

# Rapport action tuffeau

---

*Réhabilitation énergétique des bâtiments en tuffeau – Etat de l’art et retours d’expérience*

## CAHIER n°3

---

*Grange rénovée – Le Coudray-Macouard, Bron*



Figure 1-1: Façade Sud réhabilitée, Le Coudray-Macouard



Date de visite : 20 mai 2011  
Mesures : été 2011 été 2013

## 1 Description du bâtiment

Ce bâtiment de bourg à étage est une ancienne grange construite à la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle\*. Il est constitué de moellons de tuffeau montés à la terre d'épaisseur finale de 55 cm, pour les façades Nord Sud et Ouest. La façade Est est en pierres de taille de 22 cm d'épaisseur, ainsi que les encadrements d'ouverture. La maison a été rehaussée au XIX<sup>ème</sup> siècle. Le haut de la façade Ouest est donc également en pierre de taille de 22cm. Dans cette même période une extension en parpaings a été créée au Nord du bâtiment.

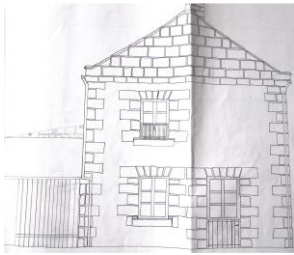


Figure 1-1 : Façade Ouest



Figure 1-2 : Façade Ouest restaurée



Figure 1-3 : Façade Est non rejointoyée



Figure 1-4 : Façade Nord et extension

Il n'y a pas de sous-bassement. Le tuffeau est directement en contact avec le sol.

## 2 Objet de la rénovation

Les propriétaires ont entrepris des travaux de restauration et de transformation en juin 2006. Ils y vivent, à 4 personnes, depuis l'été 2010. La maison est constituée d'un rez-de-chaussée de 90 m<sup>2</sup>, comprenant une cuisine, un salon dans l'ancienne grange en tuffeau, d'un bureau, d'une salle de bain et d'un WC dans l'extension en parpaing, et d'un cellier / buanderie dans une nouvelle extension à colombage. A l'étage de 60 m<sup>2</sup>, on trouve trois chambres et une salle de bain.

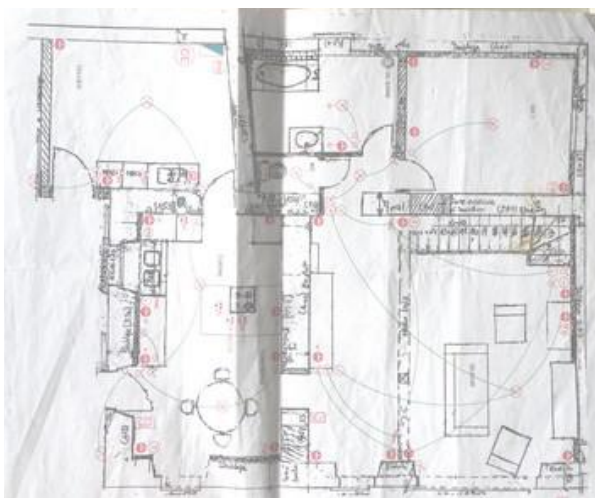


Figure 2-1 : Plan du rez-de-chaussée

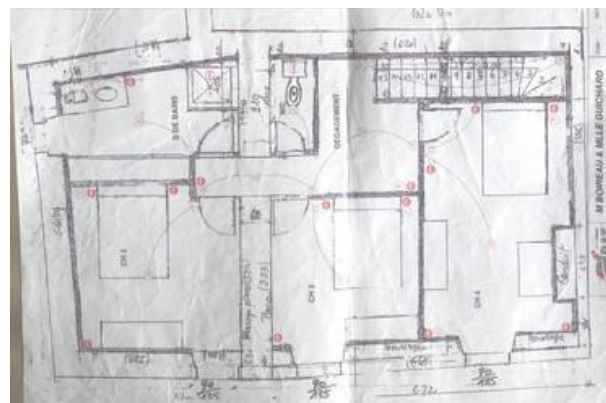


Figure 2-2 : Plan de l'étage

## 2.1 Restauration et traitement des pathologies

Un drainage est installé autour du bâtiment, à 40 cm de profondeur pour prévenir des remontées capillaires.

Les moellons ont été tous rejointoyés à la terre, nombre d'entre-eux ont été remplacés par d'autres moellons de récupération. Les façades ont été brossées, patinées, nettoyées au jet d'eau puis une patine ocre a été passée. Les pierres de taille des encadrements de fenêtres ont été remplacées par des pierres neuves. Une ouverture en arc a été créée, elle est illustrée ci-dessous. Enfin, la corniche de la façade Sud, recouverte de salpêtre, a été décapée et placée sur la façade Nord.



Figure 2-3 : Sortie du drain



Figure 2-4 : Mise en place du drain

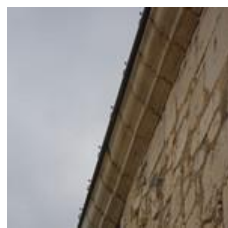


Figure 2-5 : Corniche restaurée, façade Nord



Figure 2-6 : Restauration de la façade Sud

Un raccordement au tout à l'égout a été réalisé.

## 2.2 Traitement de l'enveloppe

Les parois intérieures Sud et Nord sont en pierres de tuffeau apparentes recouvertes d'un enduit à pierre vue à la chaux hydraulique.



Figure 2-7 : Pierres de tuffeau apparentes, enduites de chaux, traces d'humidité



Figure 2-8 : Mur Nord avec boutisse sculptée portant la poutre

La paroi Est est isolée par (figure 2-9) : une lame d'air de 3 cm, des briques plâtrières enduites d'un gobetis puis d'un enduit chaux-chanvre de 8 à 10 cm en deux passes et une finition chaux-sable. La chaux utilisée pour l'enduit chaux-sable est de la chaux NHL 3,5.

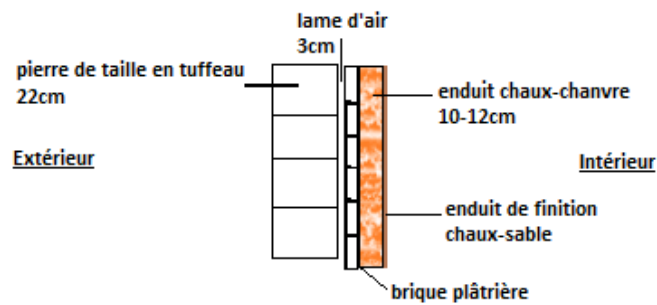


Figure 2-9 : Coupe verticale de la paroi Est

La paroi Ouest est enduite en deux passes de 10-12 cm de béton de chaux-chanvre et finie par un enduit chaux-sable (figure 2 – 10).

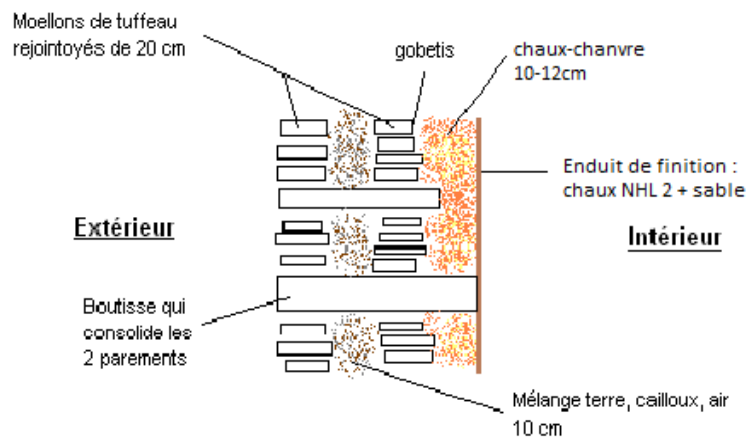


Figure 2-10 : Coupe verticale de la paroi Ouest

L'extension en colombage dispose de parois isolées par un enduit banché chaux-chanvre de 22 cm d'épaisseur. La chaux est hydraulique ou aérienne selon les endroits du mur.

La partie Nord de l'extension en parpaing est isolée grâce à un pare-vapeur, 14 cm de laine de chanvre et des plaques de fermacell 13 mm.



Figure 2-11 : Application de l'enduit banché



Figure 2-12 : mur à colombages de la nouvelle extension

Les menuiseries sont en bois exotique. Les fenêtres en double vitrage de type 4/16/4 sont calfeutrées au chaux-chanvre.

Un coffrage, en plaques d'OSB vissées sur les chevrons, pour accueillir 25 cm de béton de chaux-chanvre est mis en place. Ce béton est coulé par le toit. A l'intérieur des plaques de fermacell prennent ensuite la place de l'OSB. Les combles perdus de l'étage sont isolés par de la laine de chanvre en vrac pulsée d'épaisseur finale de 25 à 30 cm.

