

DREAL

Pays de la Loire

Réhabilitation énergétique des bâtiments en tuffeau

service
intermodalité
aménagement
logement

Loire Anjou Touraine

Janvier 2014

ANALYSES
ET CONNAISSANCE

Collection

n° 100



RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

PRÉFET
DE LA RÉGION
PAYS DE LA LOIRE

 **Cerema**

Direction territoriale Ouest

direction régionale de l'environnement, de l'aménagement
et du logement Pays de la Loire

Maîtrise d'ouvrage

DREAL Pays de la Loire – Service Intermodalité Aménagement Logement

Maîtrise d'œuvre

CEREMA – DTer Ouest - DLRCA Angers

Rédacteurs

Emma STEPHAN - CEREMA – DTer Ouest – DLRCA

Antoine CAUCHETEUX CEREMA – DTer Ouest - DLRCA

Rellecteurs

Louis BOURRU – DREAL Pays de la Loire

Durée de l'étude : janvier 2011 – novembre 2013

Table des matières

1 Préambule.....	4
2 Introduction.....	5
3 État de l'art.....	7
4 Les campagnes d'instrumentation.....	29
5 Résultats des mesures.....	35
6 Conclusion.....	48
7 Bibliographie.....	49
8 Annexes : description des sites instrumentés.....	50
9 Cahiers annexes.....	56

1 Préambule

En France, 10 millions de logements ont été construits avant 1948. Le patrimoine bâti ancien est, aujourd'hui plus que jamais, à la croisée de nombreux enjeux du XXI^e siècle dans le domaine de la construction, à savoir :

– La réhabilitation énergétique : le plan de rénovation énergétique de l'habitat lancé en mars 2013 par le président de la république vise à réhabiliter 500 000 logements par an à l'horizon 2017. Les bâtiments d'avant 1948 représentent un tiers du parc de logements français et nécessitent une attention de chaque instant pour qui envisage de les réhabiliter. Il faut en effet préserver leur qualité architecturale et l'équilibre thermique séculaire de leurs murs en pierre, en terre ou en bois.

– L'utilisation des ressources locales pour construire et réhabiliter les bâtiments. En effet, les matériaux biosourcés tels que le chanvre, la fibre de bois, le lin... semblent constituer des solutions intéressantes pour isoler avec respect les parois les plus fragiles, en lien avec la terre et la chaux utilisées depuis toujours pour bâtir les murs anciens.

– L'implication et la formation de tous les professionnels de la construction, sur des projets de réhabilitation qui demandent un réel savoir faire et une compréhension globale des phénomènes à l'œuvre sur des bâtiments à chaque fois uniques. Le chantier de la rénovation du bâti ancien offre un potentiel important d'emplois non délocalisables dans le secteur du bâtiment, accessibles aux PME.

C'est ainsi qu'en 2010 le CETE, la DREAL et le Parc Naturel Régional Loire-Anjou-Touraine ont souhaité réunir autour d'une même table des artisans, architectes, ingénieurs, et amoureux du patrimoine, pour réfléchir ensemble aux meilleures solutions pour réhabiliter les bâtiments anciens en tuffeau. Le tuffeau est une pierre calcaire très tendre, trésor foisonnant de l'Anjou et de la Touraine, qui fait la beauté des monuments comme des maisons les plus modestes. Mais c'est aussi une pierre fragile qui demande à être comprise et étudiée dans son contexte afin de proposer des réhabilitations respectueuses et adaptées à chaque cas de bâtiment. C'est l'objet de cette étude, menée de 2010 à 2013 sur un panel de bâtiments sélectionnés sur tout le territoire du parc.

Pour que le paysage de demain se dessine dans le respect du patrimoine ancien.

La DREAL remercie l'ensemble des acteurs qui ont contribué à la réalisation de ce document et plus particulièrement les personnes présentes aux groupes de travail.

2 Introduction

2.1 Contexte

Les préoccupations environnementales actuelles conduisent à une recherche d'amélioration des performances énergétiques des bâtiments. Les réglementations thermiques successives adoptées depuis 1975 permettent de réduire progressivement les consommations énergétiques des bâtiments neufs. Or, le parc immobilier existant n'est constitué que pour un tiers de logements construits après 1975. Les logements construits entre 1948 et 1975 en représentent un second tiers et le dernier tiers est constitué de logements construits avant 1948 qui seront qualifiés de bâtiments anciens.

Depuis 2007, la France s'est dotée d'une réglementation thermique à respecter en cas de réhabilitation de bâtiments existants, conformément à la directive européenne 2002/91/CE. Mais le bâti d'avant 1948 n'y est pas systématiquement soumis en raison de son caractère patrimonial.

Le patrimoine bâti français possède une grande variété de bâtiments, chaque région a ses spécificités et les bâtiments anciens ont un fonctionnement physique souvent méconnu. Ces derniers ne sont pas conçus pour accueillir une isolation standard, souvent porteuse de nouveaux désordres. Leur comportement hygrothermique n'est pas régi par les mêmes lois que les bâtiments récents.

La prise de conscience des différences entre bâtiments modernes et bâtiments anciens n'est pas récente. Une édition du Moniteur de 1979 intitulée « L'inertie, facteur d'économie de chauffage » (Bernard 79) constatait que les bâtiments neufs de l'époque consommaient souvent plus de chauffage que les bâtiments anciens en pierre et terre. Il mettait en évidence les phénomènes d'inertie, avec à la fois une composante calorifique et une composante latente due aux changements de phase de l'eau dans les murs, entre condensation et évaporation. La régulation par l'inertie des chutes de température en hiver permettait de consommer moins que les bâtiments neufs de l'époque dont le système constructif était encore peu performant en termes d'économies d'énergies.

De 2004 à 2007, une étude commandée par la DGUHC (Direction Générale de l'Urbanisme, de l'Habitat et de la Construction) aujourd'hui DGALN (Direction Générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature), appelée « Connaissance des bâtiments anciens et économies d'énergie¹ » a traité du comportement thermique du patrimoine bâti ancien et sa prise en compte par les méthodes de calcul actuelles. Un panel de logements représentatifs des modes de construction traditionnels, sans modifications importantes effectuées, ont été suivis et instrumentés pour connaître leurs comportements hygrothermiques et leurs consommations énergétiques.

