

Rapport action tuffeau

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

CAHIER n°2

Maison de bourg – Saint-Mathurin sur Loire



Mesures : hiver 2011 - été 2013

Figure 1-1 : Façade Sud, Saint-Mathurin sur Loire

1 Description du bâtiment

En pied de levée de la Loire, ce bâtiment a été construit en deux fois : une première partie au Sud construite a priori dans la deuxième moitié du XVIIIème siècle et une autre partie, au Nord, date de la fin du XIXème siècle (vers 1890 d'après le type de cheminée).

Du fait de la levée de la Loire, le bâtiment présente un rez de chaussée et un rez de jardin, plus un étage (cf. Figure 1-2).

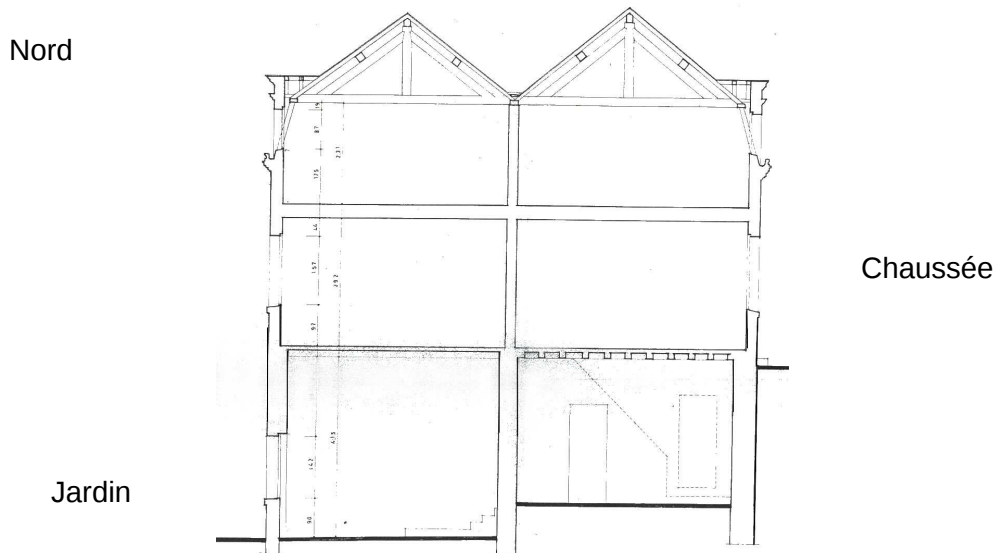


Figure 1-1 : Partie Nord XIXème, partie Sud XVIIIème

Le rez de jardin comporte les locaux techniques et des caves (Figure 1-3). Le rez de Chaussée comprenait, avant travaux 5 pièces et une entrée (Figure 1-4). L'étage (Figure 1-5) comportait 3 pièces.

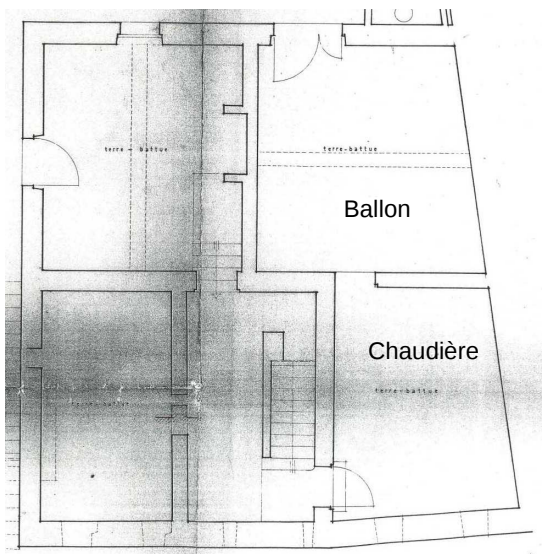


Figure 1-2 : Plan du rez-de-jardin

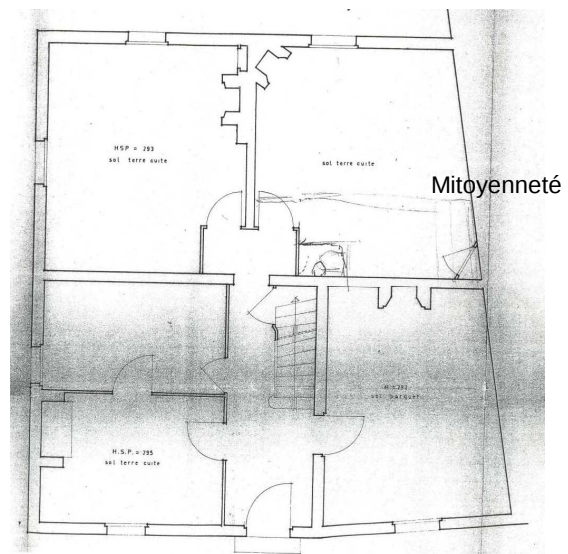


Figure 1-3 : Plan du rez-de-chaussée

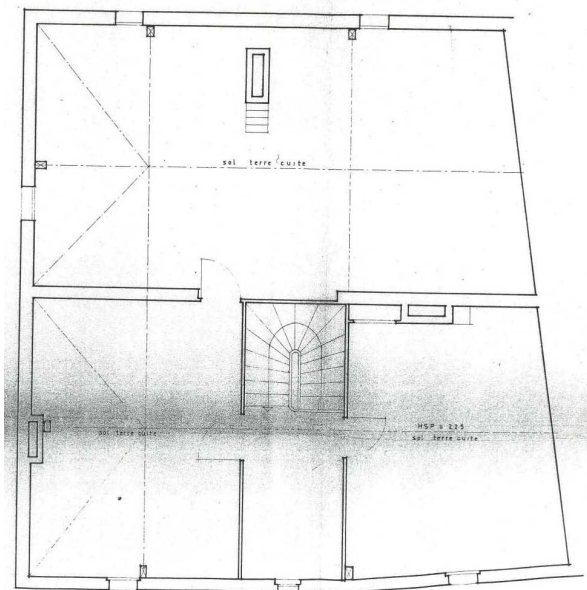


Figure 1-4 : Plan du 1er étage

Les murs sont en pierres de taille de tuffeau gris de 25 cm d'épaisseur, à l'exception des murs de la cave, qui sont assisés avec des pierres tout-venant (silex, calcaire gréseux) ou parpaings de tuffeau. Ces murs ont été enduits avec un mortier bâtard chaux-ciment. La façade sud subit une altération causée par les gaz d'échappement des véhicules (formation d'un sulfin). Il s'agit d'une pathologie typique des façades exposées aux voies circulantes.



Figure 1-5 : Partie XIXème : enduit ciment sur la façade Nord (à gauche)



Figure 1-6 : Façade Sud recouverte de sulfin

Du fait d'une mauvaise évacuation des eaux pluviales (fondations plus basses que la chaussée), les eaux de gouttière s'infiltrent en partie en pied de mur. Le trottoir est toutefois constitué de pavés non scellés favorisant la perspiration des murs enterrés.

Avant les travaux, les parois du rez-de-chaussée étaient isolées par 10 cm de laine de verre et plaque de plâtre sur rail. Sauf la paroi intérieure Sud, enduite de ciment, et isolée par une plaque de polystyrène. A l'étage, seule une pièce était isolée avec 10 cm laine verre sur murs et rampants et 20 cm au plafond. Lors de la dépose des isolants, des traces d'humidité et de moisissures ont été observées.

Avant les travaux, une chaudière à gaz chauffait toute la maison.

2 Objet de la rénovation

Il s'agit d'une rénovation complète :

- Réorganisation des pièces,
- Changement de l'isolation,
- Remplacement des menuiseries,
- Remplacement des systèmes.

La rénovation a été effectuée dans un esprit "écologique", avec un objectif de consommations de 80 kWh/m².an et une labellisation BBC - Effinergie Rénovation.

La réorganisation des pièces consiste à supprimer des cloisons et créer des grandes ouvertures dans la partie rez de chaussée (figure n°2-1) et à créer 4 chambre et une salle de douche à l'étage.

Consulter également :

http://planclimat.alkante.com/accueil_plan_climat_territorial/habitat/habitat_fiches_techniques

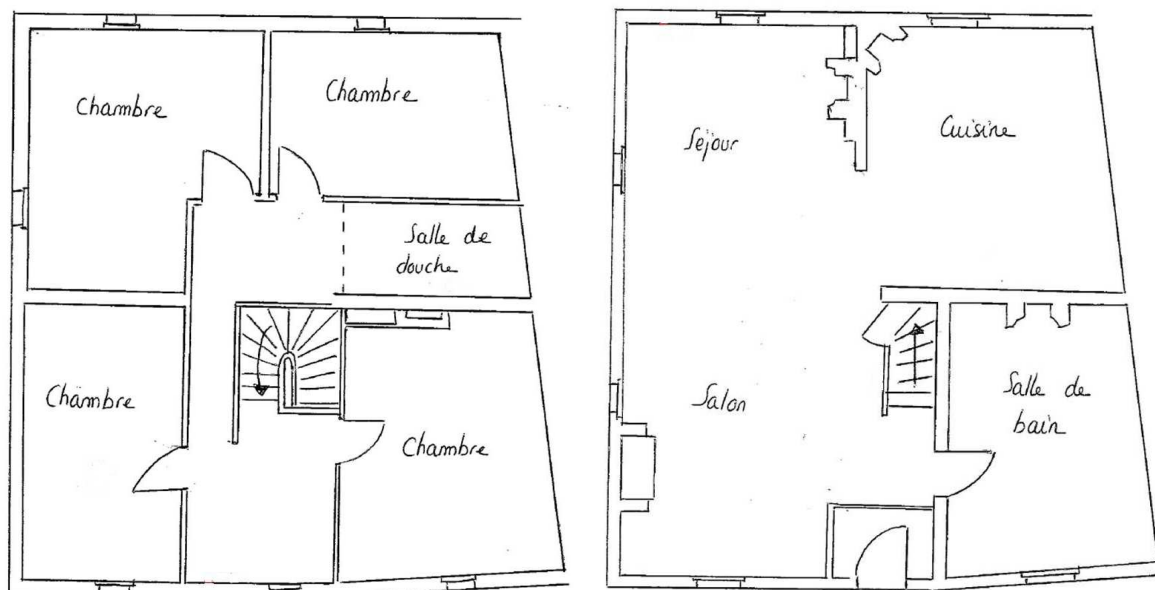


Figure 2-1 : Plan après rénovation

2.1 Restauration et traitement des pathologies

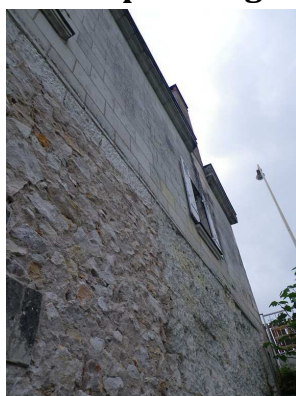


Figure 2-2 : Façade Ouest avec mur du rez-de-jardin piqueté (pierres froides à gauche, tuffeau à droite)

Le mur de façade de la cave Ouest est constitué pour moitié de pierres froides et pour moitié de parpaings de tuffeau. Enduit antérieurement de ciment, il a été piqueté par un tailleur de pierre, ce qui a permis de mettre à jour le phénomène d'alvéolisation du tuffeau engendré par sa non compatibilité chimique avec le ciment.

