface Paille-Enduit (TH M 13)	Cellier	PT 1000	CEBTP
T M 2	Chambre 2	A l'interface Paille-Enduit (TH M 23)	Cellier	PT 1000	CEBTP
T M 3	Chambre 4	A l'interface Paille-Enduit (TH M 33)	Cellier	PT 1000	CEBTP
<b>Solarimetre</b>					
SOL	Chambres	Facade sud, au dessus des fenêtres	Cellier		CEBTP
<b>Anémometre à fils chaud</b>					
AN	Combles	gaine rejet VMC	Combles sur caisson VMC	KIMO CTV	CEBTP
Prestation optionnelle (à chiffrer)					
<b>Température et Humidité Relative Matériau Toiture</b>					
TH MT 11	Combles	Toiture (position à définir)	Combles	ROTRONIC M22W2HT-4X	CEBTP
TH MT 12	Combles	Toiture (position à définir)	Combles	ROTRONIC M22W2HT-4X	CEBTP

Figure 48 -Maison paille – Position des points de mesure

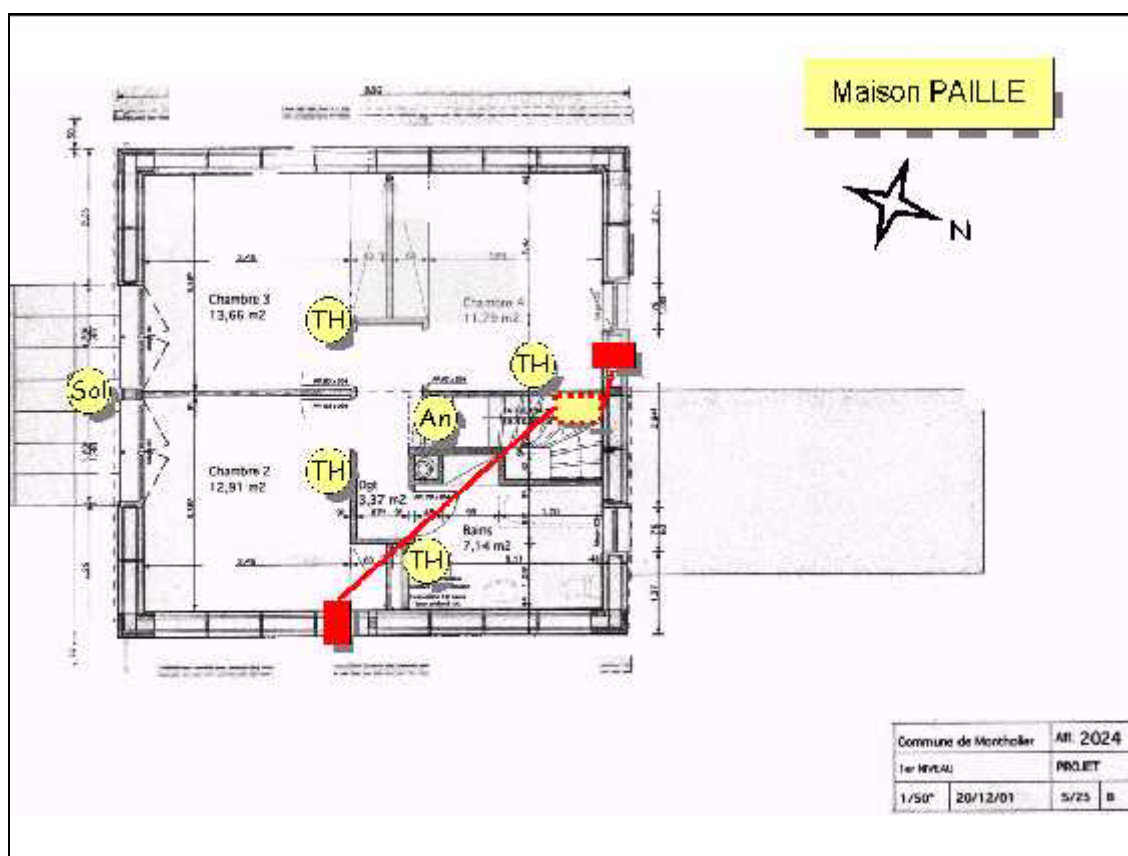
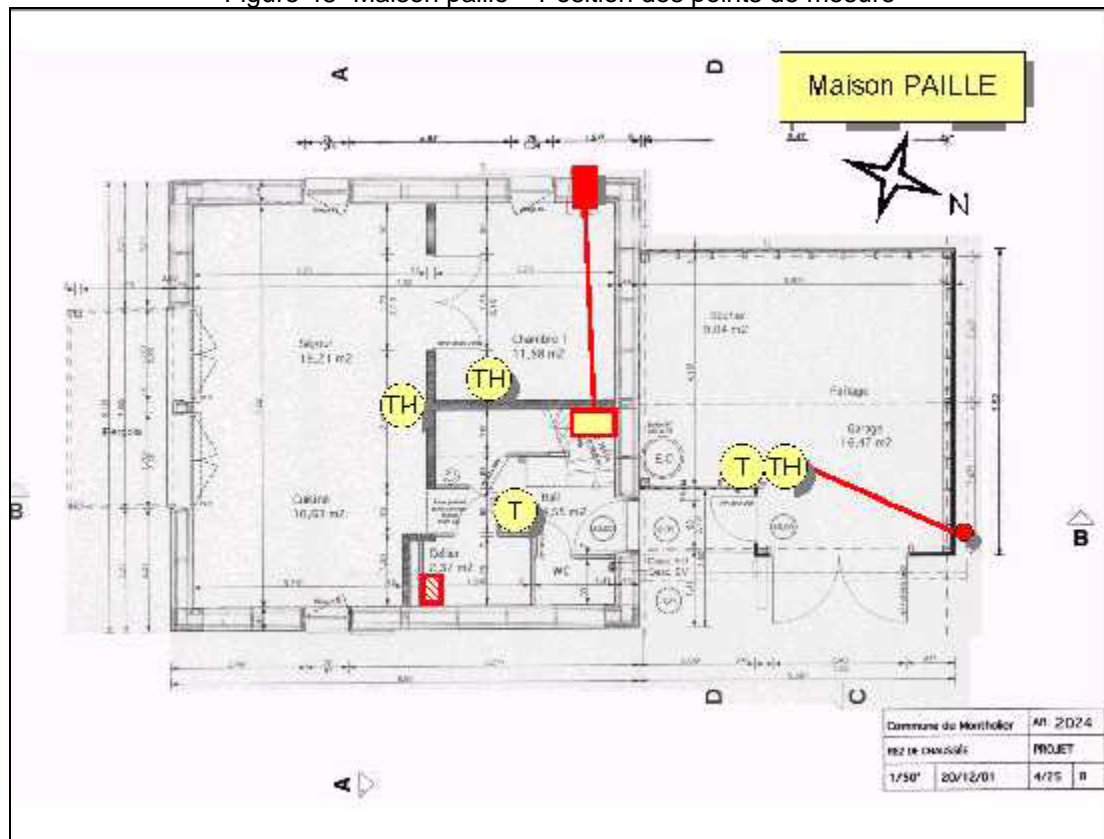


Figure 49 – Sonde et convertisseur GENERAL EASTERN RH T2-IR



Figure 50 - Solarimètre pour pose en façade Sud



### 4.3 Mise en place des sondes dans les parois

Les sondes ont été mises en place dans les parois le 27 mars 2003.

Figure 51 - La sonde est enfoncée dans la botte sur un avant-trou



Figure 52 - Les trois sorties de sondes par section





#### 4.4 Réception de l'instrumentation

La réception de l'instrumentation a pu être effectuée le 8 juin 2004.

L'ensemble des points de mesure prévus a été installé, à l'exception des boîtiers de mesure correspondant aux sondes de température et hygrométrie disposés dans les toitures des deux maisons, non disponibles lors de l'installation. Ces derniers boîtiers seront raccordés pendant l'été.