¹ <http://www.cete-est.developpement-durable.gouv.fr/productions-a-telecharger-r1521.html>

2.2 Objectifs de l'action tuffeau

Parmi les systèmes constructifs anciens, les roches calcaires constituent l'essentiel des pierres à bâtir en France. En régions Pays de la Loire et Centre, le tuffeau est omniprésent dans l'habitat et est la pierre emblématique des châteaux de la Loire. Les professionnels du bâtiment sont démunis face à la question de son isolation. En effet, des réaménagements inadaptés (calqués sur les techniques conventionnelles récentes) provoquent régulièrement des pertes de qualités intrinsèques des bâtiments (confort d'été, régulation d'humidité) et engendrent des pathologies ou des désordres.

De nouvelles solutions voient le jour, s'inspirant de techniques utilisées autrefois et adaptées au bâti moderne mais leurs performances et leur durabilité doivent être évaluées (enduit minéral fibré, torchis, laines végétales, etc.)

C'est à la suite d'une étude relative à la gestion énergétique du site emblématique de l'abbaye de Fontevraud qu'a été créé un groupe de travail sur cet thème en 2010.

Confronté à de nombreuses contre-expériences lors de réhabilitations énergétiques de bâtiments en tuffeau, ce groupe de travail, composé de partenaires institutionnels (CAUE, SDAP, ADEME, PNRLAT²), de laboratoires de recherche (CTMNC, IUT de St-Nazaire, CETE de l'Ouest et CETE de l'Est³), d'artisans, de syndicats professionnels, d'architectes, de bureaux d'études et de l'association Maison Paysanne de Touraine, a insisté sur la nécessité de mener des expérimentations et des travaux de recherche sur ce thème.

L'objectif est d'identifier et de diffuser des solutions de réhabilitation des bâtiments en tuffeau à la fois énergétiquement efficaces, économiquement viables, techniquement durables et architecturalement acceptables.

Pour répondre à ces objectifs, l'étude s'est décomposée en plusieurs phases. En 2010/2011, un état des lieux du patrimoine ancien avec un zoom sur le tuffeau a été réalisé, au travers de visites de bâtiments existants. Ensuite, un examen plus poussé du comportement hygrothermique de ces bâtiments a été mis en place avec des instrumentations de bâtiments en tuffeau réhabilités et non réhabilités courant 2011/2012. Une synthèse des résultats mesurés et des données recueillies a été finalisée en 2013.

² CAUE : Conseil d'Architecture, d'Urbanisme et de l'Environnement – SDAP : Service Départemental de l'Architecture et du Patrimoine – ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie – PNRLAT : Parc Naturel Régional Loire Anjou Touraine

³ CTMNC : Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction – CETE : Centre d'Étude Technique de l'Équipement

3 État de l'art

3.1 Le patrimoine bâti ancien

3.1.1 Définition

La notion de bâti ancien n'est pas clairement définie et source de confusion car basée sur une appréciation personnelle. La construction française peut être séparée en deux périodes : avant et après la première réglementation thermique en 1975. Cette distinction met en jeu les performances énergétiques nettement meilleures pour le patrimoine postérieur à 1975 (328 kWh_{ep}/m².an pour le patrimoine d'avant 1975 contre 90 kWh_{ep}/m².an pour le patrimoine plus récent (Cantin et al., 2010)).

Cependant, les différences constructives observées dans le patrimoine antérieur à 1975 obligent à scinder ce parc. Au niveau historique, la seconde guerre mondiale a marqué un tournant dans l'architecture en mettant en œuvre une construction industrialisée et de masse pour répondre à la demande croissante de logements. Avant cette période, les constructions ont une architecture locale basée sur un héritage culturel soumis aux matériaux à disposition et aux conditions climatiques.

L'association Maisons Paysannes de France, le CETE de l'Est et la DGHUC définissent alors le bâti ancien de la manière suivante : « Bâti généralement conçu avant le début du 20^{ème} siècle et l'émergence en architecture du mouvement moderne (<1950). Il se caractérise notamment par l'emploi de techniques constructives et de matériaux non-industrialisés, subordonnés à un contexte local. » (DGHUC, 2007). L'année 1948 sert de frontière à cette distinction.

Le patrimoine ancien représente un tiers du parc immobilier français soit près de 10 millions de logements. La pré-étude du projet BATAN (BÂTiments Anciens) mis en place par le LGCB⁴, le CETE de l'Est et Maisons Paysannes de France a, dans un premier temps, étudié les consommations de 10 logements anciens (DGHUC, 2007). Le rapport *Connaissance des bâtiments anciens et économies d'énergies* qui en est issu a mis en évidence que les consommations de ce patrimoine sont meilleures que pour le parc compris entre 1948 et 1975.

Année de construction	Avant 1948	Entre 1948 et 1975	Après 1975
Consommations énergétiques en kWh _{ep} /m ² .an (chauffage + ECS)	< 167	En moyenne 364	En moyenne 90

Pour autant, elles restent éloignées des consommations demandées par les nouvelles réglementations (50 kWh_{ep}/m².an pour la RT2012) et présentent un potentiel d'économies d'énergie intéressant.

⁴ Laboratoire Génie Civil et Bâtiment

3.1.2 Comportement thermique

3.1.2.1 Généralités

Le patrimoine ancien possède des caractéristiques différentes des bâtiments modernes. Il a donc un comportement thermique particulier. Pour étudier les spécificités de ce patrimoine, nous nous basons sur les principes de la systémique (Cantin et al., 2010) qui permettent de mieux saisir les interactions à l'œuvre dans le bâti ancien. Un bâtiment ancien est donc découpé en systèmes (Extérieur, Structure et Intérieur) et sous systèmes.

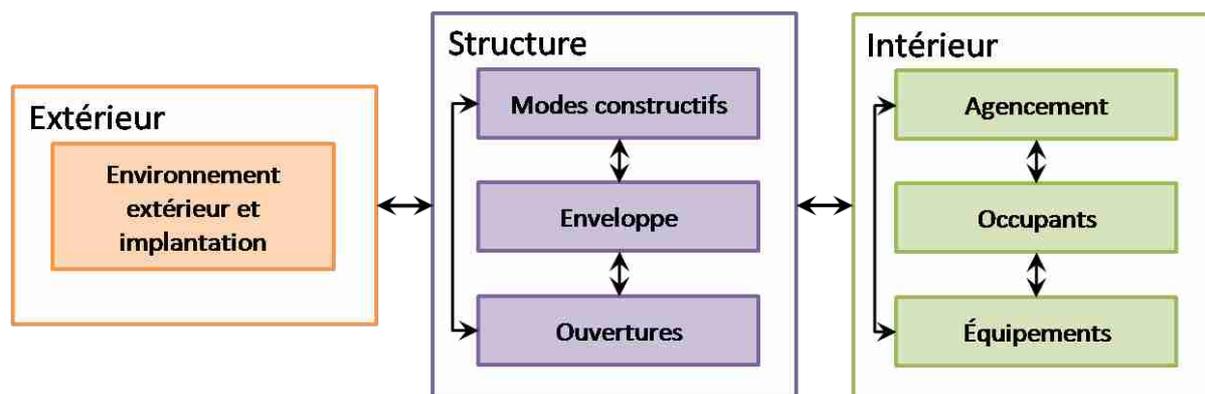


Figure 2-1 : Schéma systémique du bâti ancien

Chaque système a des caractéristiques propres qui influent sur le comportement global du bâtiment. Elles ont été étudiées dans plusieurs projets dont BATAN⁵. Elles sont synthétisées dans le tableau suivant.