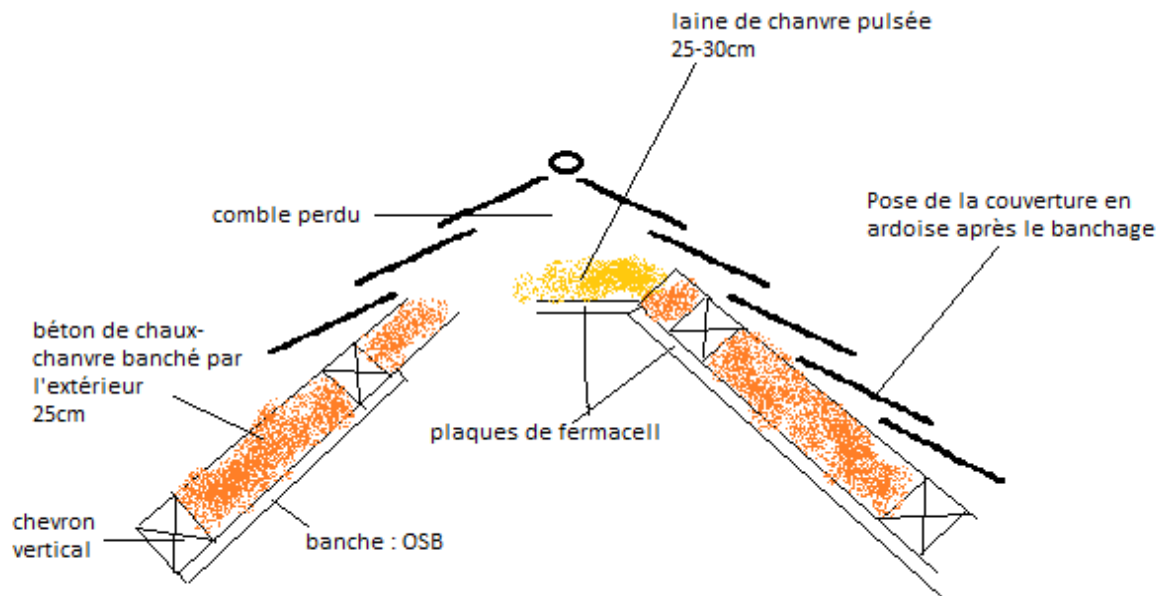


Figure 2-13 : Coupe verticale de l'isolation de la toiture



Figure 2-14 : Béton de chanvre coulé par le toit



Figure 2-15 : Laine pulsée



Figure 2-16 : Laine de chanvre des combles perdus

### 2.3 Traitement des cloisons et planchers intérieurs

Les cloisons intérieures sont en plaques de fermacell (13 mm) sur rail.

Le plancher bas en dalles de « Chauvigny », se compose d'un hérisson de cailloux de 20-25 cm, puis d'une dalle chaux-chanvre de 10 cm et d'une chape chaux-sable épaisse de 5 cm qui contient les serpentins du plancher chauffant (figure 2-17).

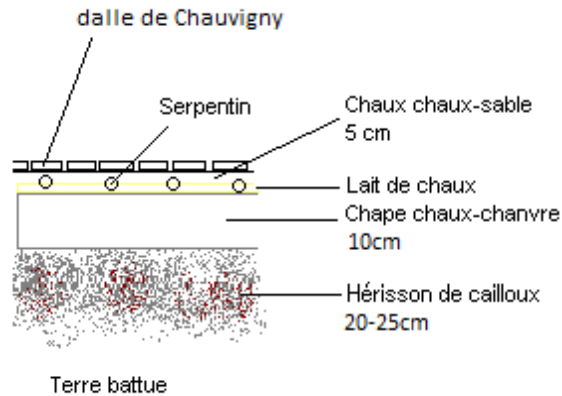


Figure 2-17 : Coupe verticale du plancher bas

Le plancher de l'étage repose sur des solives existantes sablées. Il est composé de fusées de torchis d'origine puis d'une dalle chaux-chanvre. L'entre-solive est recouvert de trois passes de chaux-sable.



Figure 2-18 : Dalle Chauvigny



Figure 2-19 : Plafond du rez de chaussée

## 2.4 Traitement des systèmes de chauffage et de ventilation

Une VMC simple flux hygro A a été installée, l'extraction a lieu dans les pièces humides.

Une pompe à chaleur air / eau de puissance nominale de 8.6 kW (COP nominal = 3,8) a été installée. En période très froide, un appoint électrique intégré dans la PAC assure le complément de chauffage (6 kW). Des radiateurs électriques sont installés à l'étage (18°C en confort, 12°C en absence).

La production d'eau chaude sanitaire est assurée par les panneaux solaires sur le toit avec un appoint électrique.



Figure 2-20 : Système d'aérothermie



Figure 2-21 : Ballon solaire

## 2.5 Bioclimatisme et techniques décarbonées sur ce projet

Le bioclimatisme consiste à trouver la meilleure adéquation entre "la vie et la nature", en se protégeant des aléas naturels (vents dominants, intempéries,...) et en profitant des apports gratuits disponibles (apports solaires, rafraîchissement naturel, biomasse,...). L'objectif étant de réduire au maximum les besoins énergétiques.

Au Nord-Ouest, un mur en moellons de tuffeau protège la bâtisse du vent. Une cour fermée, grâce au muret et à une autre dépendance, plein Nord, abrite la maison du vent et des pluies. Un espace tampon, accueillant les pièces secondaires (bureau, buanderie...) est présent au Nord. Aucune ouverture n'est présente sur cette façade.

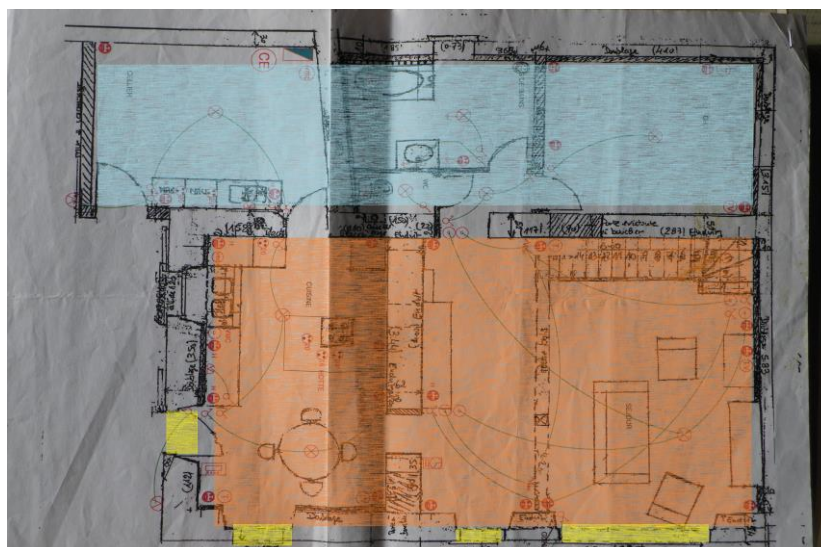


Figure 2-22 : Disposition des espaces au rez-de-chaussée (bleu : espace tampon, orange : espaces chauffés, jaunes : baies vitrées)



Figure 2-23 : Espace tampon



Figure 2-24 : Dépendance



Figure 2-25 : Façade Sud

Les nombreuses ouvertures sur la façade Sud, dont la baie en arc de cercle, permettent de profiter de l'éclairage naturel et de profiter du rayonnement solaire l'hiver (figure 2-25).



### 3 Thermographie infrarouge

Le diagnostic thermographique a été réalisé sur cette maison le 10 février 2012 en conditions très favorables (- 7°C, le matin). Il a permis de relever quelques éléments intéressants :



Figure 3-1 : Façade Sud vue par thermographie IR

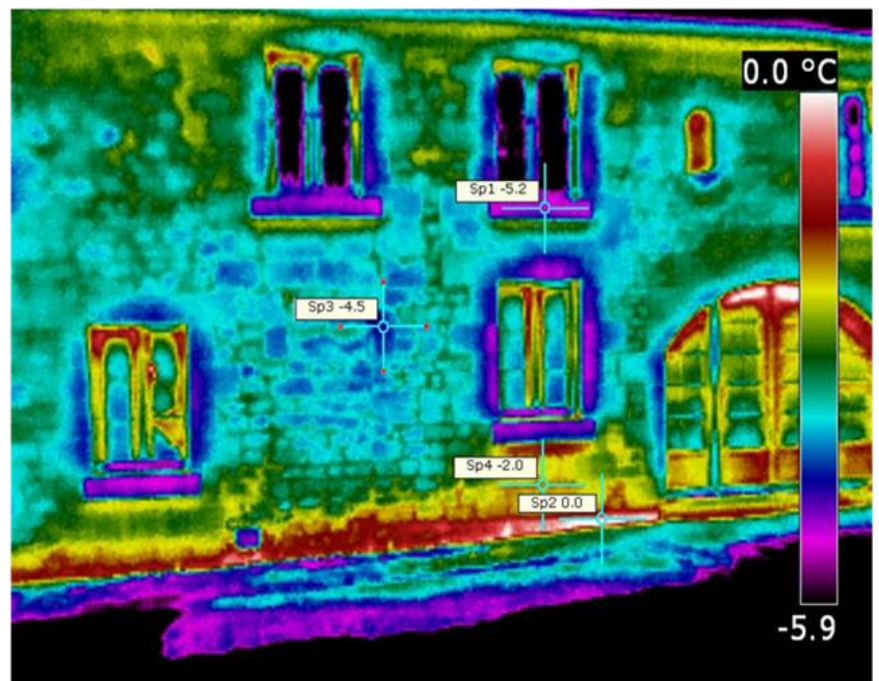


Figure 3-2 : Façade Sud

Sur la façade Sud, des déperditions importantes sont constatées en pied de mur. Deux causes peuvent expliquer cette observation : la présence du plancher chauffant et/ou la présence de remontées capillaires.