Dans chaque maison est installé au cellier une armoire de mesure, comportant une centrale NAPAC, les compteurs d'énergie, et les modules de mesure raccordés aux différentes voies.

Figure 53 – Armoire de mesure



Figure 54 – Sonde extérieure et solarimètre



Figure 55 Sonde température – hygrométrie intérieure



Figure 56 – Boîtier température hygrométrie extérieure





#### 4.7 Contrôle d'opérationnalité

Les figures suivantes montrent quelques extraits des premiers enregistrements, du 8 juin au 4 juillet.

Figure 57

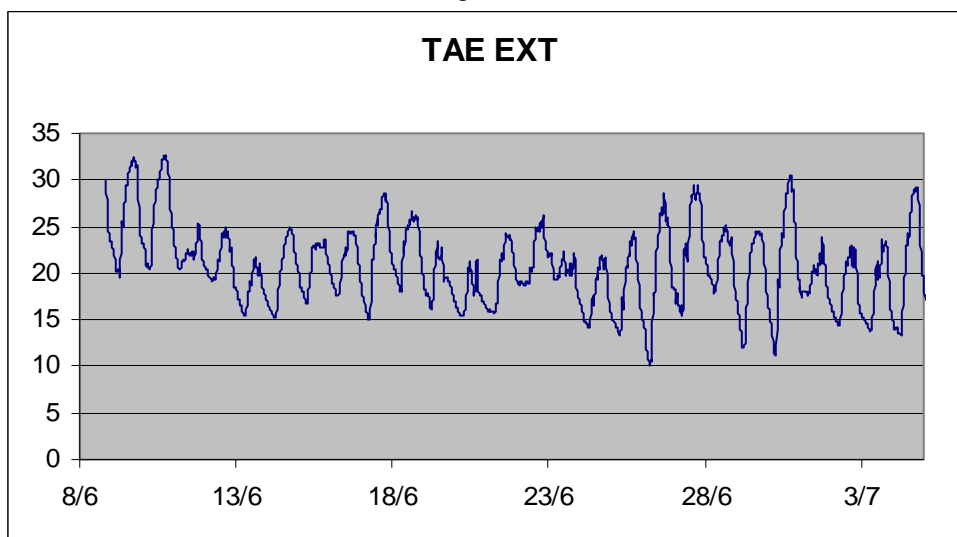
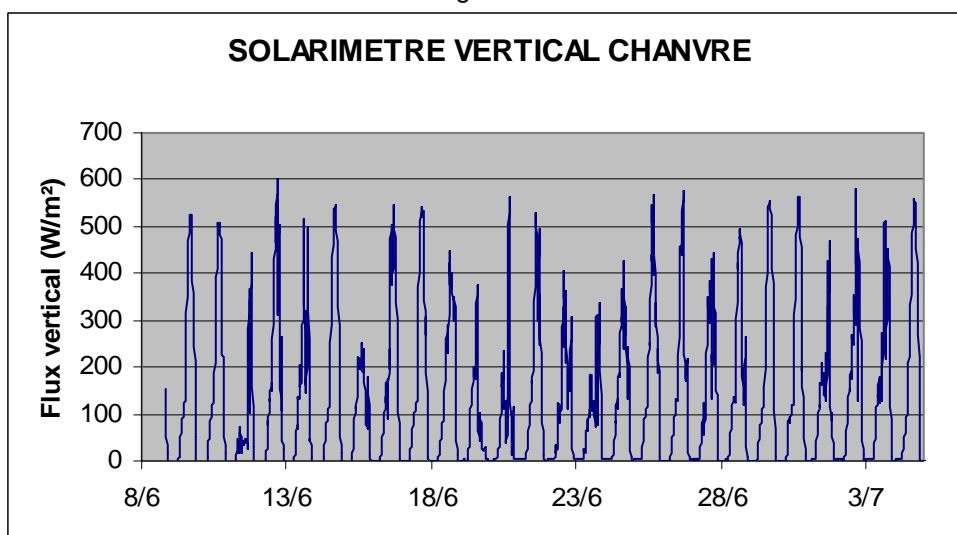


Figure 58



Malgré les nombreux problèmes rencontrés dans sa mise en place, l'acquisition des données peut maintenant être considérée comme opérationnelle, et se déroule sans incident depuis le 8 juin 2004.