2.2 Traitement de l'enveloppe

2.2.1 Intervention sur les murs

Le sous-sol n'a subi aucune intervention, la dalle légère en béton et les mortiers de ciment ou de ciment-chaux de Chamotte (argile cuite pilée) des murs sont conservés.



Figure 2-3 : Bouches d'aération vu du sous-sol, mur enduit de béton

Au rez de chaussée, les isolants existants ont été remplacés par de la laine semi-rigide de chanvre-bois, choisie pour sa densité et sa capacité perspirante. Sa composition est répartie comme suit : 35% chanvre, 55% bois, et 10% de polyester.

La paroi Est, mitoyenne, est isolée par 10 cm de laine encadrée par des lisses de bois (figure 2-4 et 2-5).

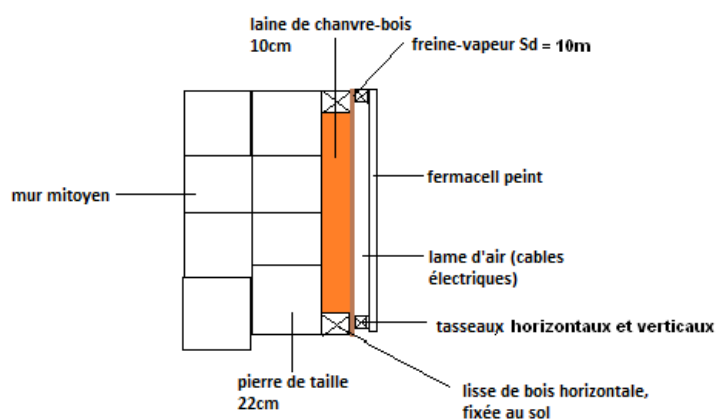


Figure 2-4 : Coupe verticale de la paroi Est mitoyenne



Figure 2-5 : Lisse de bois fixée le long du mur

Les parois Nord et Ouest sont isolées par 10 cm de laine, directement en contact avec le plancher et le plafond et 10 cm entre 2 lisses en bois (figure 2-6).

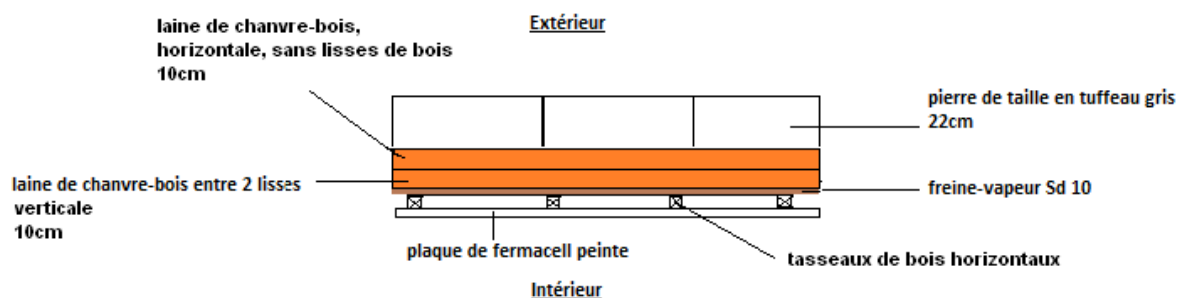


Figure 2-6 : Coupe horizontale de la paroi Ouest

Après la pose de la laine de chanvre-bois, un frein-vapeur ($S_d = 10$) est mis en œuvre pour rendre la paroi étanche à l'air. Le frein-vapeur est fixé entre la laine et les tasseaux verticaux. Ces derniers sont vissés sur les lisses de bois horizontales. Enfin, des plaques Fermacell, peintes, sont vissées sur les tasseaux. La lame d'air entre le frein-vapeur et le Fermacell permet le passage des câbles électriques.

La paroi Sud étant couverte d'un enduit ciment structurant pose problème. En effet, cet enduit empêche le tuffeau de respirer et peut provoquer des pathologies dues à l'humidité. Il a donc été décidé de considérer cette paroi comme un bardage ventilé par l'extérieur. Une cloison a donc été montée et isolée à l'intérieur.

A l'étage, les rampants ont été isolés par 2x10 cm de laine de chanvre-bois entrecroisée, avec un frein-vapeur côté intérieur et un pare-pluie côté toiture.

En allège, les murs sont enduits de ciment. Dans une chambre, cet enduit a été piqueté laissant apparaître un tuffeau fortement altéré (contrairement aux murs non enduits, en très bon état - cf. illustration ci-dessous).



Figure 2-7 : Paroi Sud avant isolation



Figure 2-8 : Mur nain Sud : à gauche enduit ciment, à droite anciennement enduit ciment

2.2.2 Intervention sur les ouvertures

Les fenêtres ont été remplacées au cours de l'été 2010. Il s'agit de menuiseries mixtes aluminium/chêne composées de double vitrage 4/16/4 argon sauf 3 fenêtres (façade Sud et Ouest) en 8/20/4 (renforcement phonique côté rue).

Les ponts thermiques des liaisons dormants-façades sont réduits par bourrage de laine de mouton en pelote et absence de tapées.



Figure 2-9 : Frein-vapeur et laine de mouton pour calfeutrer les fenêtres



Figure 2-10 : Laine de mouton

2.2.3 Intervention sur la toiture

La poutre sablière a été remplacée car elle était complètement altérée par l'humidité. Les rampants ont été isolés par 2x14 cm de laine de chanvre-bois entrecroisés. Un frein-vapeur est apposé avant les plaques de fermacell.

Le faux-plafond est en plaques d'OSB, servant de coffrage pour la ouate de cellulose (40 cm dans les combles perdus : 35kg/m³) insufflée par une cardeuse louée. Entre les plaques d'OSB et la ouate, un frein-vapeur (Sd=10) a été apposé.

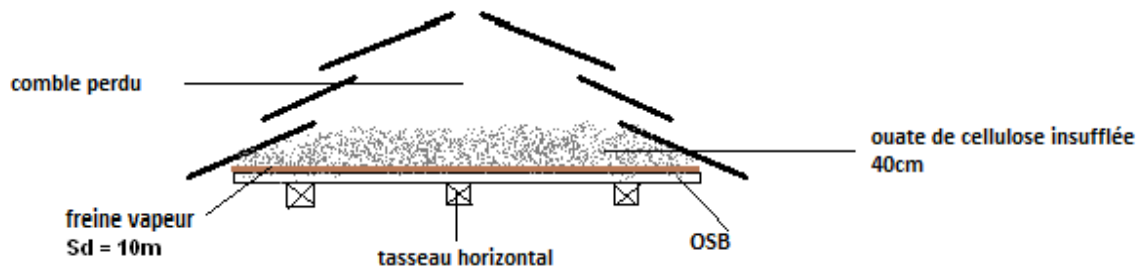


Figure 2-11 : Coupe verticale de l'isolation de la toiture



Figure 2-12 : Faux-plafond avant insufflation de ouate de cellulose



Figure 2-13 : Ancienne poutre sablière altérée

2.3 Traitement des cloisons et planchers intérieurs

2.3.1 Intervention sur les planchers bas et hauts

Le plancher du rez-de-chaussée de la partie XVIIIème est composé de plafonnets (briques creuses et plates) sur lambourdes. Il a été isolé en sous-face par 20 cm de laine de verre recouverte de plaques de plâtre. Sur les terres cuites, plusieurs solutions ont été mis en oeuvre :

- au Sud-Est, complexe lambourdes/parquet
- dans les autres pièces, une chape de chaux a été coulée pour fixer des tomettes



Figure 2-14 : Plancher dans une pièce du XIXème



Figure 2-15 : Plancher du rez-de-chaussée vu du sous-sol (plafonnets + laine de verre)



Figure 2-16 : Plancher en tomettes du rez-de-chaussée

Dans la partie XIXème, le plancher est composé de plaques de bois reposant sur les lambourdes. Un complexe, composé d'un film plastique de quelques centaines de microns d'épaisseur et d'une chape en ciment allégée en copeaux de bois, isole le plancher. La chape permet de fixer le carrelage.

Le plancher haut, de même nature que le plancher du rez-de-chaussée, a été isolé par les mêmes isolants par le dessous. Il est, en revanche, terminé par des fusées de torchis et un parquet en bois massif.

2.4 Traitement des systèmes de chauffage et de ventilation

2.4.1 Installation d'un système de ventilation

Le remplacement des menuiseries et l'utilisation de frein-vapeur réduit le renouvellement d'air naturel par les défauts d'étanchéité. L'installation d'une ventilation mécanique est donc indispensable.

Une VMC double flux a été choisie pour assurer la bonne ventilation de la maison sans compromettre sa performance énergétique. Elle offre la possibilité de sur-ventiler la maison les nuits d'été, par augmentation du débit d'air frais insufflé.



Figure 2-17 : VMC double-flux en cours de montage



Figure 2-18 : Sortie de gaine rigide

2.4.2 Installation d'un système de chauffage

Une chaudière bois-bûches, en combustion inversée, d'une puissance nominale de 25 kW (modulante entre 5 et 31 kW) est installée. Son rendement varie entre 86 et 92%. Elle est sur-dimensionnée afin de permettre une autonomie sur la journée assurée par l'intermédiaire d'un ballon tampon de stockage de 2000 L (ballon d'hygrorégulation).



Figure 2-19 : Chaudière

Celui-ci comporte un double serpentin afin de permettre l'installation de panneaux solaires thermiques ultérieurement. Une sonde d'ambiance assure la régulation.