Systèmes	Sous-systèmes	Caractéristiques
Extérieur	Environnement et implantation	Optimisation des apports solaires Protection aux vents dominants Prise en compte du climat local, du relief et de la végétation
Structure	Modes constructifs	Lien avec l'héritage culturel qui entraîne une forte hétérogénéité sur le territoire national Réduction des surfaces déperditives Structure lourde pour la majorité des constructions sur un principe parement/remplissage/parement
	Enveloppe	Variation suivant la région et les matériaux disponibles Hétérogénéité des parois dans un même bâtiment (réduction de l'épaisseur suivant les étages, etc.) Perméabilité et sensibilité à l'humidité des matériaux Méconnaissance des caractéristiques hygrothermiques des matériaux Forte inertie thermique
	Ouvertures	Présence rare Placement transversal pour la ventilation Adaptation de la taille à l'orientation (faible au Nord, plus importante au Sud) Simple vitrage avec mauvaise étanchéité

⁵ <http://www.cete-est.developpement-durable.gouv.fr/productions-a-telecharger-r1521.html>

Intérieur	Organisation de l'espace intérieur	Place d'une pièce liée à son utilisation → pièces de vie au Sud, Sud/Est et pièces de services (pièces tampons) au Nord, Nord/Ouest.
	Occupants	Gestion thermique adaptée par connaissance du comportement du bâtiment
	Équipements	Pas de système de climatisation Ventilation naturelle Faible rendement des équipements vieillissants souvent complétés par de l'appoint (cheminées, poêle, etc.)

Nous allons maintenant détailler certains points qui nous intéressent plus particulièrement dans le cadre du patrimoine en pierre de tuffeau.

3.1.2.2 Une utilisation de matériaux locaux

Les bâtiments anciens sont construits avec des matériaux facilement accessibles : le bois quand des forêts sont présentes à proximité ou les pierres qui affleurent en surface. La carte suivante présente les différents types de pierres affleurant en surface en France.

Les bassins sédimentaires sont représentés en vert et jaune sur la carte. Ils constituent la majeure partie du calcaire extrait. La pierre calcaire est utilisée dans les régions à proximité de ces bassins (Graulière, 2006).

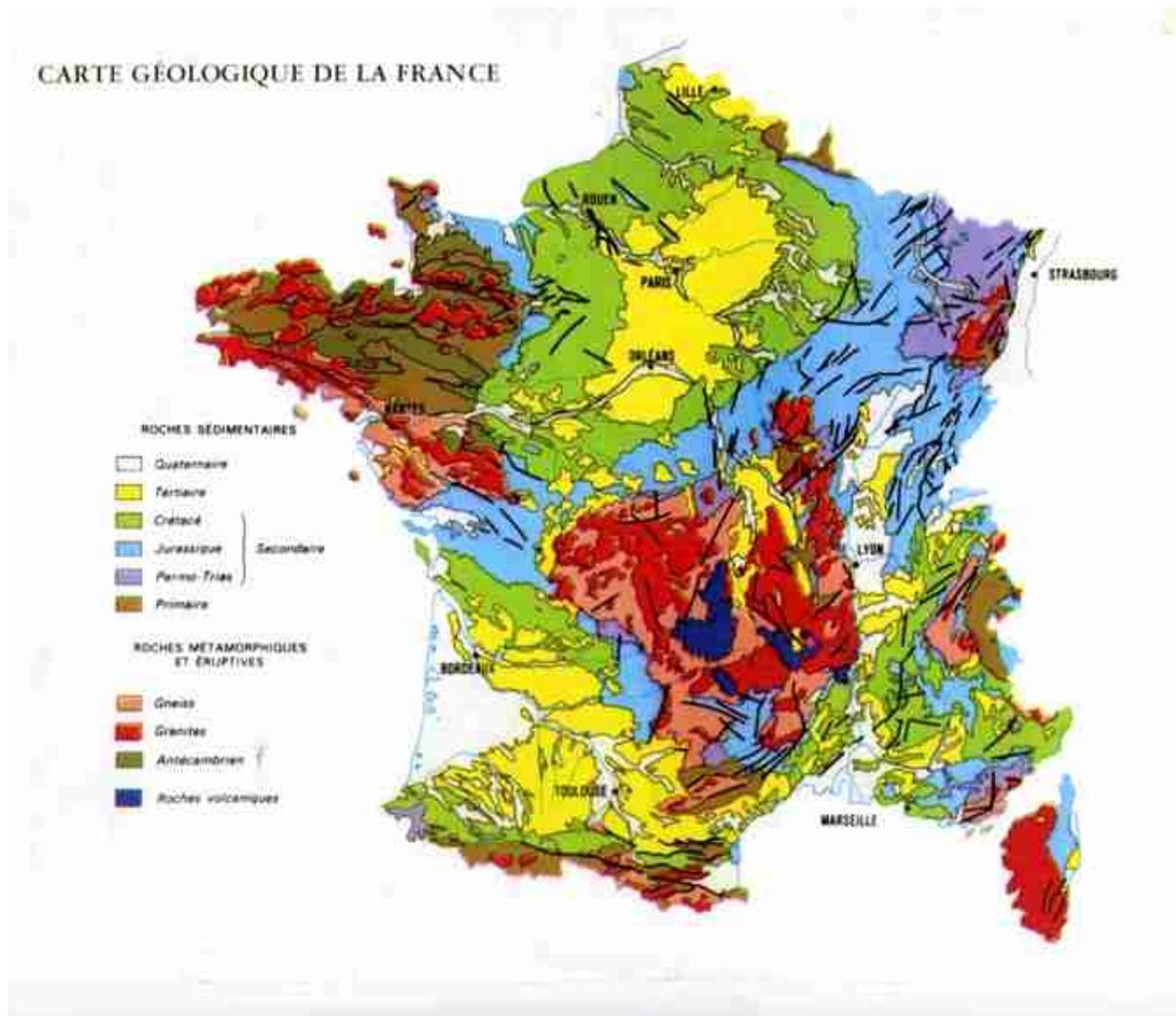


Figure 2-2 : Carte géologique (Source : BRGM)