Salon sans correction thermique en enduit chaux-chaivre



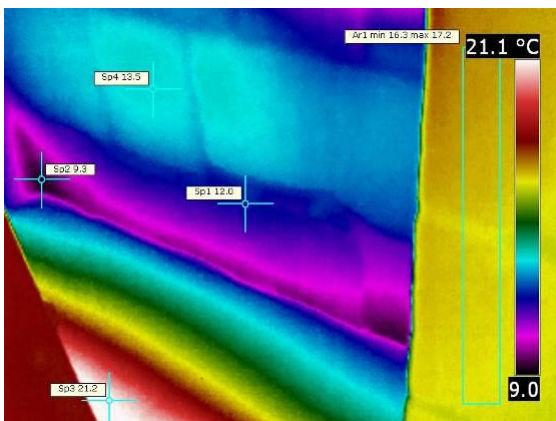
Contrairement à la cuisine, la paroi Sud du salon n'est pas enduite en chaux-chaivre. Cette différence de traitement n'apparaît pas dans le cliché thermographique. L'enduit chaux-chaivre (7cm) ne joue qu'au mieux le rôle de « correcteur thermique ». Il ne joue pas le rôle d'isolant.



Les températures de surface intérieure de la cuisine (à gauche  $\approx 15^{\circ}\text{C}$ ) et du séjour (à droite  $\approx 17^{\circ}\text{C}$ ) sont comparées. Ces mesures confortent l'analyse du cliché précédent. L'enduit chaux-chanvre (cuisine) apparaît même ici plus « froid » que le mur nu (séjour). Attention : la température du séjour était supérieure de  $2^{\circ}\text{C}$  à celle de la cuisine le jour du diagnostic.



Sur la façade Sud, des déperditions importantes sont constatées au niveau du soubassement de la fenêtre dont l'épaisseur est faible (pierre de taille de 22 cm) par rapport au reste de la paroi (moellons de 55 cm).

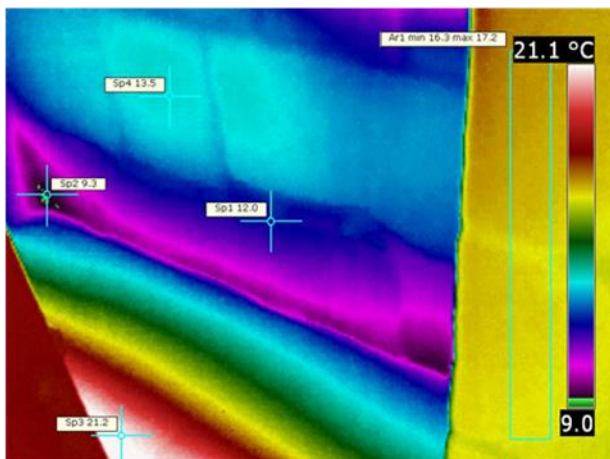


Façade Sud : l'amincissement de paroi sous les menuiseries que l'on retrouve très couramment dans le bâti ancien, crée des zones de paroi froide à l'intérieur du bâtiment ( $9$  à  $10^{\circ}\text{C}$  le jour du diagnostic) propice au développement de moisissures (cercle rouge)  
La présence de moisissures en ce point est confortée par les images ci-dessous.

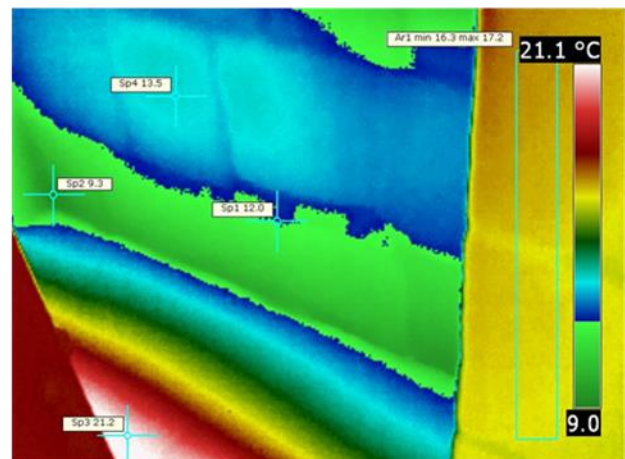
En effet, avec des températures de surface de mur de 9 à 11°C, pour une ambiance de 20°C et 50% d'humidité relative, le cliché de gauche (ci-dessous) montre que le risque de condensation en surface est très limité. En revanche, si l'humidité relative dans le séjour atteint 60% (cliché de droite), le risque de condensation (zone verte) couvre une surface importante du soubassement.

C'est sur cette surface que nous avons constaté des moisissures lors de notre passage.

 En vert, zone à fort risque de point de rosée



Hr=50%, T=20°C  
Risque de point de rosée faible



Hr=60%, T=20°C  
Risque de point de rosée élevé

## 4 Instrumentation approfondie

Ce bâtiment a fait l'objet d'une instrumentation approfondie :

- Température et humidité ambiantes,
- Température et humidité extérieures,
- Température et humidité dans les parois.

### 4.1 Instrumentation de l'ambiance

6 capteurs de température et d'humidité ont été positionnés dans les pièces de l'habitation. Deux capteurs de température sont placés dans les combles perdus : en ambient et dans la laine de chanvre

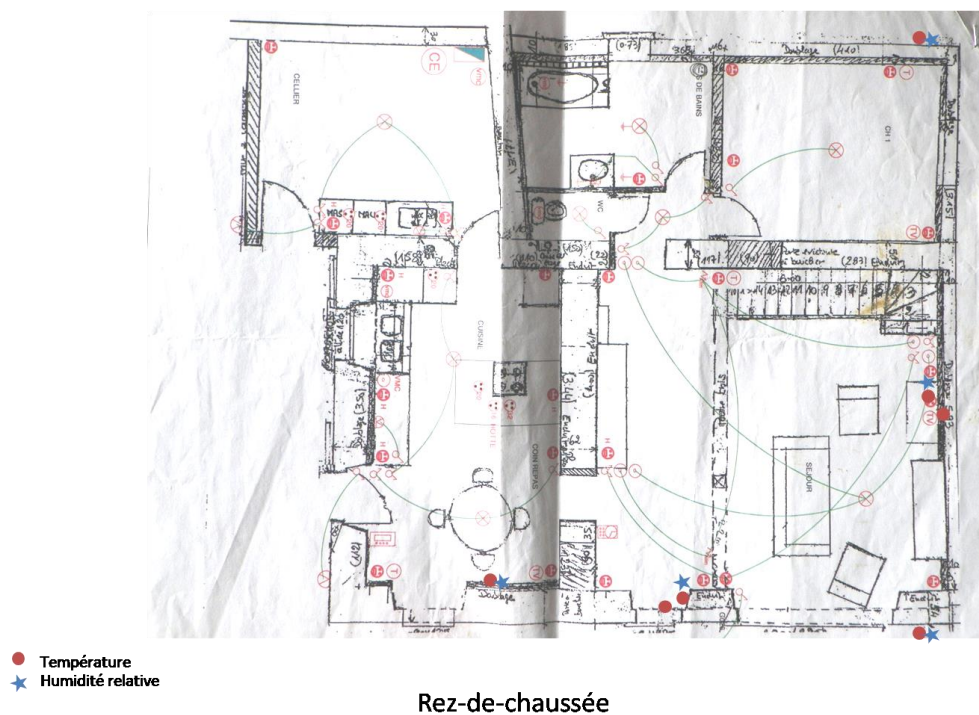
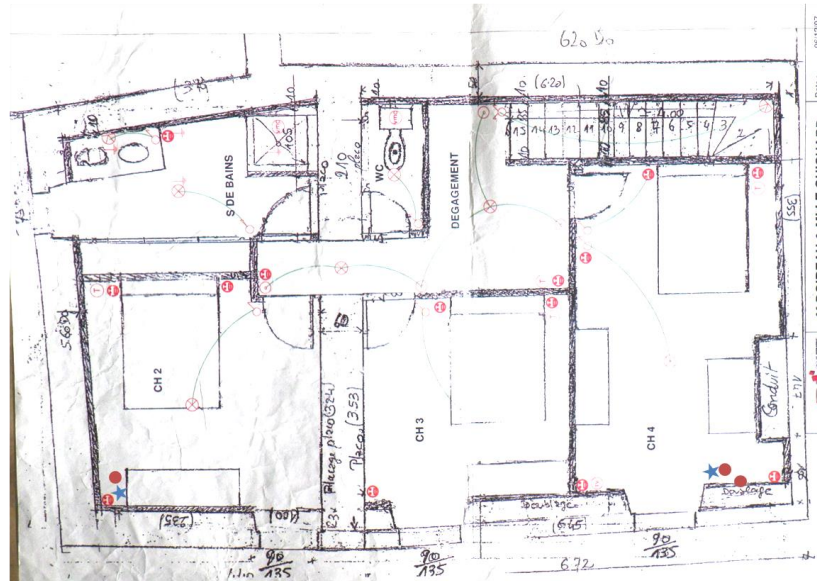


Figure 4-1 : Plan de l'instrumentation du rez-de-chaussée



- Température
- ★ Humidité relative

1<sup>er</sup> étage

Figure 4-2 : Plan de l'instrumentation de l'étage

## 4.2 Instrumentation des parois

Des sondes de température et d'hygrométrie ont été placées sur les parois sud et nord afin de déterminer les conditions extérieures (figure 4-3).