En outre, elle alimente un ballon de 300 L pour la production d'ECS. Une résistance électrique est prévue, dans le ballon, comme système d'appoint.

3 Instrumentation approfondie

Cette maison a fait l'objet d'une instrumentation "approfondie". L'ambiance a été instrumenté ainsi que certaines parois. Il a également été mis en place un compteur d'énergie en aval de la chaudière.

3.1 Ambiance intérieure

6 capteurs de températures et d'hygrométrie ont été mis en place, ainsi qu'une température de "boule noire". 2 sondes de températures ont été placées dans les combles.



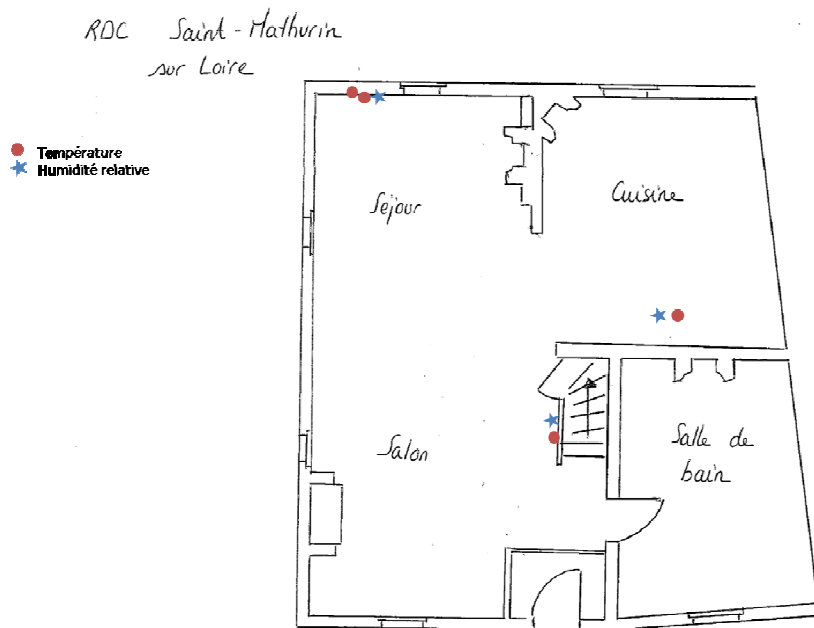


Figure 3-1 : Plan d'instrumentation du rez-de-chaussée - Saint-Mathurin sur Loire

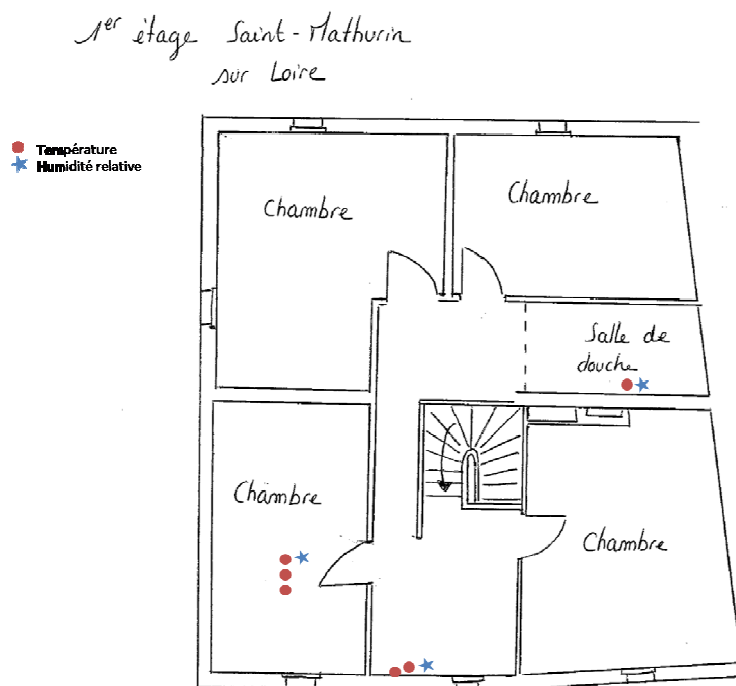


Figure 3-2 : Plan d'instrumentation du 1er étage - Saint-Mathurin sur Loire

3.2 Parois

Les parois ont été instrumentées en plusieurs profondeurs avec des sondes de températures et d'hygrométrie. Des sondes de températures et d'hygrométrie ont également été placées sur les parois sud et nord afin de déterminer les conditions extérieures.

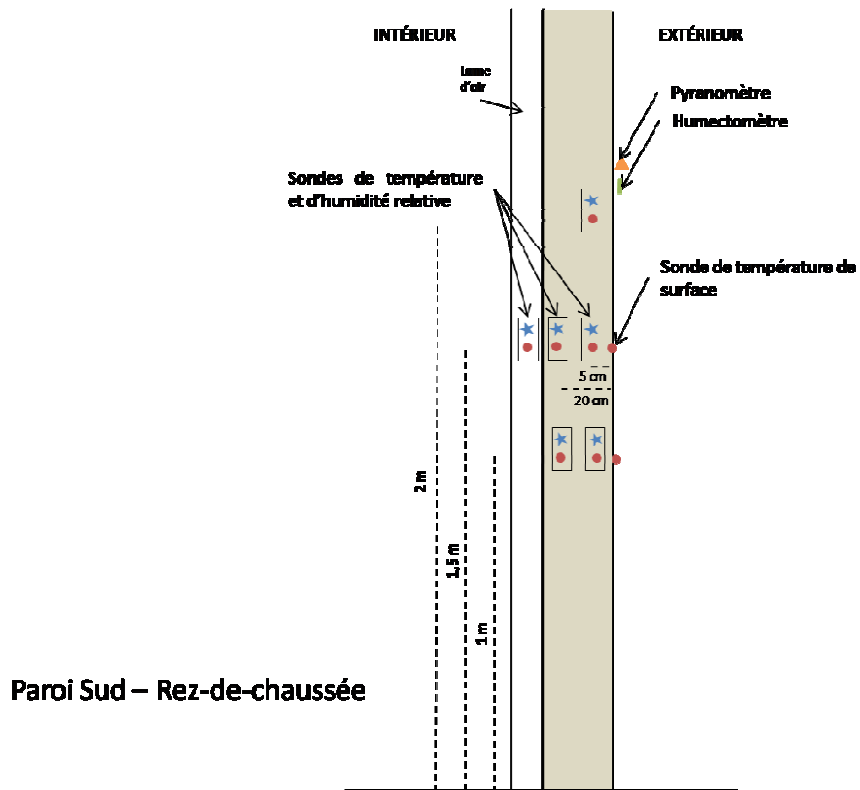
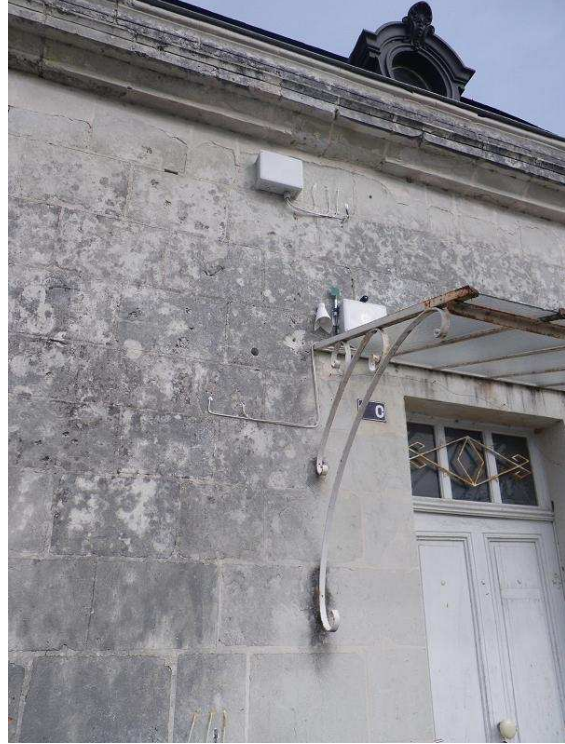
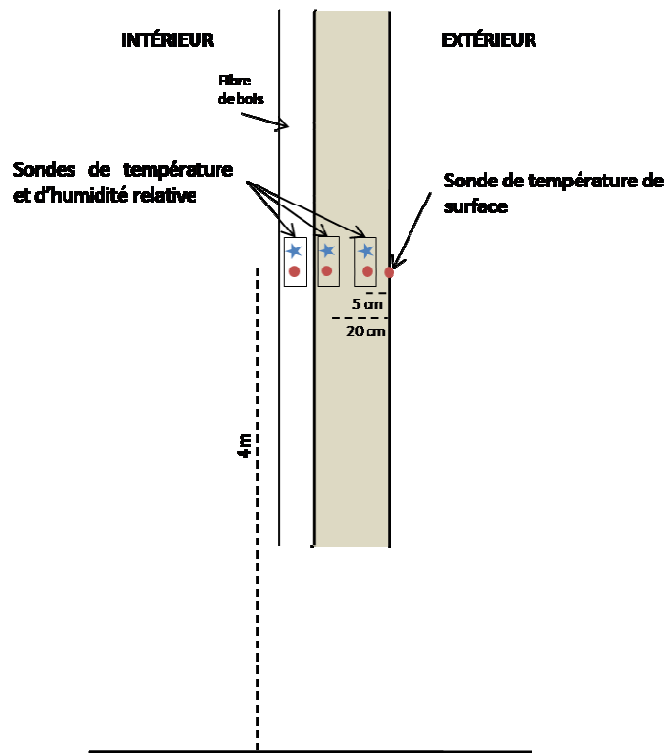