3.1.2.3 Une ambiance jugée confortable

Le panel de bâtiments anciens observés lors de l'étude de la DGHUC (DGHUC, 2007) est jugé satisfaisant par les occupants en terme de confort thermique d'hiver et d'été. Les températures moyennes intérieures mesurées en période hivernale sont supérieures à 19°C. Les consommations énergétiques en chauffage et eau chaude sanitaire sont toutes inférieures à 230 kWh_{ep}/m².an.

Le confort thermique d'été vient à la fois de la réduction des apports solaires en journée et du rafraîchissement passif nocturne. Des masques solaires peuvent être présents sur les façades exposées, le nombre de surfaces vitrées est relativement faible, le mode constructif permet une ventilation naturelle par tirage thermique, et enfin l'inertie est lourde du fait de l'utilisation de pierres de grosse épaisseur pour les refends, les façades et les planchers bas.

Le confort est généralement appréhendé par la température de l'air ambiant, cependant d'autres paramètres doivent être pris en compte. La température de surface des parois ainsi que l'humidité relative intérieure jouent un rôle sur la sensation qu'auront les occupants. De ce fait, certaines valeurs sont admises par les sciences de l'habitat, pour définir un certain confort pour assurer un certain confort :

- L'écart de température entre la surface des parois et l'air ambiant ne doit pas excéder 5°C.
- La variation de température avec la hauteur ne doit pas dépasser 1°C par mètre.
- La température de confort admise dépend de l'humidité relative, des valeurs constantes sont une première approximation (T_{air} proche de 20°C pour une humidité relative comprise entre 40 et 60%, T_{air} aux alentours de 25°C si T_{ext} est inférieure à 30°C et $T_{\text{air}}=T_{\text{ext}}-5^{\circ}\text{C}$ si T_{ext} est supérieure à 30°C).

Toutefois, pour être plus précis une zone de confort thermique est établie sur le diagramme de l'air humide qui prend en compte la température et l'humidité relative comme la Figure 2-3 le montre.

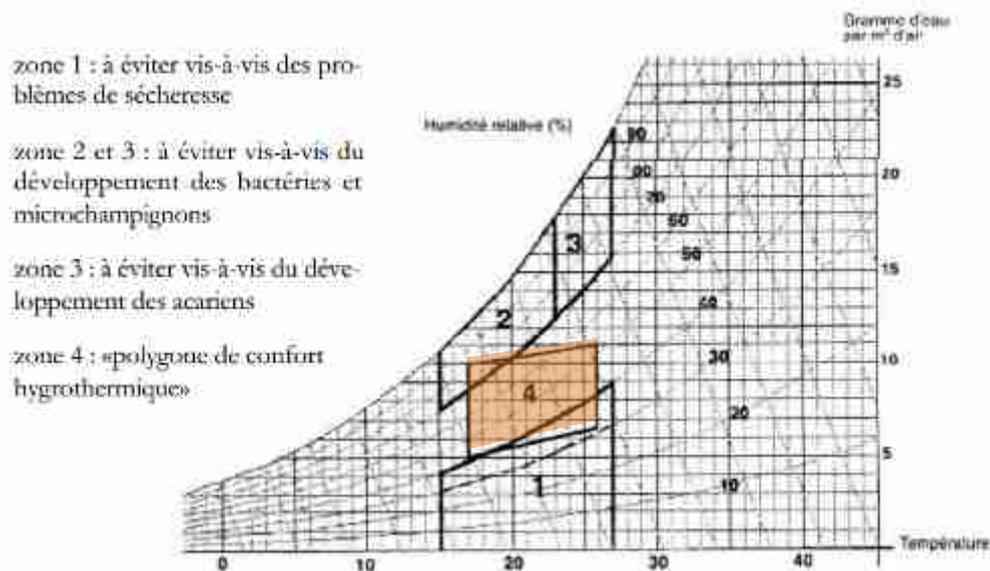


Figure 2-3: Zone de confort thermique (Source : Mémento technique du bâtiment, Certu, CETE de Lyon)

Le diagramme de l'air humide précédant nous donne une zone de confort en fonction de la température de l'air et de la teneur en eau (zone 4). Nous nous intéresserons par la suite au pourcentage de temps où les grandeurs mesurées dans les pièces sont hors de cette zone ce qui nous permettra de conclure si la pièce est confortable ou non.

3.1.2.4 Une forte inertie thermique

L'inertie thermique est un phénomène complexe dans le cadre d'un bâtiment. On peut distinguer deux échelles d'effet : échelle paroi (rôle des matériaux) et échelle bâtiment (ambiance). Elle intervient lorsqu'il y a une variation des sollicitations. Dans le cas des bâtiments, la sollicitation correspond aux conditions extérieures (température et rayonnement solaire).

Elle est observable à l'échelle du bâtiment par les deux effets suivants :

- Déphasage temporel de l'effet de la sollicitation
- Amortissement du signal par stockage de l'énergie dans le matériau

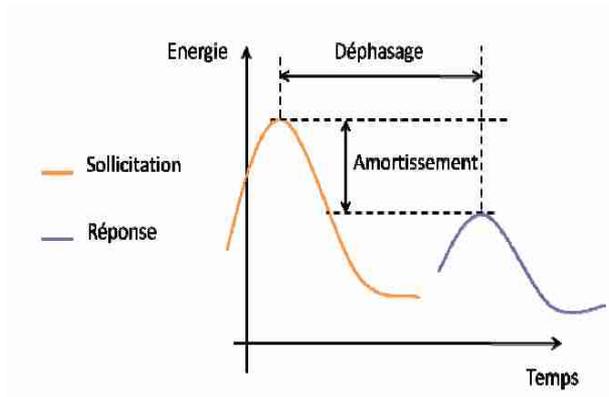


Figure 2-4 : Définition du déphasage et de l'amortissement entre une sollicitation et une réponse

Le phénomène, dans une paroi, peut être décrit de la manière suivante sur une journée où l'extérieur est plus chaud que l'intérieur (été par exemple).