Figure 4-3 : mesure de température et humidité en extérieure (façade nord)

Les parois ont été instrumentées en surface et en plusieurs profondeurs avec des sondes de température et d'hygrométrie (figures 4-4 à 4-6).

Un humectomètre et un pyranomètre ont été positionnés sur la façade sud.

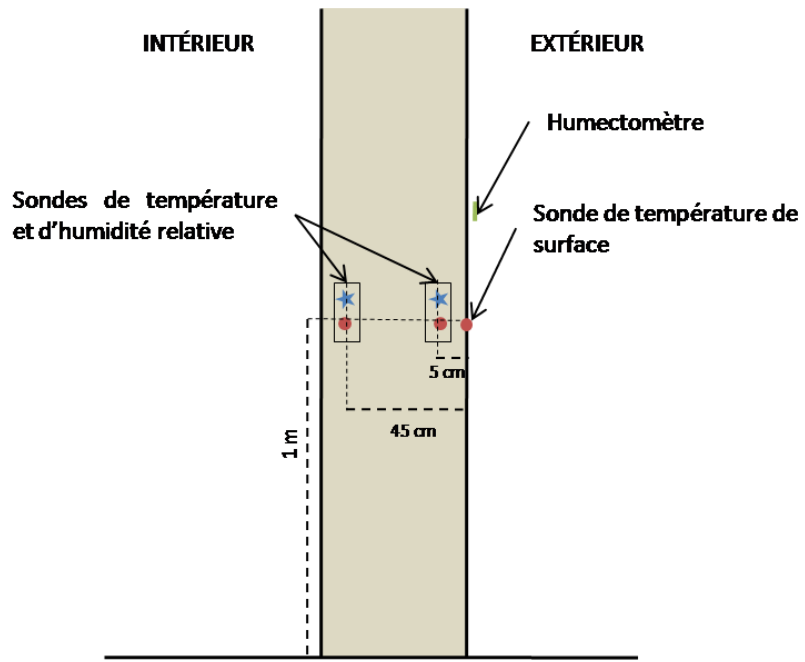


Figure 4-4 : Plan de l'instrumentation de la paroi Sud au droit de la cuisine

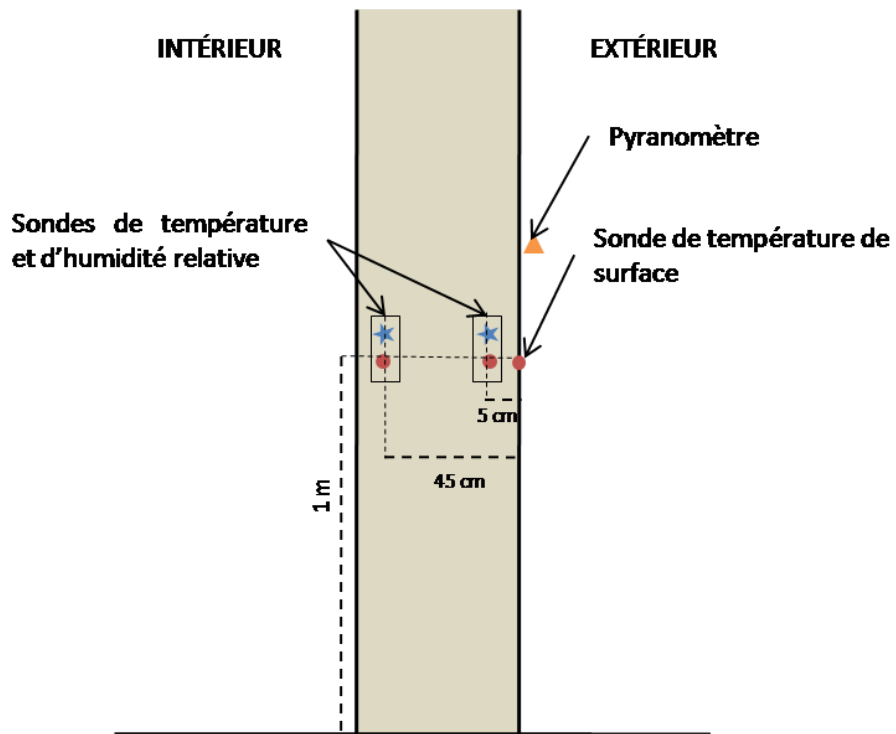


Figure 4-5 : Plan de l'instrumentation de la paroi Sud au droit du séjour

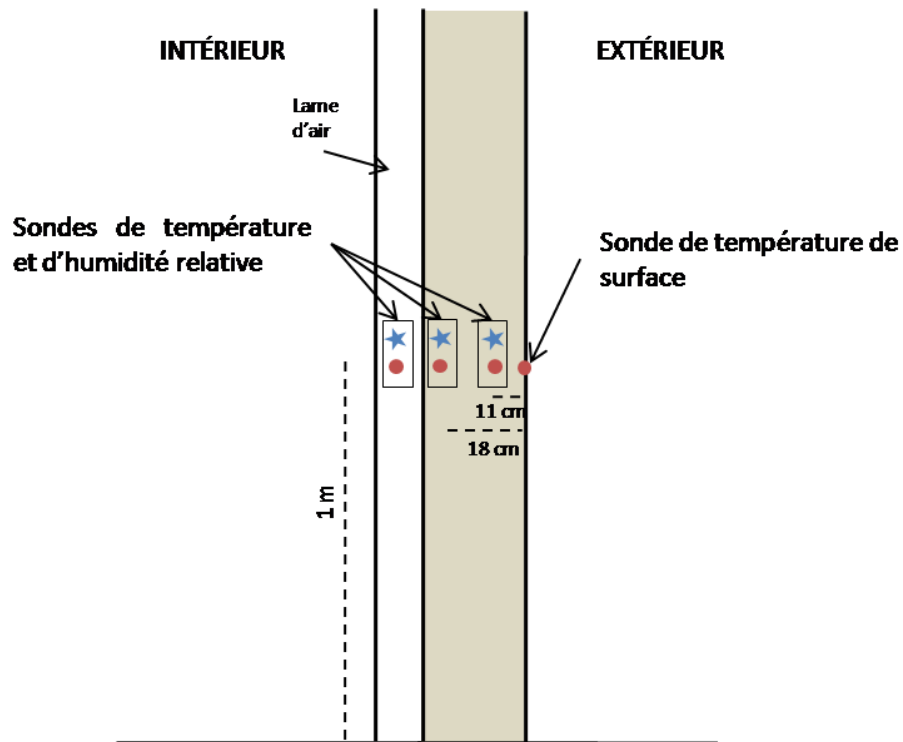


Figure 4-6 : Plan de l'instrumentation de la paroi Est

### 4.3 Résultats des mesures

La campagne de mesure a débuté lors de l'été 2011. Les capteurs ont été retirés en septembre 2013. Au cours de cette période, de nombreux problèmes techniques sont apparus, les données relevées et disponibles ne couvrent donc pas toute la période. Les analyses suivantes portent donc sur la période fin de l'hiver 2011- 2012 et printemps 2012.

#### 4.3.1 Les conditions extérieures

Voici une synthèse des données extérieures mesurées entre février et avril 2012. La Figure 4-7 présente l'évolution de la température extérieure au Nord sur trois mois environ.