Figure 3-3: Plan de l'instrumentation de la paroi Sud au rez-de-chaussée



Paroi Sud – 1^{er} étage

Figure 3-4 : Plan de l'instrumentation de la paroi Sud au 1er étage



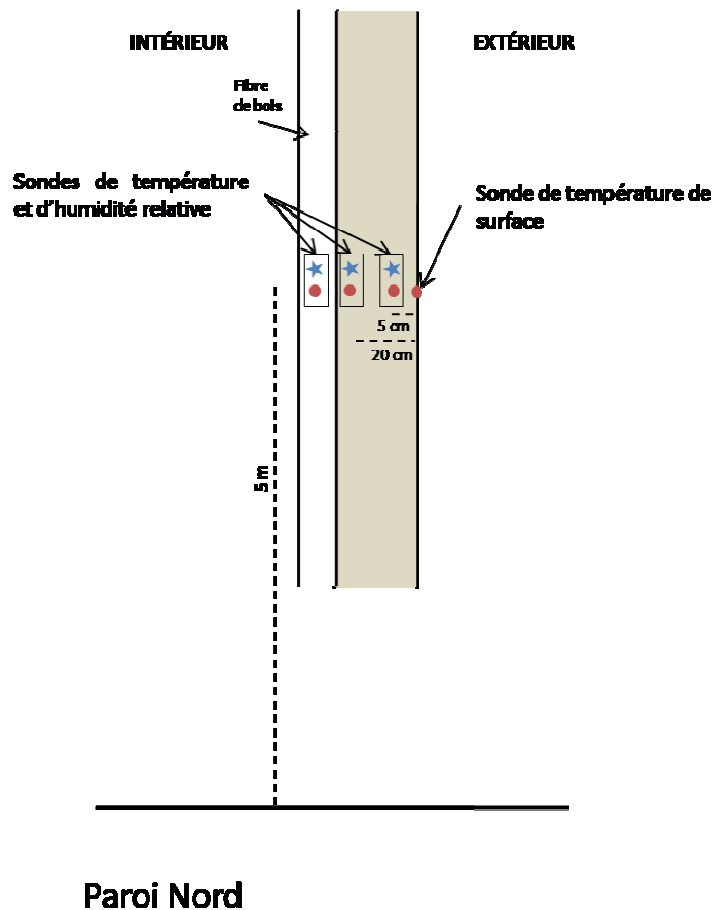


Figure 3-5 : Plan de l'instrumentation de la paroi Nord au rez-de-chaussée

3.3 Consommations énergétiques

Un compteur d'énergie calorifique a été mis en place en novembre 2012 en aval de la chaudière. Ce compteur enregistre l'énergie réellement utile au chauffage du bâtiment, s'affranchissant du rendement de la chaudière.

4 Résultats des mesures

Les mesures ont été effectuées depuis décembre 2011, et ce sont poursuivies tout au long des travaux de rénovation jusqu'à l'été 2013.

4.1 Les conditions extérieures

Voici une synthèse des données extérieures mesurées entre le 21/12/2011 et le 16/07/2013. A noter que certains capteurs défectueux ont été retirés au cours de cette période, notamment les capteurs de température extérieure. Le graphique suivant présente donc les températures relevées non seulement à Saint Mathurin mais également à Vivy et au Coudray Macouard (Cahiers 1 et 3).

Les travaux de réhabilitation ont continué tout au long des mesures.

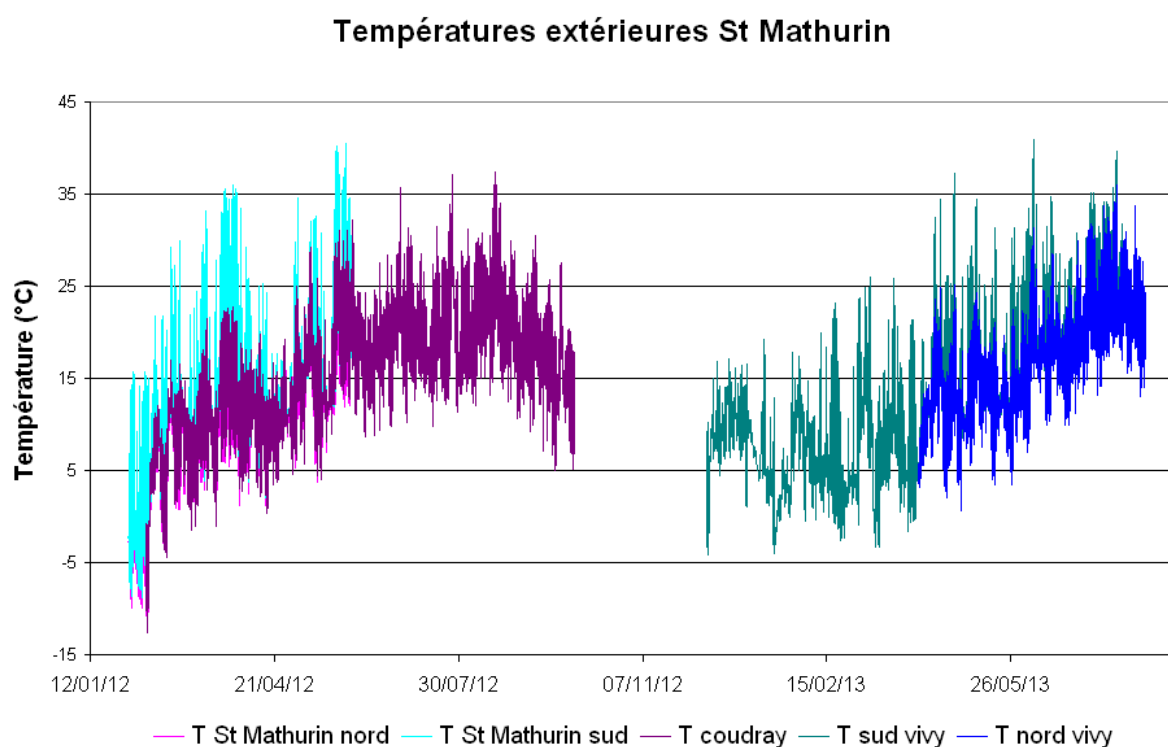


Figure 4-1 : Température et humidité relative extérieures

2011-2012 St Mathurin	Sud	Nord
Température moyenne (°C)	12,5	9
Maximum de température (°C)	40,5	27,5
Minimum de température (°C)	-9,5	-11
Journée la plus chaude	29 /05/2012	18/08/2012

On note une différence importante de 3 °C en moyenne entre la façade nord et la façade sud.

2012-2013 vivy	Sud	Nord
Température moyenne (°C)	12	16,6
Maximum de température (°C)	41	36
Minimum de température (°C)	-4	1
Journée la plus chaude	22 /07/2013	

Tableau n°2-1 : Synthèse des conditions extérieures en température sur la période de mesure

4.2 La température intérieure moyenne et son amplitude

Températures Saint Mathurin

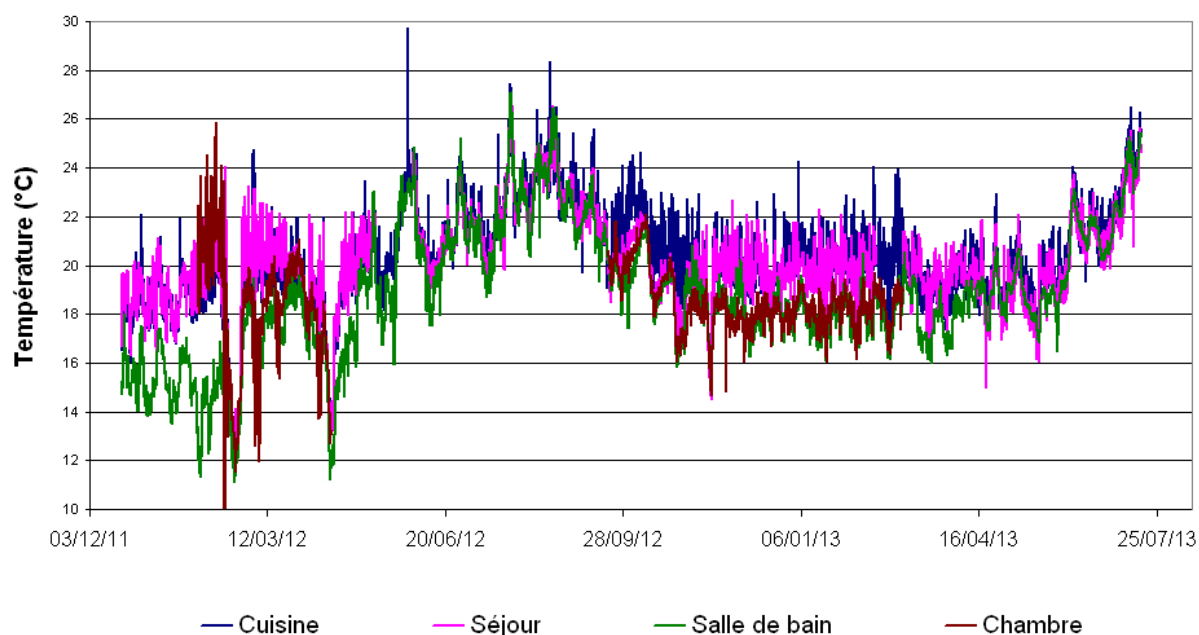


Figure 4-2 : Températures intérieures

La Figure 4-2 présente les températures mesurées à l'intérieur de la maison de décembre 2011 à juillet 2013. En été, l'ensemble des pièces à un comportement similaire. A contrario en hiver, les pièces du rez-de-chaussée (séjour et cuisine) ont un comportement différent de celles de l'étage (salle de bain et chambre).

Températures Saint Mathurin

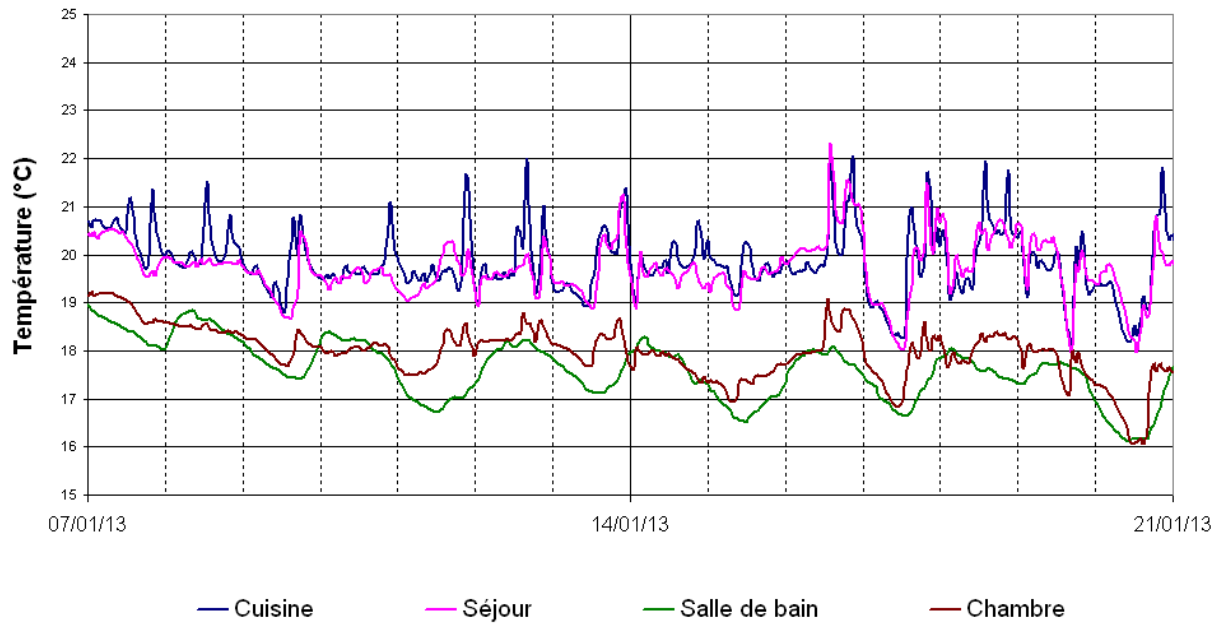


Figure 4-3 : Températures intérieures : zoom sur janvier 2013

La Figure 4-3 met en évidence les deux comportements différents entre l'étage et le rez-de-chaussée. La température de consigne du rez-de-chaussée se situe autour de 20°C, à l'étage elle apparaît plus faible : autour de 18°C.