<p>Diagramme montrant une paroi avec des températures extérieures (T_{ext}) et intérieures (T_{int}) égales.</p>		<p>a. Etat initial : les températures extérieure et intérieure sont égales, il n'y a pas de flux de chaleur dans la paroi.</p>
<p>Diagramme montrant une paroi avec une température extérieure (T_{ext}) plus élevée que la température intérieure (T_{int}). Un flux de chaleur (flèche rouge) s'installe de l'extérieur vers l'intérieur.</p>		<p>b. Matinée : La température extérieure augmente et la paroi bénéficie du rayonnement solaire. Un flux de chaleur s'installe de l'extérieur vers l'intérieur et commence à réchauffer l'intérieur.</p>
<p>Diagramme montrant une paroi avec la température extérieure (T_{ext}) atteignant son maximum. Le flux de chaleur (flèche rouge) se poursuit de l'extérieur vers l'intérieur.</p>		<p>c. Midi : Aux alentours de midi, la température extérieure atteint son maximum. Le flux de chaleur se poursuit de l'extérieur vers l'intérieur. La température intérieure augmente légèrement.</p>
<p>Diagramme montrant une paroi avec la température extérieure (T_{ext}) en baisse. Deux flux de chaleur (flèches rouges) se constituent, un vers l'extérieur et l'autre vers l'intérieur.</p>		<p>d. Après-midi : La température extérieure diminue, la température maximum se situe à l'intérieur de la paroi. Deux flux de chaleur se constituent, un vers l'extérieur et l'autre vers l'intérieur. La paroi libère la chaleur accumulée au cours de la journée.</p>
<p>Diagramme montrant une paroi avec la température extérieure (T_{ext}) en baisse. Deux flux de chaleur (flèches rouges) se constituent, un vers l'extérieur et l'autre vers l'intérieur.</p>		<p>e. Soirée : De la même manière qu'au cours de l'après-midi, la température extérieure baisse et le maximum de température se situe dans la paroi qui déstocke l'énergie accumulée vers l'intérieur et vers l'extérieur.</p>

L'inertie thermique à l'échelle de la paroi est caractérisée par les matériaux qui la composent au travers de deux paramètres. Le premier : l'effusivité qualifie la capacité du matériau à stocker de l'énergie ; et le second : la diffusivité exprime la vitesse avec laquelle l'onde de chaleur va se propager dans le matériau.

$$\begin{aligned} \blacksquare \quad & eff = \sqrt{\rho\lambda C} \text{ en } J.K^{-1}.m^{-2}.s^{-\frac{1}{2}} \\ \blacksquare \quad & diff = \frac{\lambda}{\rho C} \text{ en } m.s^{-1} \\ \blacksquare \end{aligned}$$

Avec λ la conductivité thermique du matériau en W/m.K
 ρ la masse volumique du matériau en kg/m³
C la capacité thermique massique en J/kg.K

L'inertie thermique est un phénomène passif qui permet d'assurer des températures intérieures confortables et des variations de cette température relativement faibles en été. Elle permet ainsi de réduire les consommations de climatisation lorsque cet équipement est installé ou de diminuer les sensations d'inconfort.

Toutefois, une réhabilitation peut impacter l'inertie. Il est donc nécessaire de connaître au préalable son importance dans un local pour déterminer quelle place elle devra avoir pendant la phase de réflexion sur la réhabilitation.

3.2 Le patrimoine bâti en tuffeau

3.2.1 Un zoom sur la pierre de tuffeau

3.2.1.1 Quelques généralités

Le tuffeau est une roche sédimentaire dont l'origine se situe entre -91 et -88 millions d'années par rapport au temps présent (Crétacé supérieur).

Le nom « Tuffeau » qui provient de *tofus* en grec qui veut dire poreux est donné à des pierres aux faciès très différents. Trois faciès principaux sont distingués :

- Le tuffeau blanc est le calcaire utilisé pour les monuments emblématiques car il s'agit du faciès au grain le plus fin et de meilleure qualité ;
- Le tuffeau jaune est plus grossier et plus sableux que le précédent. Il a une porosité plus importante que le tuffeau blanc ;
- Le tuffeau gris est le faciès de moins bonne qualité, il est plus sensible aux gels que les deux autres faciès.

Dans la RT2005 (Règles TH-U), les pierres calcaires sont classées en 6 classes en fonction de leur masse volumique sèche.

Classes	Masse volumique sèche (kg/m ³)
Marbres	2600 ≤ ρ ≤ 2800
Pierres froides ou extra-dures	2200 ≤ ρ ≤ 2590
Pierres dures	2000 ≤ ρ ≤ 2190
Pierres fermes, demi-fermes	1800 ≤ ρ ≤ 1990
Pierres tendres n°2 et 3	1600 ≤ ρ ≤ 1790
Pierres très tendres	ρ ≤ 1590

Le tuffeau a une porosité⁶ importante. Elle est comprise en moyenne entre 35 et 45% mais peut atteindre 55%. Ceci implique une faible masse volumique : de l'ordre de 1400 kg/m³. Le tuffeau se place donc la classe des pierres calcaires très tendres d'après la RT2005.

3.2.1.2 Les propriétés hygrothermiques du tuffeau

3.2.1.2.1 Les propriétés hygriques

L'hygroscopicité du tuffeau

La courbe de sorption d'un matériau est l'évolution de la teneur en eau (en %) dans le matériau en fonction de l'humidité relative de l'ambiance dans lequel il est placé. K. Beck (Beck, 2007) a réalisé ces mesures sur un tuffeau extrait de Saint-Cyr-en-Bourg. La Figure 2-5 présente les résultats de ces essais.