### Conditions extérieures - Le Coudray Macouard

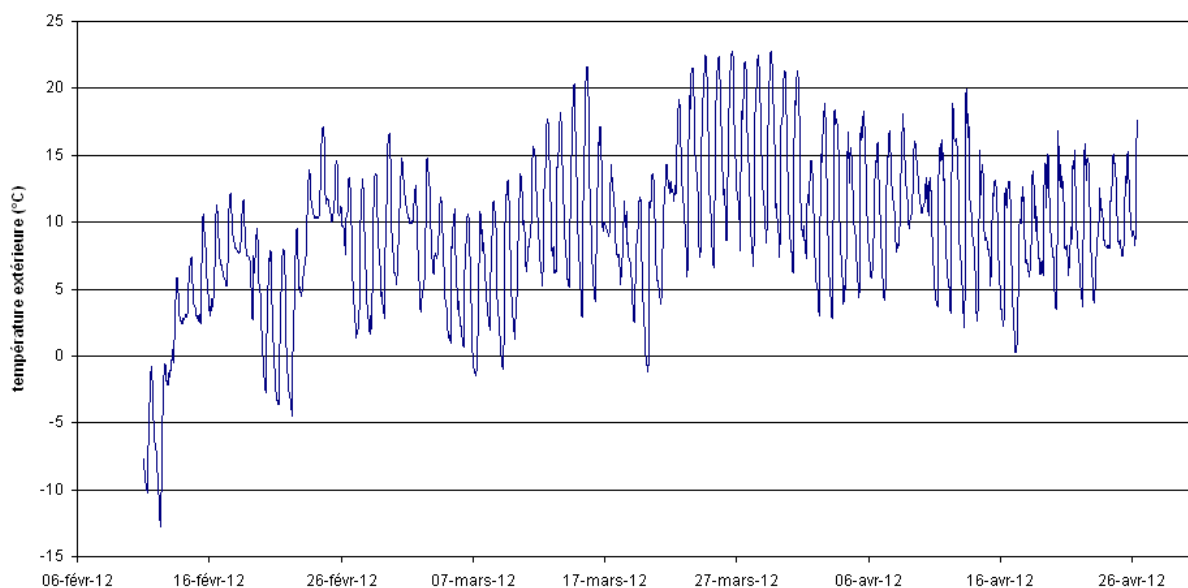


Figure 4-7 : Température et humidité relative extérieures

Température moyenne	9,3°C
Maximum de température	22,8°C
Minimum de température	-12,7°C

Tableau n°4-1 : Synthèse des conditions extérieures en température sur la période de mesure

Il faut toutefois noter que les mesures n'ont pas été réalisées selon la norme de mesure des conditions météorologiques (protection du vent, du soleil, etc.) et peuvent être donc faussées par les éléments environnants.



### 4.3.2 La température moyenne et l'amplitude

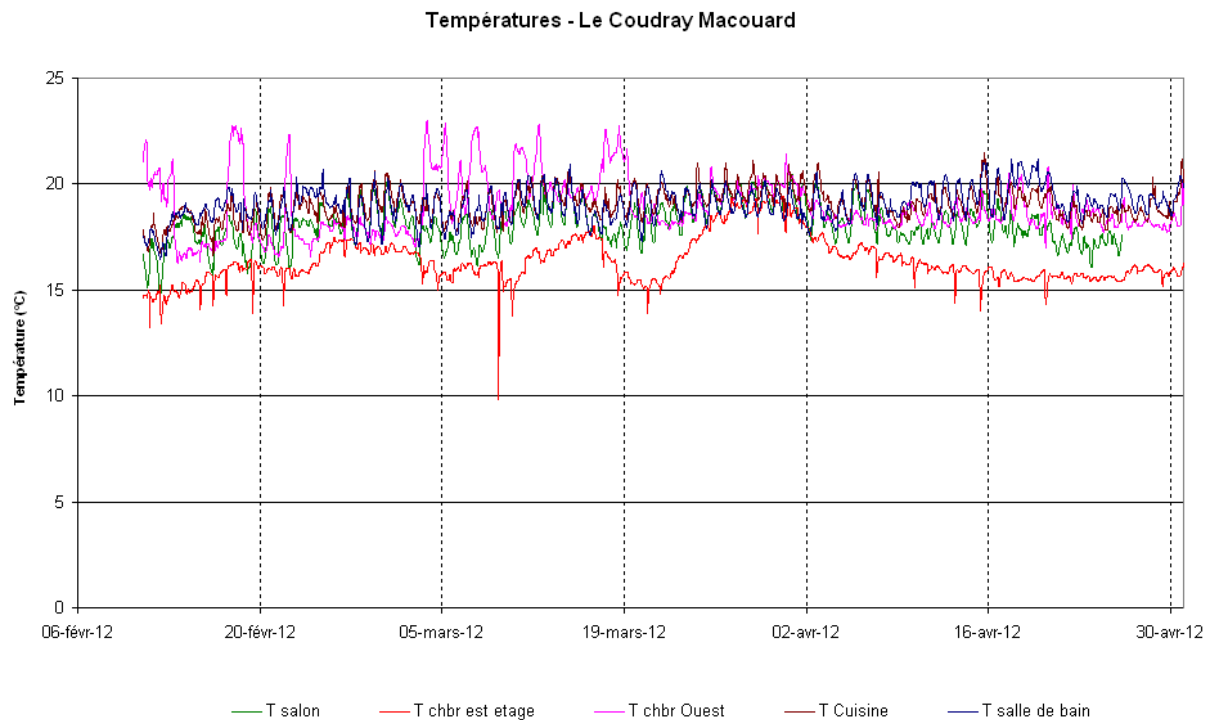


Figure 4-8 : Températures intérieures et extérieures

La Figure 4-8 montre l'évolution des températures intérieures au cours de l'hiver et du printemps 2012. La courbe rouge représente la température de la chambre à l'Est. Sa moyenne, plus basse que les autres, s'explique par la position du capteur : sur une paroi extérieure à proximité de la fenêtre. Les chutes de températures constatées sont liées à l'ouverture de la fenêtre.

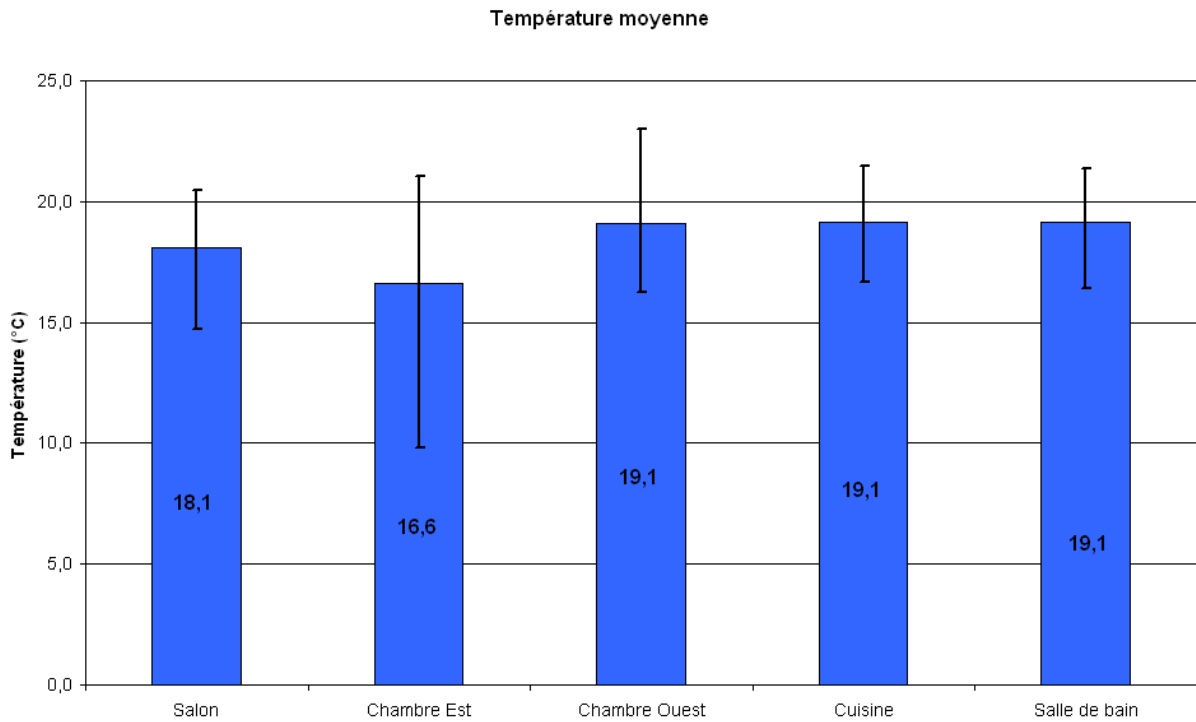


Figure 4-9 : Températures moyennes et amplitude de variation sur la période de mesure

La Figure 4-9 confirme que l'emplacement du capteur de la chambre Est ne permet pas une mesure représentative de la température ressentie par les occupants : la moyenne relevée n'est que de 16,6 °C. Dans les autres pièces, le chauffage est réglé à 19°C avec une variation entre 18 et 21°C.