Températures moyennes Saint Mathurin

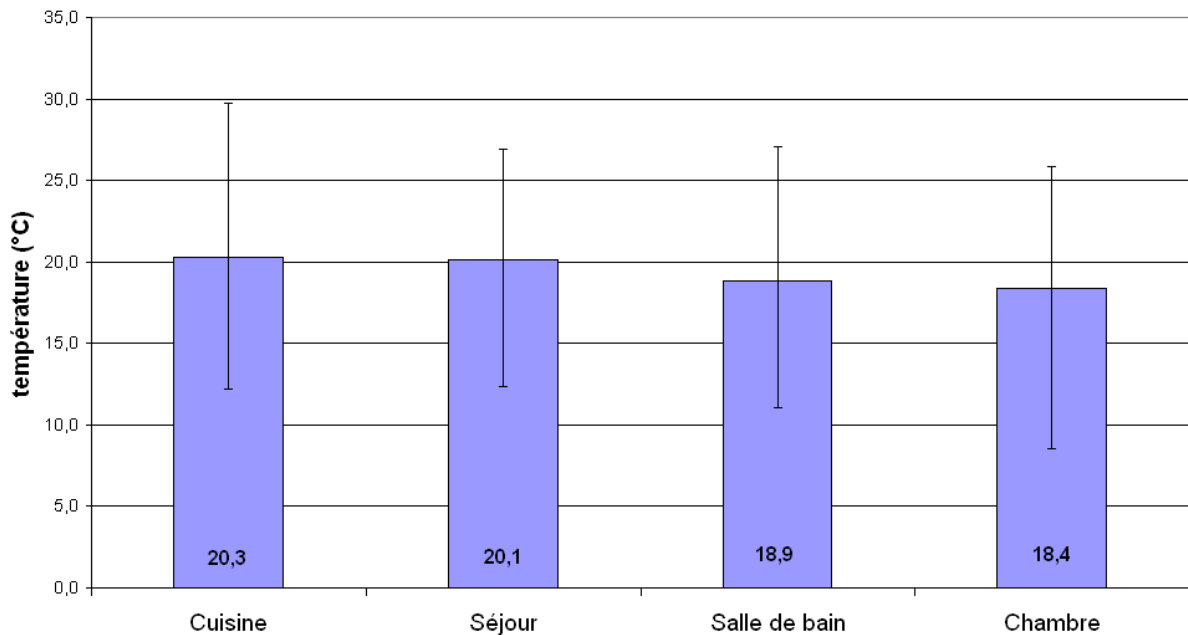


Figure 4-4 : Températures moyennes et amplitude de variation sur la période de mesure

Les moyennes de température ont environ 1°C de différence entre l'étage et le rez-de-chaussée. Sur une année complète, les amplitudes de températures constatées sont importantes.

4.3 Le Déphasage et l'amortissement

jour le plus chaud

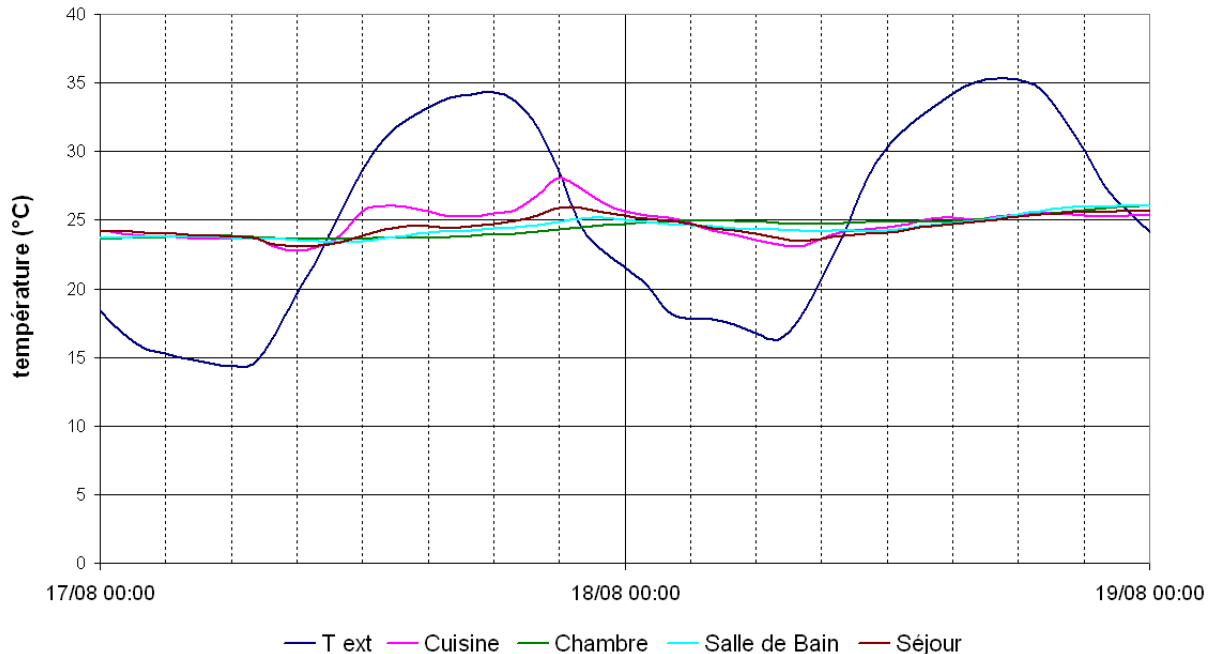


Figure 4-5 : Températures sur la journée la plus chaude (27/06/11)

Pièce	Amortissement	Déphasage
Séjour	7	4h
Cuisine	4	3h
Chambre	20	5h
Salle de bains	11	5h

Tableau 4-1 : Déphasage et amortissement pour chaque pièce

Le déphasage et l'amortissement sont calculés sur la journée la plus chaude (figure 4-5). Nous constatons un amortissement important des températures mesurées à l'étage. Cet amortissement est plus faible pour les pièces du rez-de-chaussée (tableau 4-1). La cuisine présente deux pics de températures (courbe rose) qui peuvent être liés à la cuisson (heure de repas). Les déphasages sont proches dans l'ensemble des pièces.

4.4 Le confort hygrothermique

Taux d'inconfort moyen par saison (Saint Mathurin)

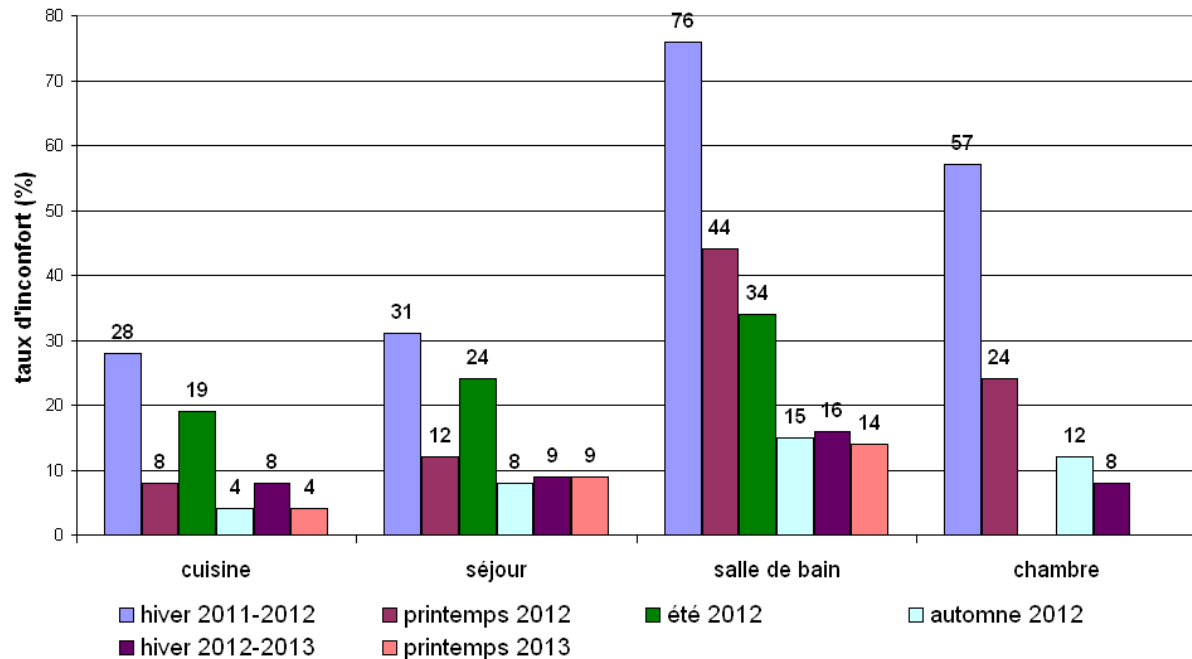


Figure 4-6 : Taux d'inconfort par pièce et par saison

La Figure 4-6 présente la synthèse des taux d'inconfort dans les différentes pièces sur les saisons de mesure. Sur les premières périodes de mesure, l'inconfort est important dans la salle de bain et la chambre. Il diminue fortement pour atteindre une valeur de confort bonne sur les trois dernières saisons de mesure. Les travaux mis en place pourraient expliquer l'amélioration du confort.