Figure 59

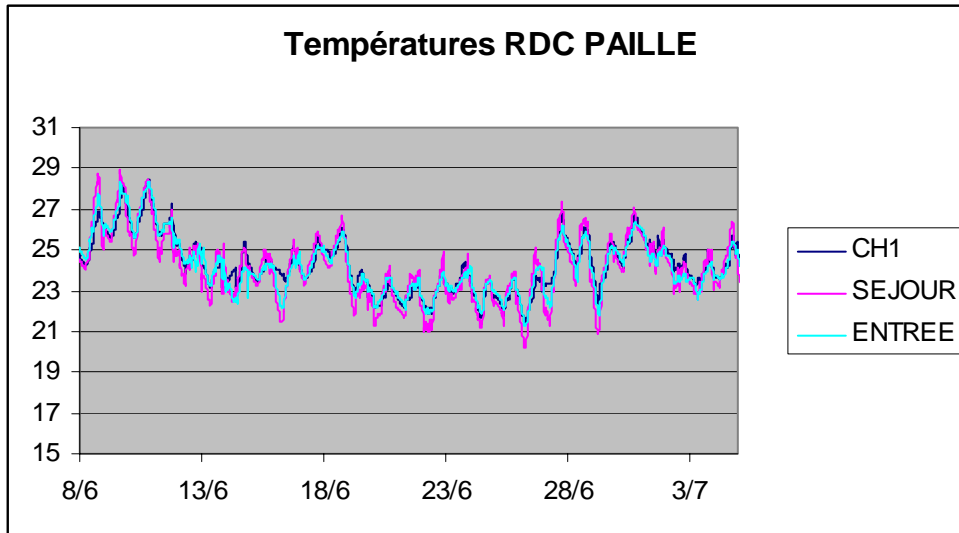


Figure 60

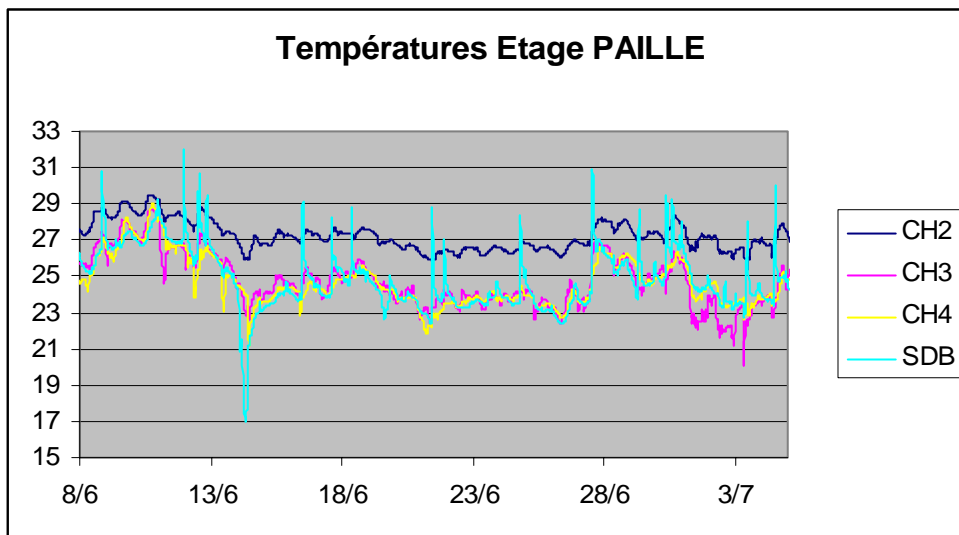


Figure 61