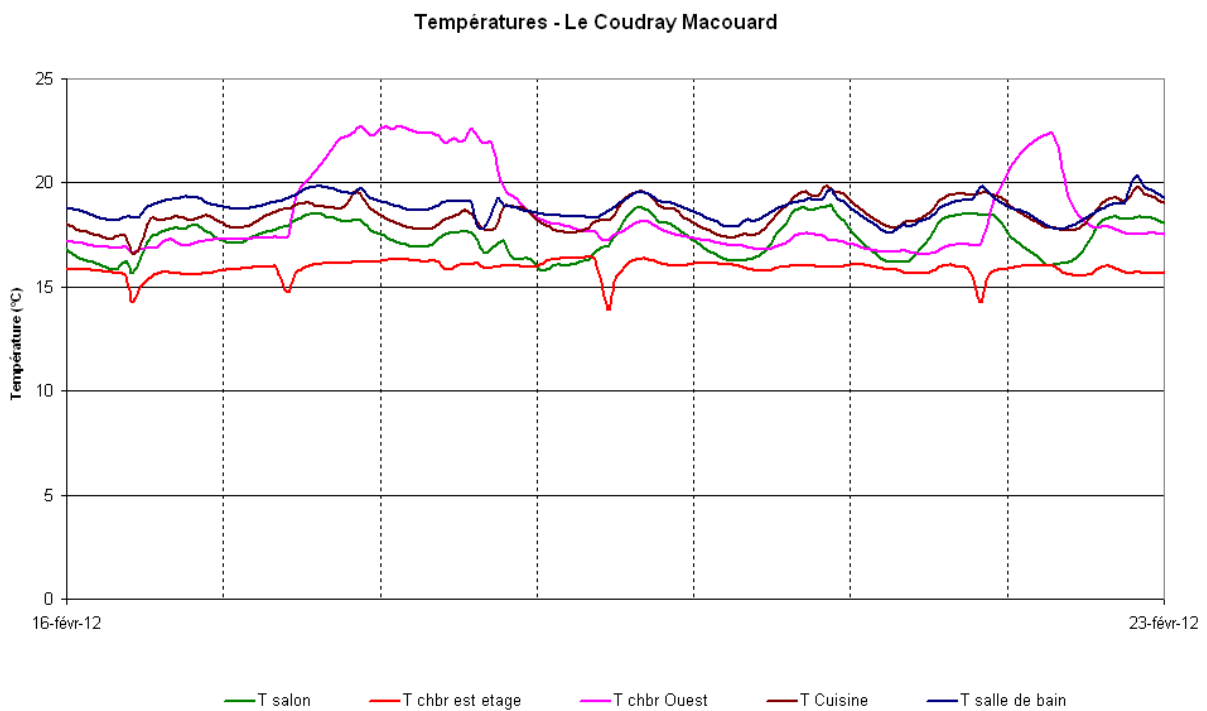
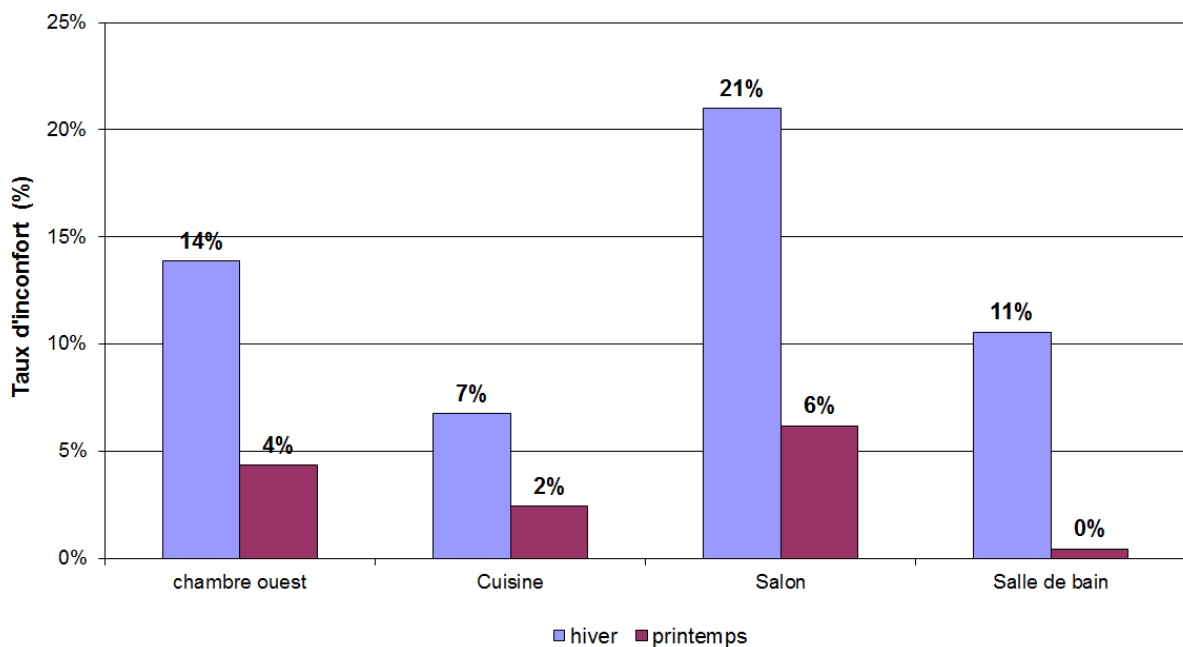


Figure 4-10 : Températures intérieures du 16/02/12 au 23/02/12

La Figure 4-10 présente un zoom sur une semaine des températures mesurées à l'intérieur. Les baisses de température liées à l'ouverture des fenêtres dans la chambre Est sont facilement observables. Par ailleurs, de légères augmentations de température sont observées dans la cuisine, la salle de bain et le salon. Elles peuvent être liées à l'utilisation de la cheminée en soirée. Enfin, la chambre Ouest montre des surchauffes importantes. Les propriétaires ont expliqué ne pas réussir à faire fonctionner le programmateur de cette pièce. Les augmentations de température pourraient être expliquées par une action sur le thermostat du radiateur. Toutefois, les températures mesurées en hiver sont dans les plages de confort : entre 18 et 21°C.

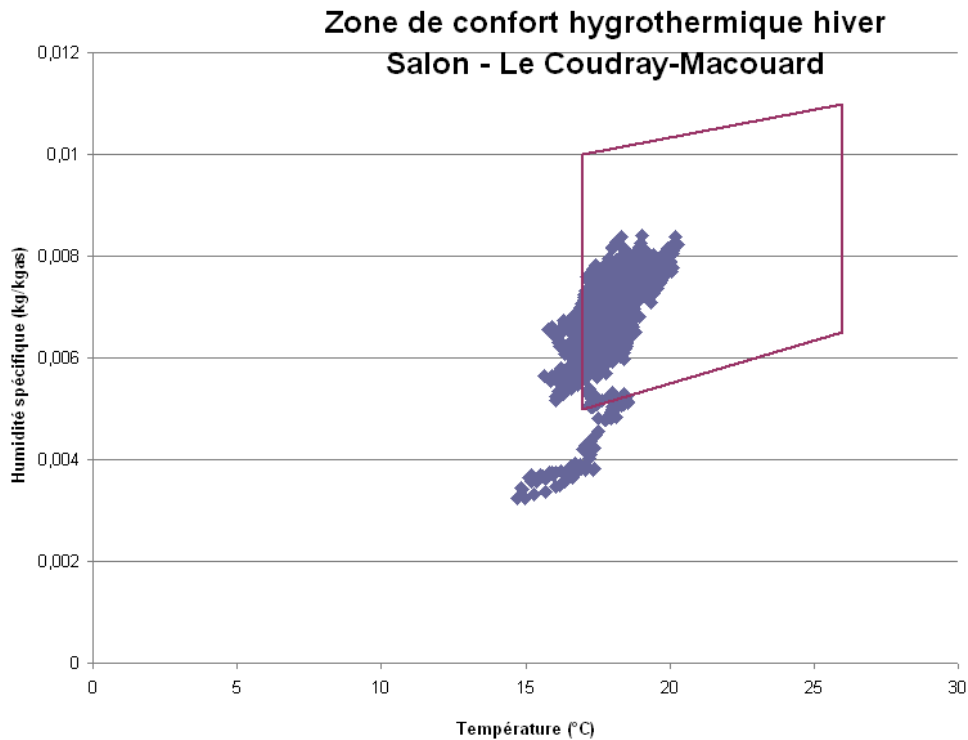
### 4.3.3 Le confort hygrothermique

**Taux d'inconfort moyen par saison - Coudray Macouard**



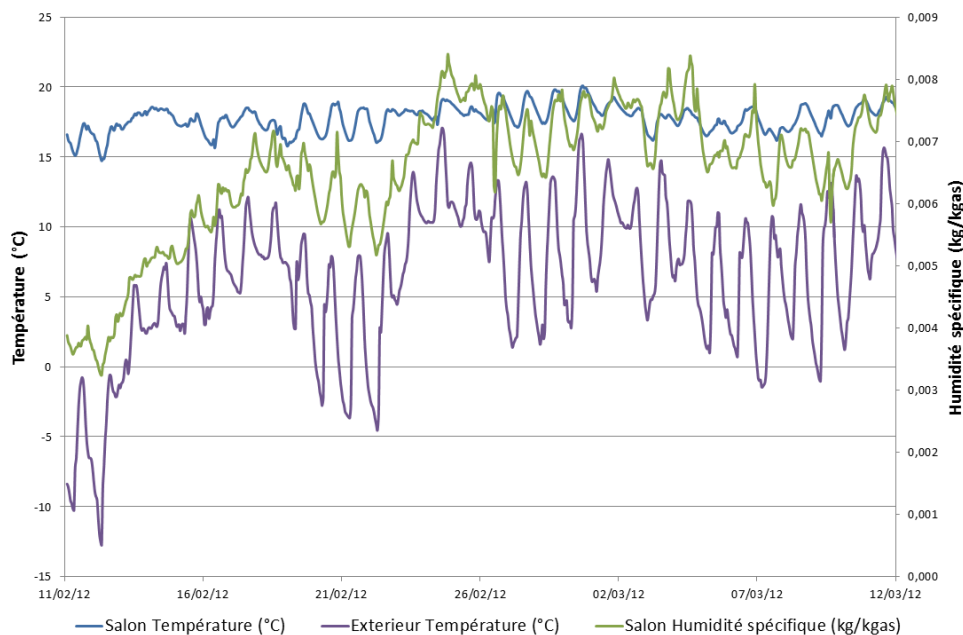
**Figure 4-11 : Synthèse des taux d'inconfort par pièce et par saison**

La Figure 4-11 présente les taux d'inconfort des différentes pièces instrumentées au cours de l'hiver et du printemps. Les pièces présentent un très bon confort (inconfort inférieur à 20%). Un zoom va être réalisé sur le salon en hiver et sur la chambre Ouest pendant les deux saisons étudiées.