Un zoom est réalisé sur quelques points clés du bâtiment : la salle de bain et la cuisine en hiver 2011/2012, la salle de bain au printemps 2012, le séjour et la salle de bain en été.

Zone de confort Hygro thermique Saint-Mathurin, cuisine, hiver 2011-2012

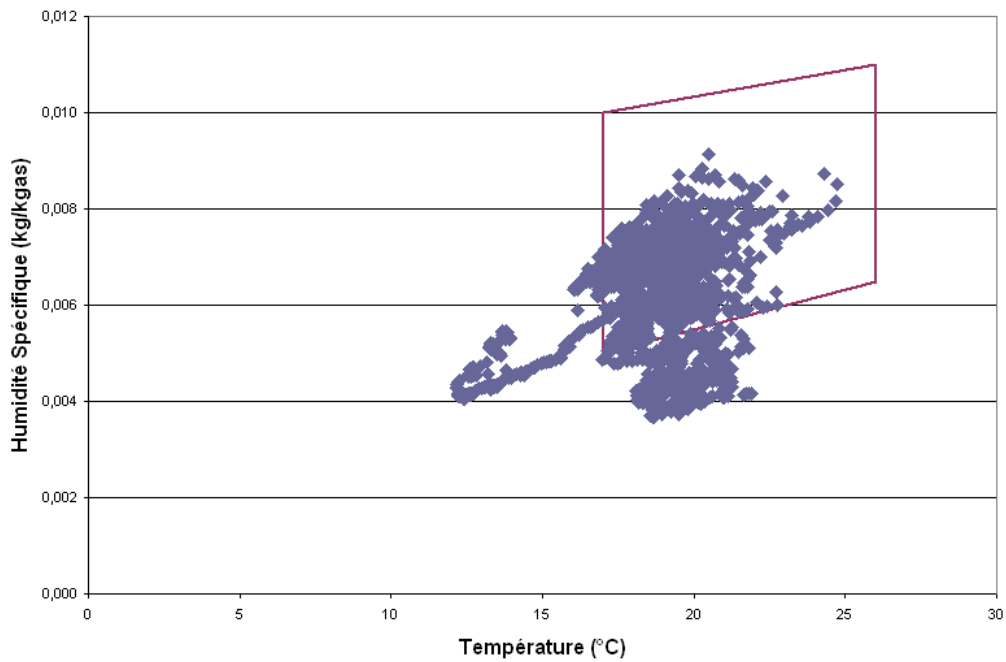


Figure 4-7 : Confort hygrothermique de la cuisine durant l'hiver 2011/2012

Pendant l'hiver 2011/2012, la cuisine a un taux d'inconfort de 38%. La Figure 4-7 met en évidence que cet inconfort est liée ponctuellement à une température intérieure froide (ouverture des fenêtres, arrêt du chauffage pour inoccupation, les causes peuvent être multiples) et principalement à une humidité trop faible. Au contraire, la salle de bain (Figure 4-8 ci-dessous) doit son fort inconfort (74%) à une température trop faible : absence de chauffage car pièce secondaire, proximité d'une fenêtre, etc. Dans cette pièce, l'ambiance n'apparaît pas aussi sèche que dans la cuisine.

Zone de confort Hygro thermique Saint-Mathurin, salle de bain, hiver 2011-2012

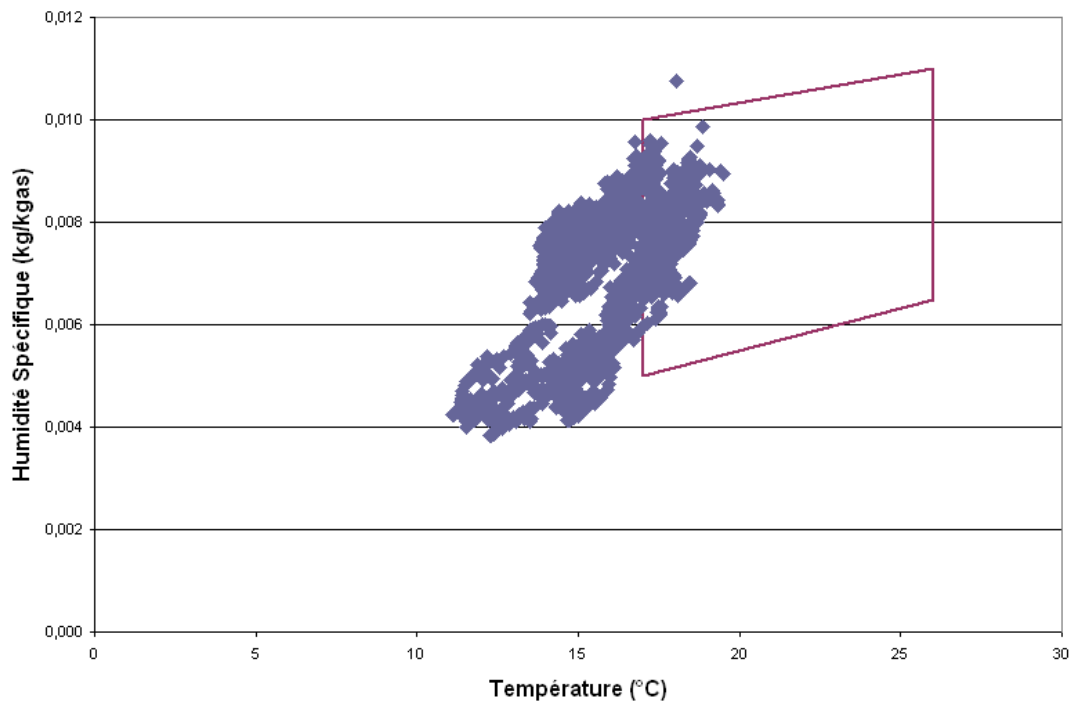


Figure 4-8 : Confort hygrothermique de la salle de bain durant l'hiver 2011/2012

Zone de confort Hygro thermique Saint-Mathurin, salle de bain, printemps 2012

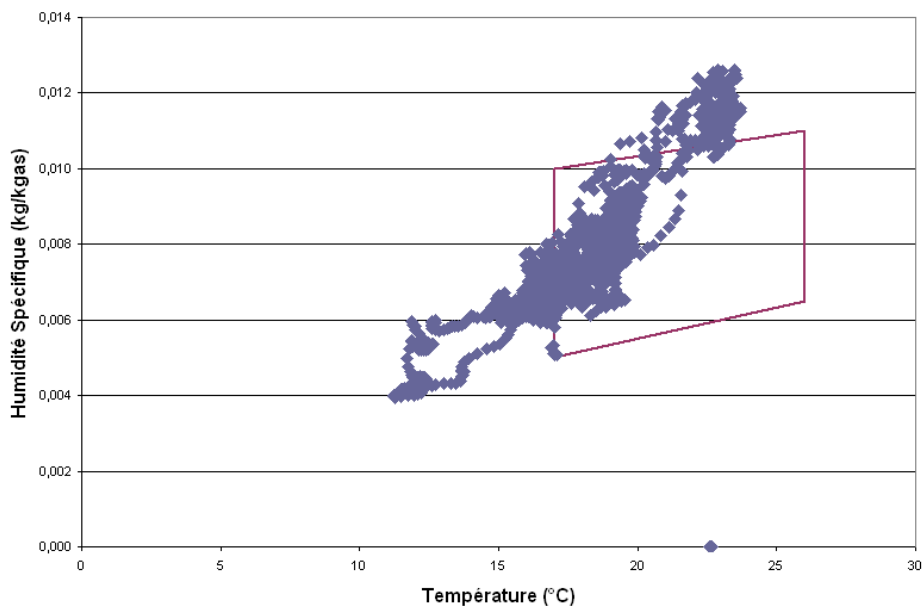


Figure 4-9 : Confort hygrothermique de la salle de bain durant le printemps 2012

Au printemps 2012, la salle de bain est la pièce la plus inconfortable. La Figure 4-9 permet de situer les sources d'inconfort : une température trop basse (jusqu'à 11°C) qui peut être liée à une absence de chauffage ou à l'ouverture des fenêtres, et une humidité trop élevée (capteur à proximité de la douche).