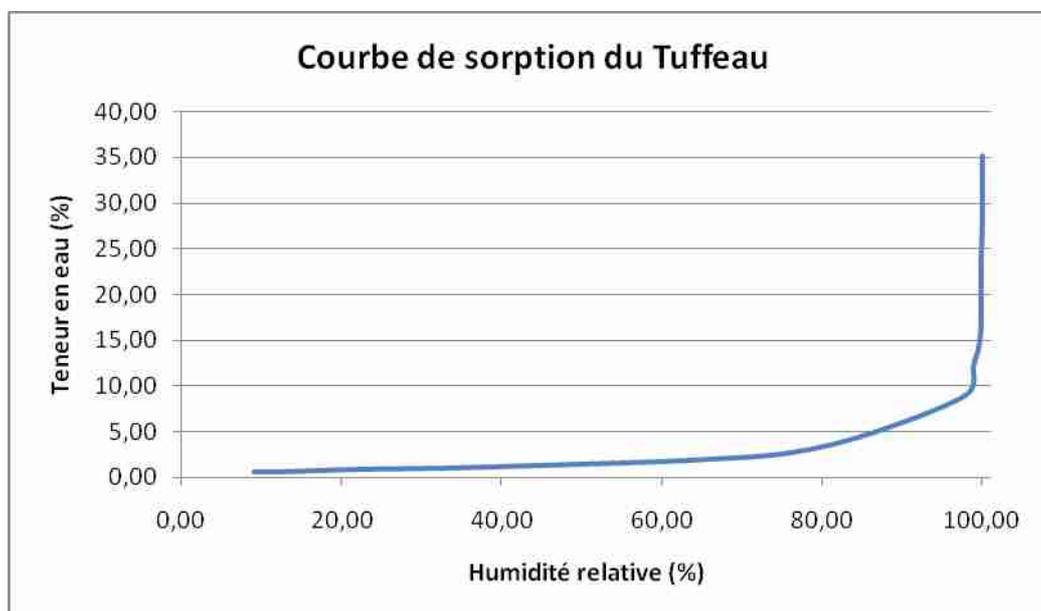


Figure 2-5 : Courbe de sorption du Tuffeau de Saint-Cyr-en-Bourg ([BEC 2006])

Le tuffeau est un matériau qui capte très facilement l'humidité de l'air. Il peut contenir une importante quantité d'eau à l'état liquide et vapeur quand il est placé dans un milieu avec un fort taux d'humidité. En effet, nous comparons la teneur en eau de référence (teneur en eau du matériau placé dans une ambiance à 80% d'humidité relative) du tuffeau et d'autres

⁶ Porosité : rapport du volume des vides sur le volume total

matériaux utilisés dans le bâti ancien (Cahier 0 – Hygroba⁷). Cette grandeur permet de caractériser l'hygroscopicité du matériau c'est-à-dire sa capacité à capter et stocker l'humidité de l'air lorsqu'il est placé dans une ambiance humide (cf. figure 2-6).

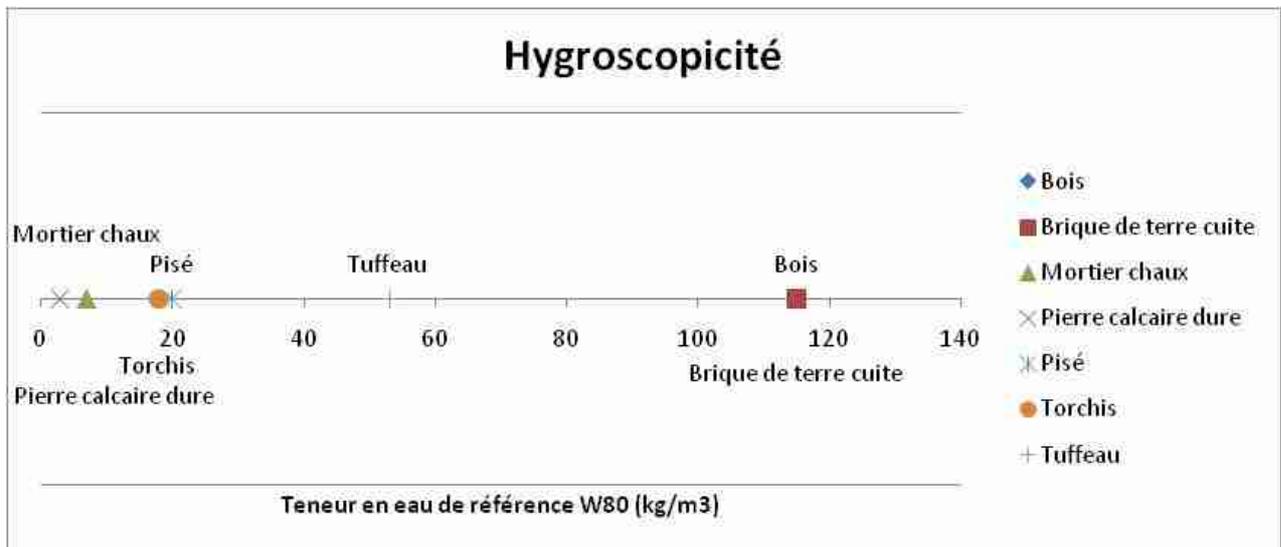


Figure 2-6 : Hygroscopicité des matériaux anciens

Le tuffeau fait partie des matériaux très hygroscopiques parmi ceux considérés.

La capillarité du tuffeau

Le coefficient A est le coefficient d'absorption du matériau. Il caractérise la facilité du matériau à laisser transiter l'eau liquide. Plus le coefficient A est élevé, plus le matériau est capillaire. Nous comparons le tuffeau aux autres matériaux anciens.

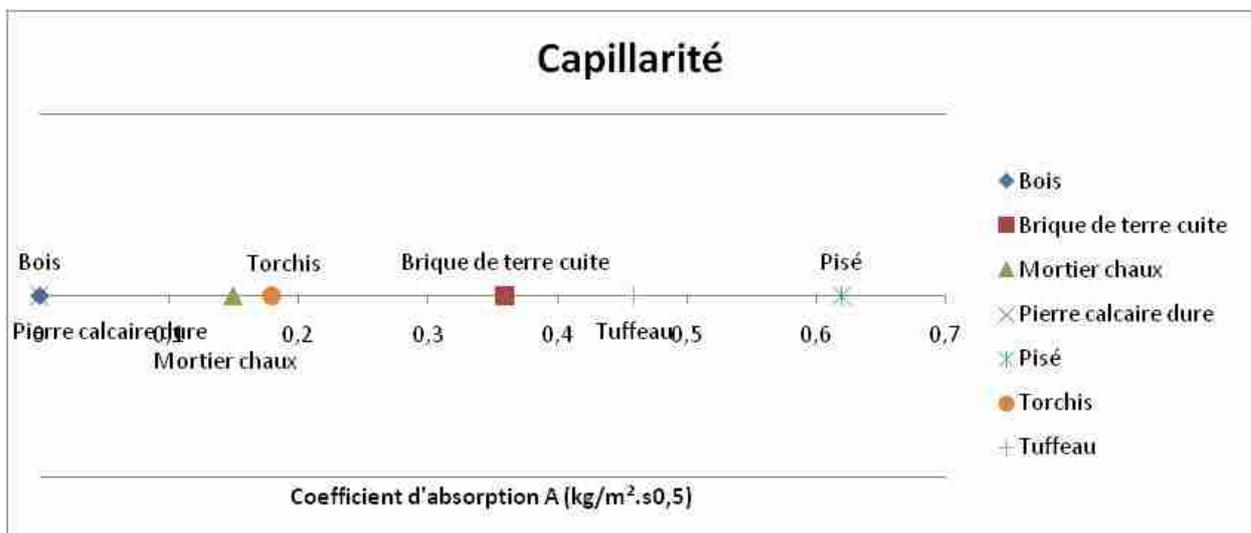


Figure 2-7 : Capillarité des matériaux anciens

Le tuffeau est donc un matériau très capillaire ce qui peut créer des remontées d'eau dans les murs par le sol par exemple (remontées capillaires).