**Figure 4-12 : Confort hygrothermique du salon en hiver**

Le salon apparaît comme la pièce la moins confortable du bâtiment en hiver (21% d'inconfort). La Figure 4-12 met en évidence que cet inconfort peut être lié soit à une température trop basse soit à une ambiance trop sèche. A noter que ces inconforts hydriques correspondent à la semaine du 11 au 16 février 2012 qui fut particulièrement froide et sèche (Figure 4-13). De même que pour la chambre Est, la position du capteur, sur un mur extérieur, peut expliquer que les températures relevées dans le salon soient plus faibles.



**Figure 4-13 : Température et humidité du salon et température extérieure**

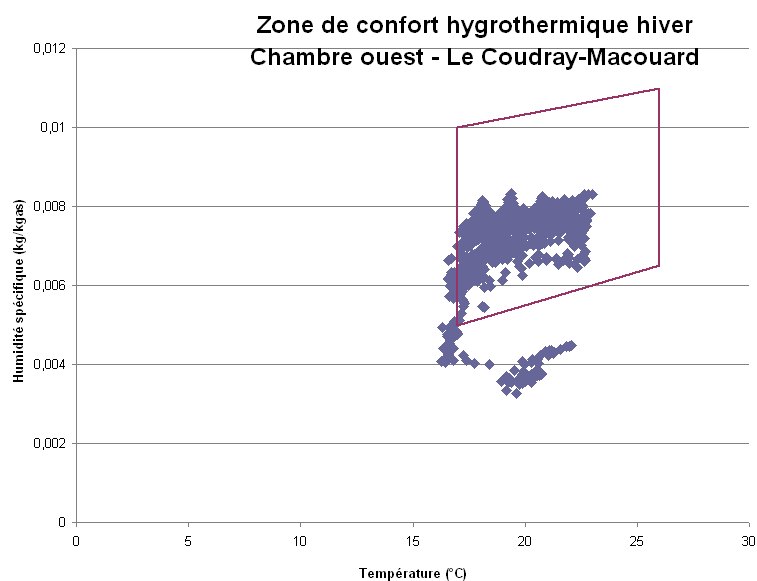


Figure 4-14 : Confort hygrothermique de la chambre Ouest en hiver

De la même manière que pour le salon, la chambre Ouest présente un inconfort lié à quelques températures inférieures à 17°C (elles peuvent être mesurées en inoccupation pendant l'ouverture des fenêtres par exemple). Par ailleurs, une humidité un peu faible a aussi été mesurée lors de la même période de froid.

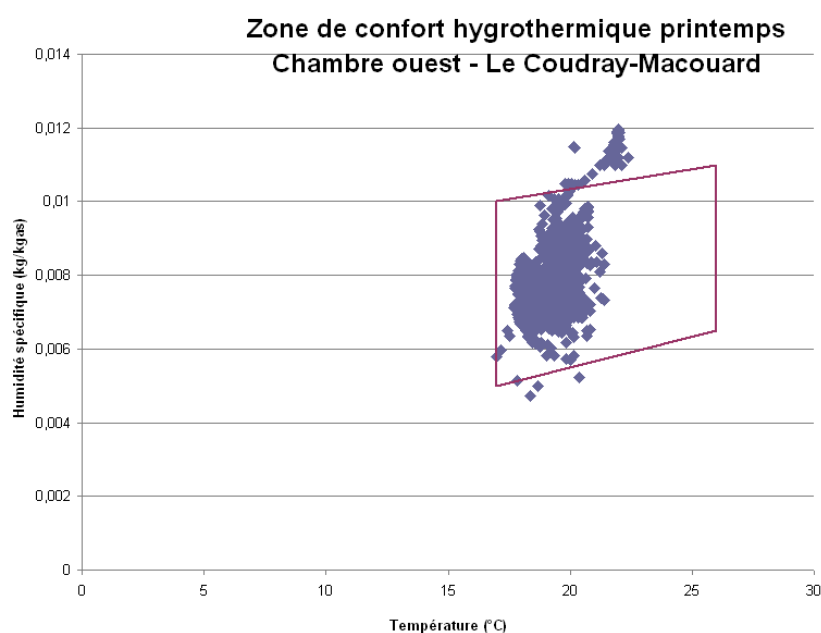


Figure 4-15 : Confort hygrothermique de la chambre Ouest au printemps

Pendant le printemps, le comportement de la chambre Ouest s'inverse et l'inconfort est alors lié à une humidité un peu élevée. Toutefois, les valeurs sont proches des limites.

#### 4.3.4 Comportement des murs

La figure 4-16 présente les températures dans le mur est à des profondeurs de 11 et 18 cm (depuis l'extérieur) ainsi que dans la lame d'air entre le mur de tuffeau et l'isolation (cf. figure 2-9) lors du mois d'octobre 2011.

On constate un déphasage et un amortissement croissant avec l'épaisseur du mur entre la température extérieure et la température mesurée à 11 cm, 18 cm puis dans la lame d'air.

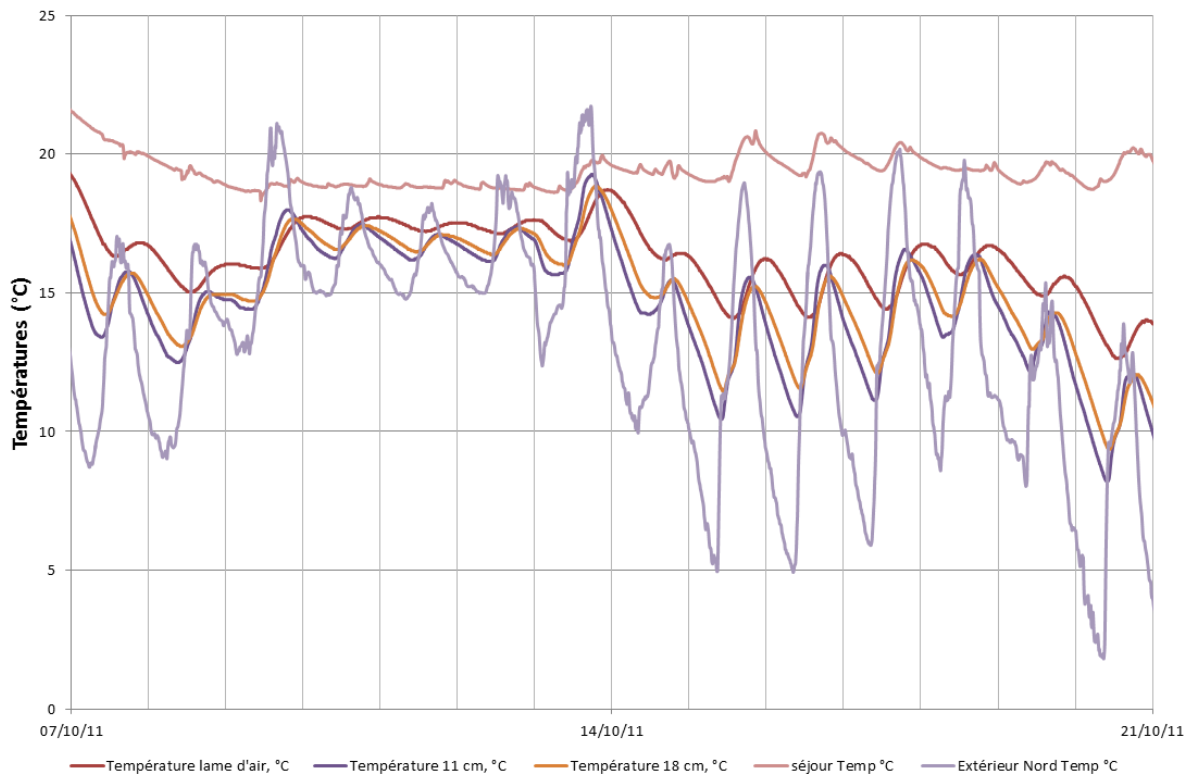


Figure 4-16 : Évolution des températures au sein du mur orienté Est

Le tableau 4-2 présente les amortissements et déphasage entre la température extérieure et les températures à 11, 18 cm dans le mur ainsi que dans la lame d'air et à l'intérieur du bâtiment. Les calculs ont été effectués pour la journée du 15 octobre 2011 (figure 4-17).