**Zone de confort Hygro thermique
Saint-Mathurin, séjour, été 2012**

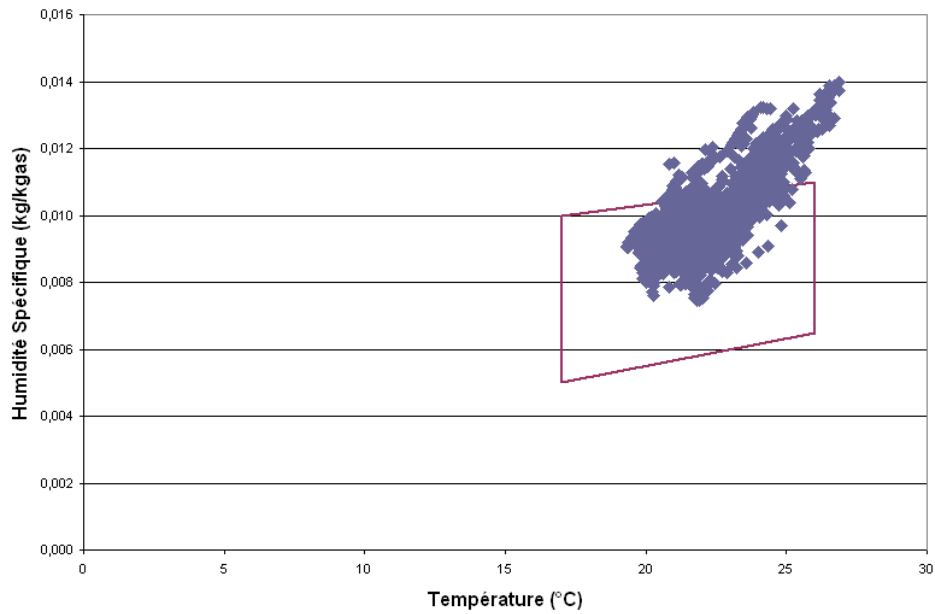


Figure 4-10 : Confort hygrothermique du séjour en été 2012

**Zone de confort Hygro thermique
Saint-Mathurin, salle de bain, été 2012**

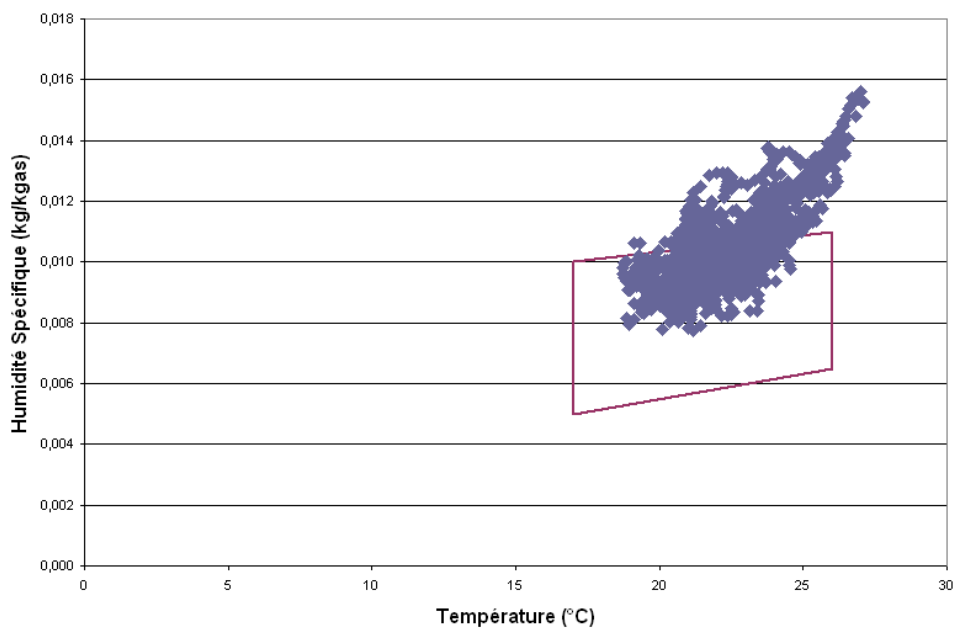


Figure 4-11 : Confort hygrothermique de la salle de bain en été 2012

En été, Les graphiques 4-10 et 4-11 mettent en évidence que l'inconfort constaté est principalement lié à une humidité trop élevée. Quelques températures sont supérieures à 26°C mais elles n'excèdent jamais les 28°C.

4.5 Consommations

Les consommations énergétiques, ou plus exactement l'énergie réellement fournie au bâtiment pour son chauffage, ont été mesurées lors de l'hiver 2012-2013.

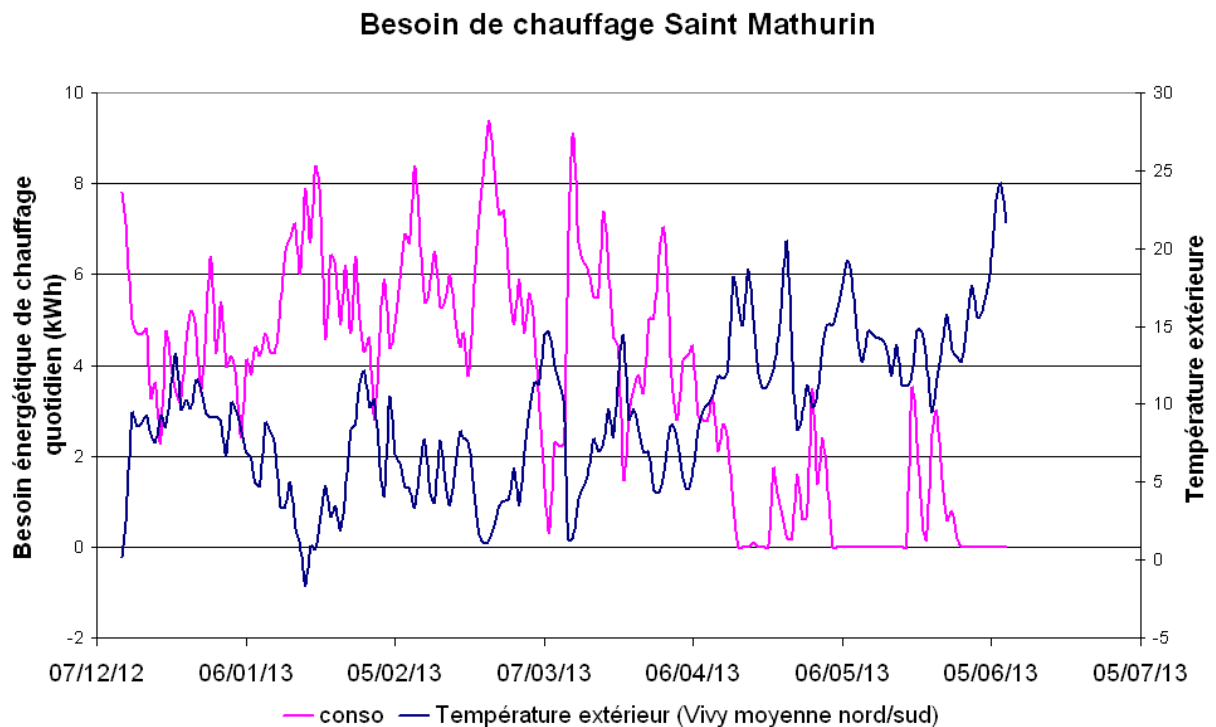


Figure 4-12 : énergie utilisée pour le chauffage

La figure 4-12 présente l'énergie mesurée chaque jour ainsi que la température extérieure mesurée. Le chauffage était déjà allumé lorsque les mesures ont commencé (le 9 décembre 2012), celui-ci a été définitivement coupé le 30 mai 2013, alors que la température extérieure moyenne sur la journée est remontée au-dessus de 15 °C). A noter que lors de la période du 4 au 19 mai 2013, la chaudière n'a pas fonctionné pour le chauffage de la maison.

La figure 4-13 présente la signature énergétique de la maison, à savoir l'énergie fournie pour le chauffage en fonction de la température extérieure. On note une bonne corrélation entre les 2 mesures. Ce graphique confirme que lorsque la température extérieure dépasse environ 15 °C, la chaudière n'a pas besoin de fonctionner.

Sur la période de mesure, nous avons relevé une énergie de chauffage de 645 kWh.

Signature énergétique Saint Mathurin

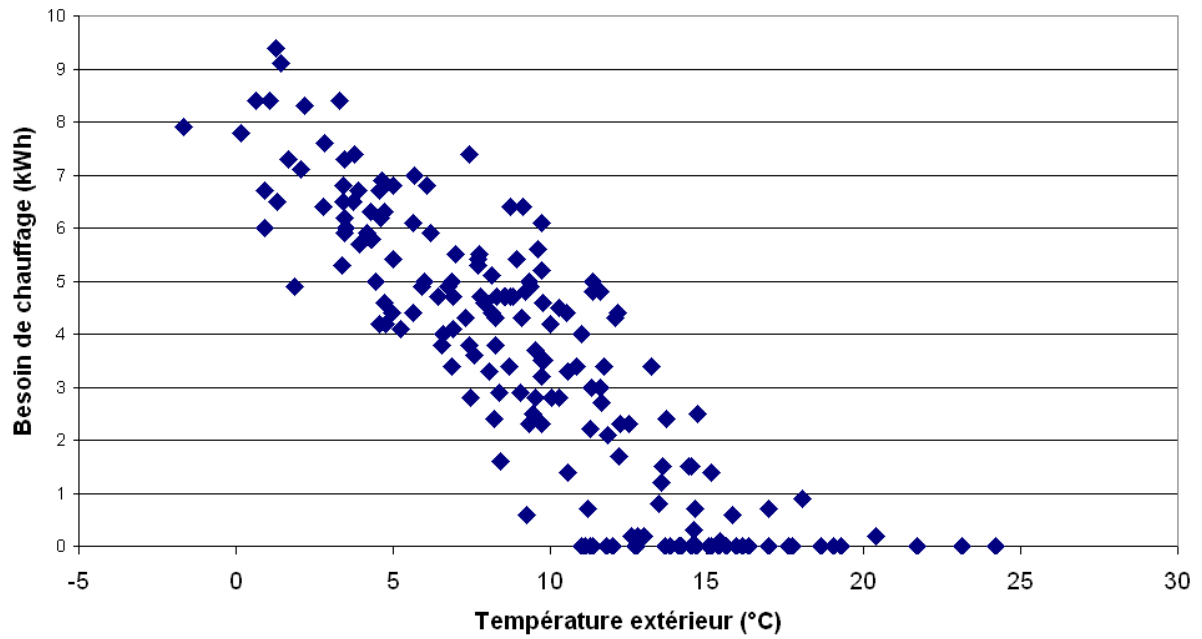


Figure 4-13 : signature énergétique

4.6 Comportement des murs

Le mur Nord va être étudié pendant un été et un hiver. Il est à noter que l'isolation par l'intérieur du mur a été réalisée à l'automne 2012.

température dans le mur nord Saint Mathurin

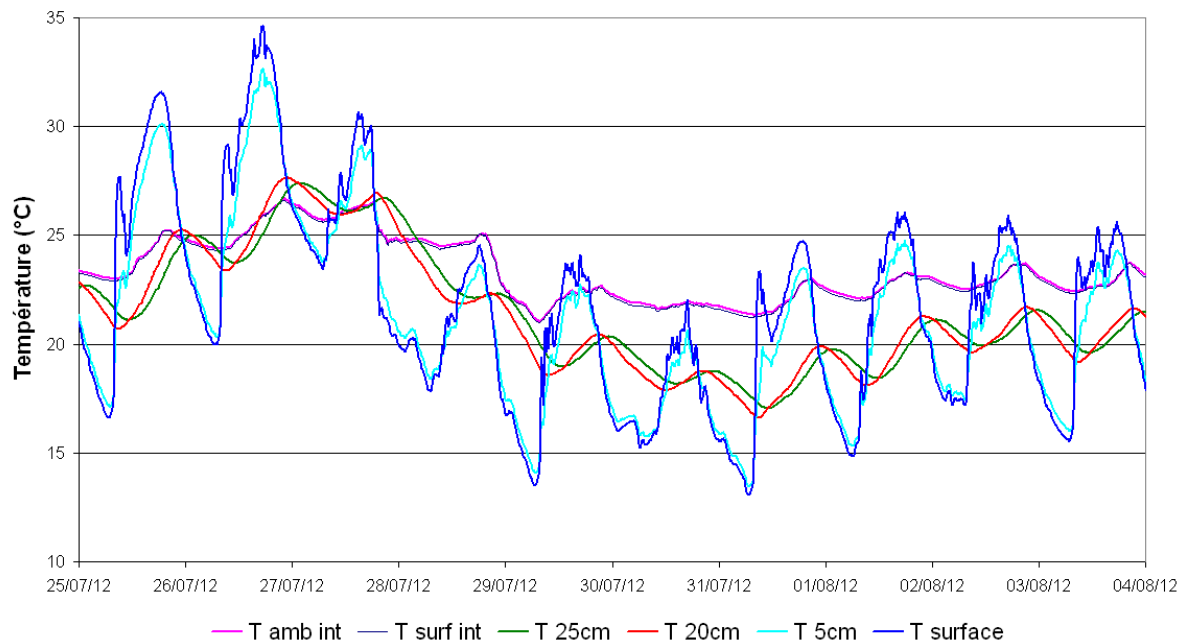


Figure 4-14 : Évolution des températures au sein du mur Nord en été 2012

La Figure 4-14 met en évidence que les températures de surface sont fortement influencés par les ambiances en contact. En effet, la température de surface intérieure est très proche de la température d'ambiance intérieure.