3.2.1.2.2 La conductivité thermique

⁷ <http://www.cete-est.developpement-durable.gouv.fr/productions-a-telecharger-r1521.html>

La conductivité thermique moyenne du tuffeau est de 0,4 W/m.K. Parmi les matériaux de constructions anciens, le tuffeau sec se situe dans les matériaux moyennement conducteurs comme le montre le graphique ci-dessous.

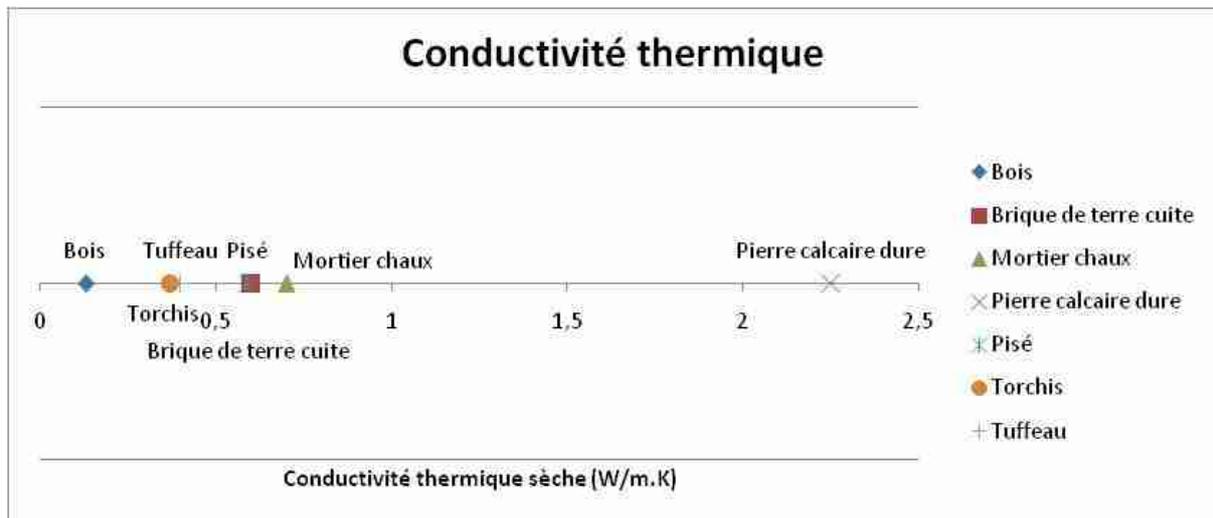


Figure 2-8 : Conductivité thermique des matériaux anciens

Cependant, la problématique du tuffeau vis-à-vis de sa conductivité thermique vient de sa capacité à accueillir de l'humidité. En effet, la conductivité thermique d'un matériau varie avec sa teneur en eau car la conductivité thermique de l'eau est 25 fois plus élevée que celle de l'air ($\lambda_{\text{eau}}=0,5 \text{ W/m.K}$ et $\lambda_{\text{air}}=0,024 \text{ W/m.K}$). Or, le tuffeau avec sa forte porosité peut contenir une importante quantité d'eau.

Le CETE de l'Ouest a réalisé des mesures de conductivités thermiques à différentes teneurs en eau sur une pierre de tuffeau. Celle-ci a tout d'abord été immergée sous vide pour être saturée puis séchée dans une étuve à 50°C. Régulièrement pendant la phase de séchage, l'échantillon a été pesé et sa conductivité thermique mesurée à l'aide d'un conductimètre utilisé pour mesurer la conductivité des sols. A noter que la méthode présente une forte incertitude sur la valeur des conductivités, mais permet de mettre en évidence son évolution. La Figure 2 -9 présente l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau de la pierre.

La conductivité thermique du tuffeau double quand le matériau est saturé (pour cet échantillon : 0,5 W/m.K sec et 1,3 W/m.K saturé). Si nous repositionnons le tuffeau saturé sur l'histogramme des matériaux anciens, il fait alors partie des matériaux fortement conducteurs.

Il est donc important d'éviter la présence d'eau dans le tuffeau, autant d'un point de vue structurel que d'un point de vue thermique.

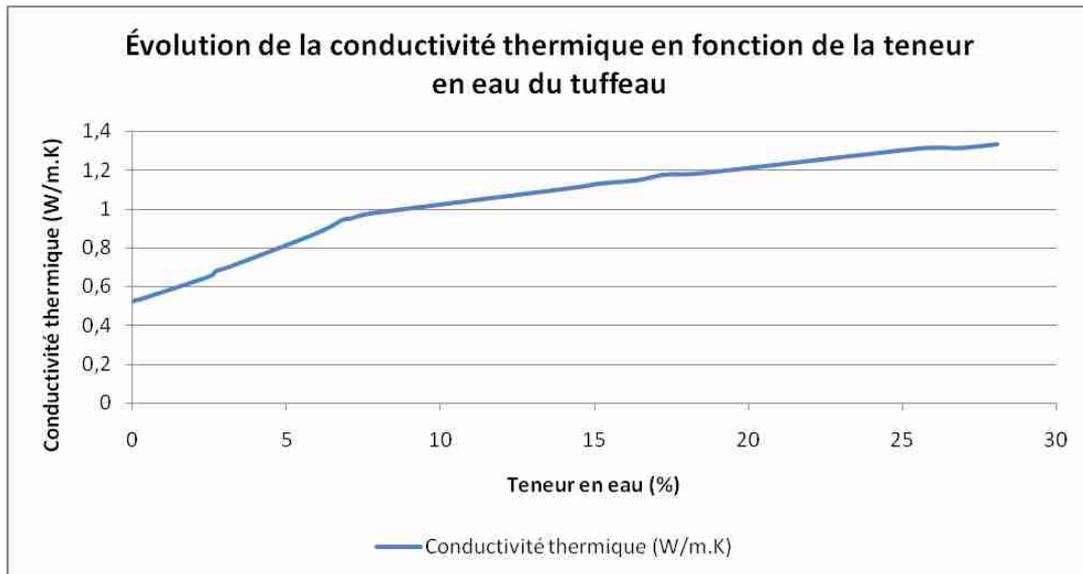


Figure 2-9 : Évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau sur une pierre de tuffeau

3.2.1.3 Les désordres observés

Le tuffeau du fait de sa forte porosité est très sensible à l'eau. Les altérations sont donc présentes de manière importante. Les photos suivantes ont été réalisées dans le Maine-et-Loire sur des habitations en Tuffeau.