On observe que le déphasage augmente avec la profondeur du mur. Par contre, il est réduit lorsque l'on considère la température d'air intérieure.

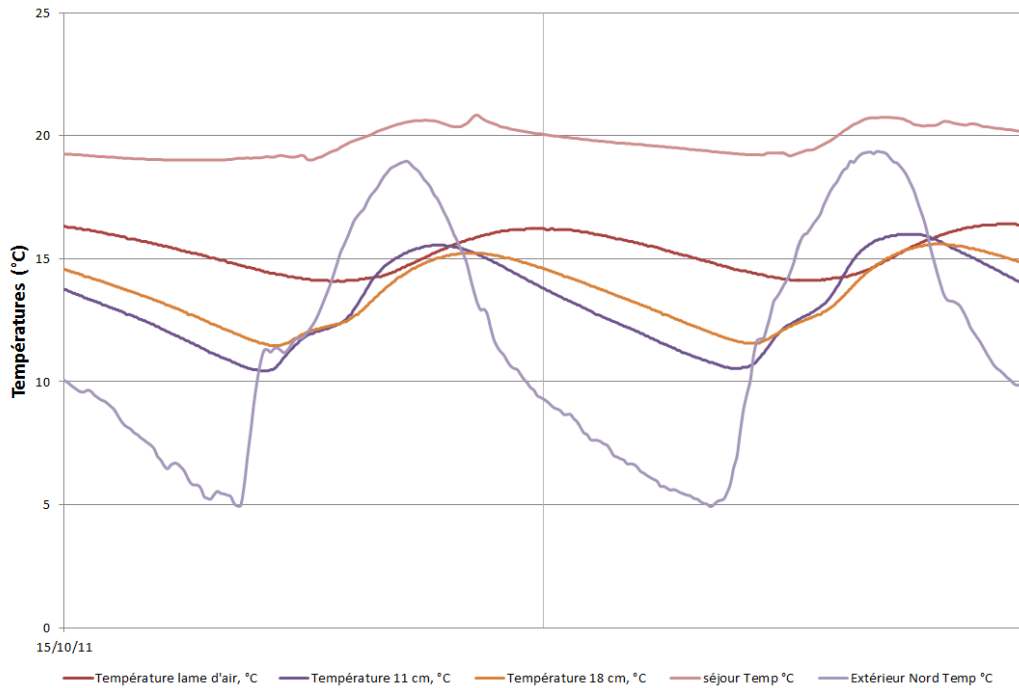


Figure 4-17 : Évolution des températures au sein du mur : zoom sur la journée du 15/10/11

	Ext	11 cm	18 cm	Lame d'air	Séjour
Amortissement		8,5	10	11,6	12,2
Déphasage (h)		1h30	3h20	6h	3h30
Température moyenne (°C)	11,5	13,1	13,5	15,2	19,6

Tableau 4-2 : déphasage et amortissement dans le mur est le 15 octobre 2011

L'inertie du mur provoque un amortissement des variations de température extérieures dès 11 cm de profondeur. La température de la lame d'air est quant à elle autant influencée par les variations de température à l'intérieur du bâtiment qu'à l'extérieur : sa moyenne est exactement comprise entre ces deux températures.

Les figures 4-18 et 4-19 présentent les humidités spécifiques au sein du mur Est, à l'extérieur et dans le séjour sur la même période.

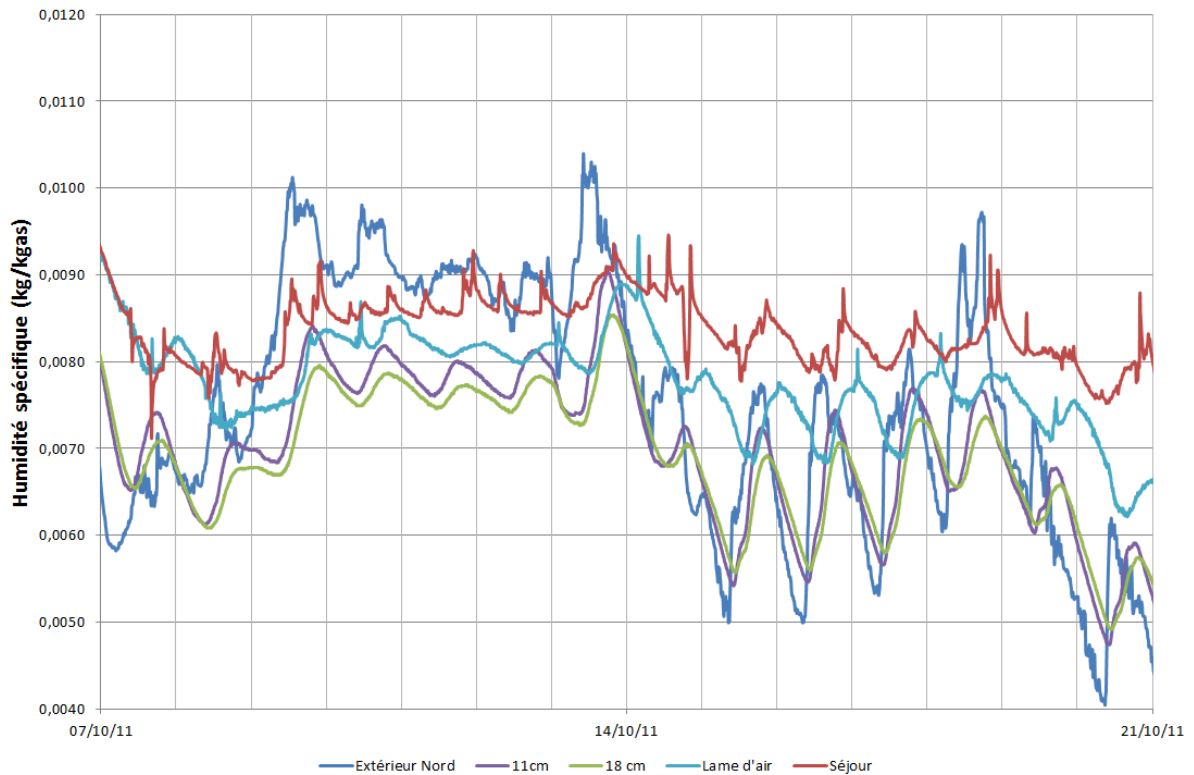


Figure 4-18 : Évolution des humidité spécifiques au sein du mur orienté Est

Lors de ce mois d'octobre, l'air intérieur a tendance à être plus humide que le mur, voire que l'extérieur. De même que pour la température, on constate une augmentation progressive de l'humidité dans le mur depuis l'extérieur vers la lame d'air. Cette augmentation s'accompagne d'un amortissement et un déphasage des variations de l'humidité extérieure.

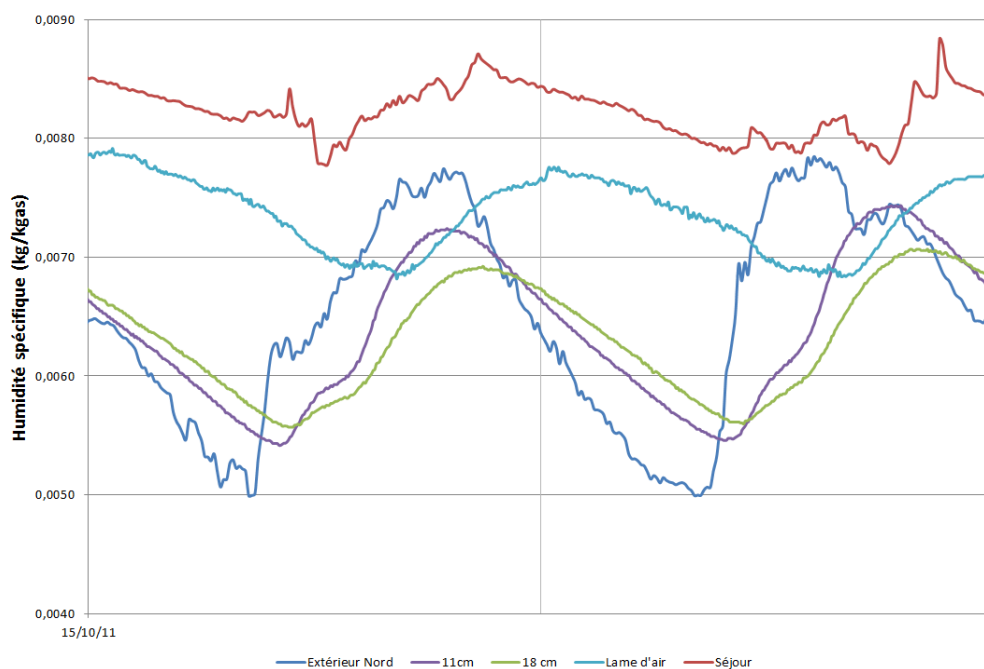




Figure 4-19 : Évolution des humidité spécifiques au sein du mur est : zoom sur la journée du 04/10/11

#### **4.4 Conclusions**

Cette habitation, réhabilitée avec des matériaux biosourcés, paraît globalement confortable. Les transferts thermo hydriques au sein des parois sont ralentis par une inertie importante induite par les murs en tuffeau et l'isolation.