La température la plus proche de l'extérieure (5 cm) est corrélée à la température de surface extérieure. Les 5 cm de tuffeau permettent une légère atténuation des variations de la température et un faible déphasage entre les deux températures.

Les températures mesurées à 20 et 25 cm de profondeur présentent une dynamique similaire. Le déphasage est plus marqué sur ces 5 cm que sur les premiers. Un faible amortissement est aussi observé.

L'amortissement et le déphasage constatés entre les 5 premiers centimètres de tuffeau et les 5 derniers traduisent la diffusion de la chaleur dans le matériau.

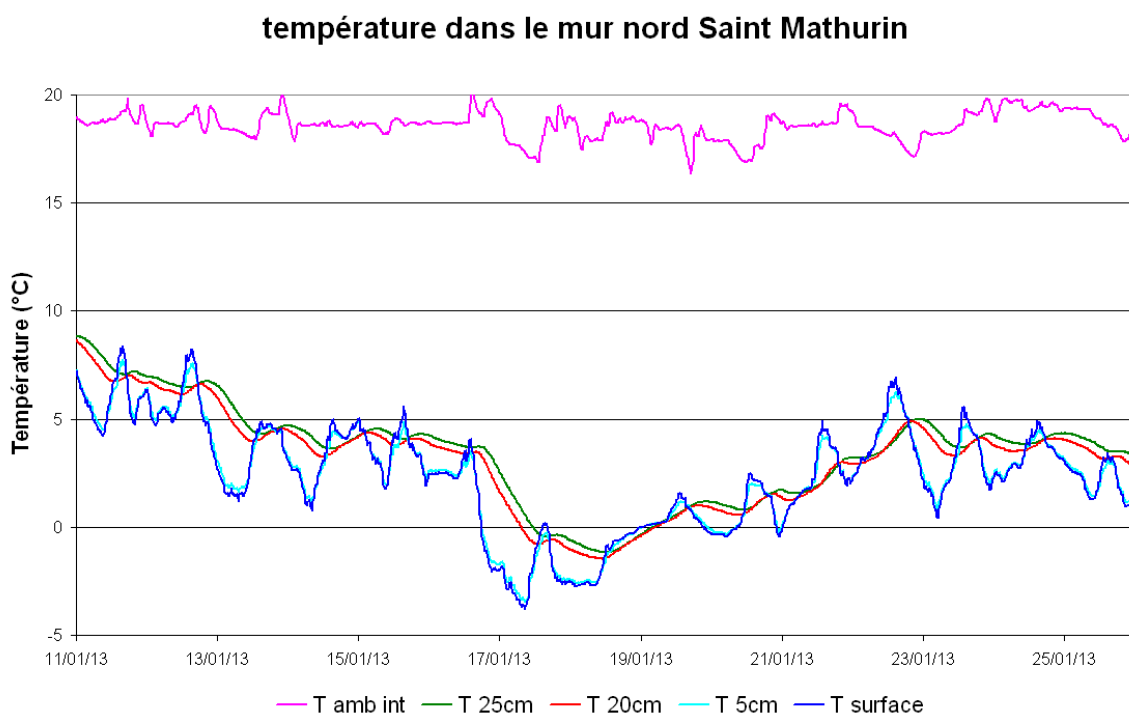


Figure 4-15 : Évolution des températures au sein du mur Nord en hiver 2012/2013

En hiver, les températures au sein de la paroi s'atténuent et se déphasent avec l'épaisseur du mur, comme en été. Cependant, une nette différence de comportement entre l'ambiance et le mur est observée sur la Figure 4-15. Le mur est nettement plus froid que l'ambiance intérieure. Ce constat s'explique par l'isolant intérieur qui a été installé en automne. Il met un frein à la diffusion de la chaleur et le mur n'est donc pas influencé par la température intérieure.

Humidité spécifique dans le mur nord St Mathurin

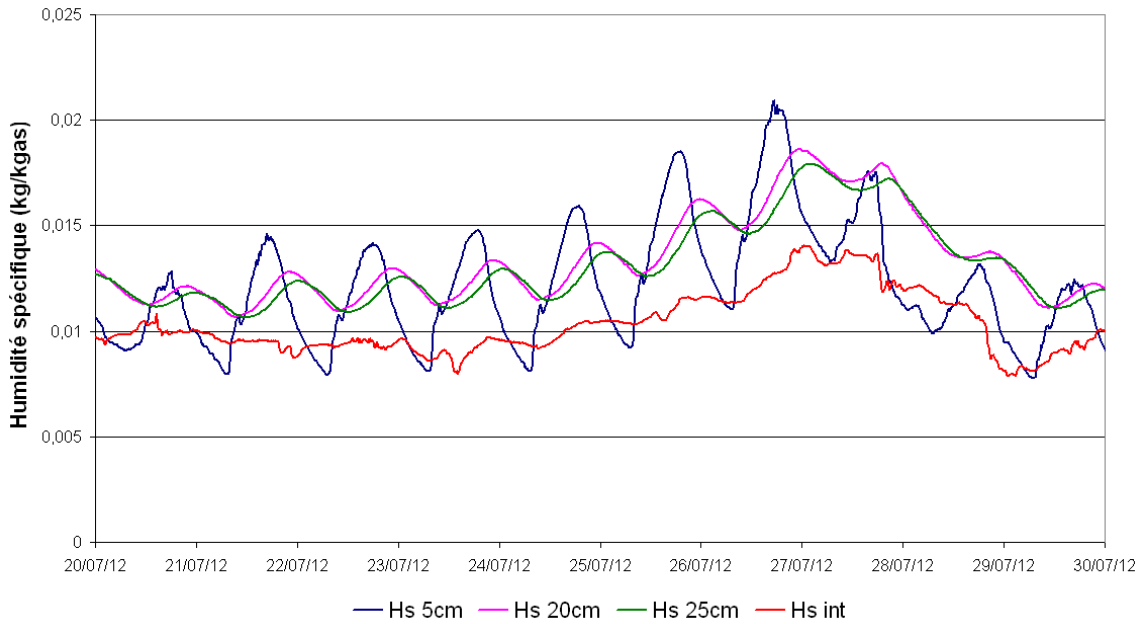


Figure 4-16 : Évolution des humidités spécifiques au sein du mur Nord en été 2012

La variation d'humidité spécifique en été (figure 4-16) est atténuée et amortie avec l'épaisseur de tuffeau. Par ailleurs, les dynamiques d'évolution de l'humidité spécifique dans l'air ambiant intérieur et dans le mur sont liées. En été, le mur est plus humide que l'ambiance intérieure.

Humidité spécifique dans le mur nord St Mathurin

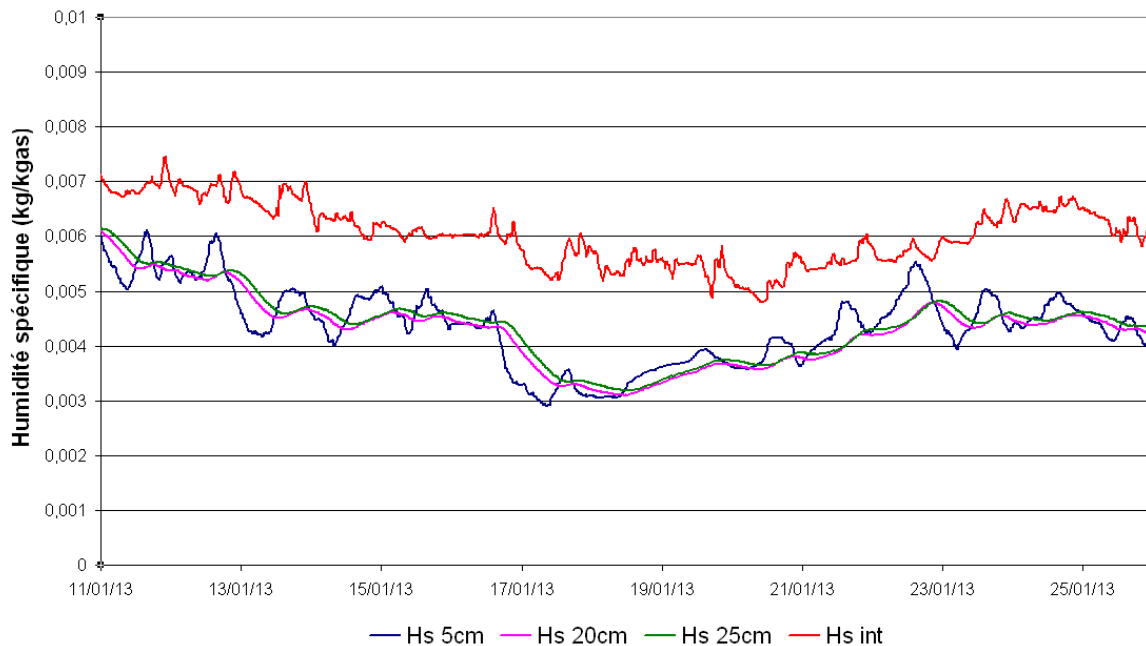


Figure 4-17 : Évolution des humidités spécifiques au sein du mur Nord en hiver 2012/2013

Au contraire en hiver, l'ambiance intérieure est plus humide que le mur (figure 4-17).

5 Conclusions

Le suivi de ce bâtiment a été effectué pendant les travaux. Nous avons donc pu mettre en évidence le rôle de la réhabilitation dans l'amélioration du confort.

Cette étude illustre également, grâce aux mesures au sein des parois, le rôle du tuffeau dans l'inertie : le déphasage et l'amortissement augmente avec l'épaisseur. Ce constat est également vrai pour l'humidité.