Le pied de mur présente deux altérations différentes :

- Sur la seconde rangée de pierre en partant du bas de l'édifice, on peut observer un détachement de plaque de quelques centimètres qui met à nu la partie sous-jacente.
- Sur la première rangée, nous pouvons étudier un développement de micro-organismes liés sans doute à des remontées capillaires.



Sur cette photo, nous pouvons observer le développement de micro-organismes avec du lichen et l'apparition d'une croûte noire qui peut être liée à la pollution ou au ruissellement de l'eau.



Le mur en pierre de taille subit une alvéolisation très marquée. Les pierres de différentes natures (plus grises à gauche et jaunâtre à droite) ne présentent pas le même profil d'alvéolisation.



L'ellipse permet de situer l'apparition d'efflorescences couleur rouille. Celles-ci sont dues à une évaporation en surface d'eau chargée en fer.



L'enduit à la chaux qui enduit un mur en moellons se décolle en-dessous du soutien en pierre de taille. Ce décollement peut-être dû à une accumulation d'eau à ce niveau (liée à la gouttière ou à une pierre différente au-dessus).



Cette façade montre un développement de salissures sur les parties les plus soumises à la pluie.

3.2.2 Le bâti en tuffeau

3.2.2.1 Quelques chiffres

Il n'y a pas d'études sur le patrimoine en pierre calcaire ni sur celui en tuffeau. Nous nous intéresserons donc dans un premier temps aux données qui concernent le parc ancien dans son ensemble.

Le patrimoine ancien est marqué par une forte proportion de maisons individuelles qui représentent 64,8% du parc d'avant 1949. La surface de ces logements individuels est nettement supérieure à celle des habitats collectifs (107 m² contre 60 m²) (JACQUOT, 2003). Pour le parc de bâtiments antérieurs à 1949, nous retrouvons 5 080 446 maisons individuelles et 2 743 504 immeubles collectifs (MP, 2010).

Parmi les bâtiments d'avant 1948, nous retrouvons la répartition suivante des matériaux constitutifs des parois :

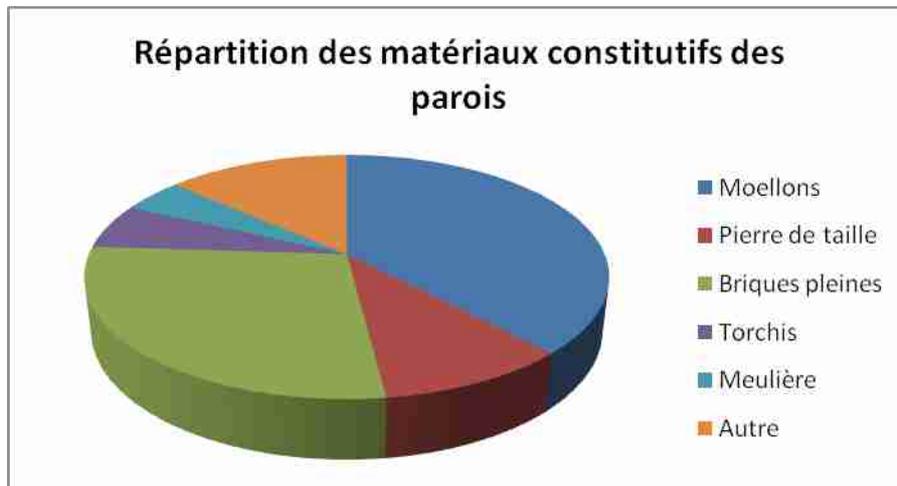


Figure 2-10 : Répartition des matériaux constitutifs des parois (CEREN, 1979)

P. Graulière précise en 2006 que le bâti en pierre calcaire se retrouve principalement dans les grands bassins sédimentaires où est extraite la pierre (bassins aquitain, parisien, rhodanien) et dans les montagnes jeunes (Jura, Alpes, Pyrénées). L'extraction de ces pierres est facile ce qui a favorisé son exploitation dans la construction.

3.2.2.2 Les techniques constructives

La pierre de tuffeau est utilisée sous deux formes dans la construction :

- **En pierre de taille** : elle est utilisée principalement sur les maisons bourgeoises, pour les façades visibles, pour les chaînages d'angle et les encadrements de menuiseries.
- **En moellons** : il existe différents types de moellons (équarris : forme parallépipédique ou bloqués : tels qu'ils ont été extraits). Ils sont mis en œuvre avec ou sans mortier.

La construction d'un mur peut faire appel aux deux formes de pierre. Nous allons considérer les quatre murs suivants comme représentatifs de ceux rencontrés sur le terrain.

- Le mur en pierre de taille de 22 ou 27 cm d'épaisseur :

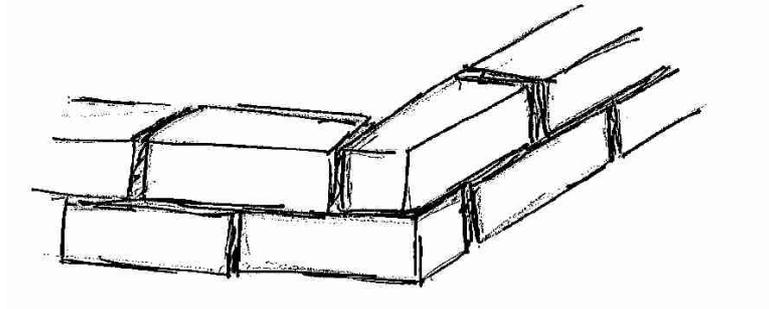


Figure 2-11 : Vue d'un mur en pierre de taille

- Le mur en moellons de 50 cm ou plus :

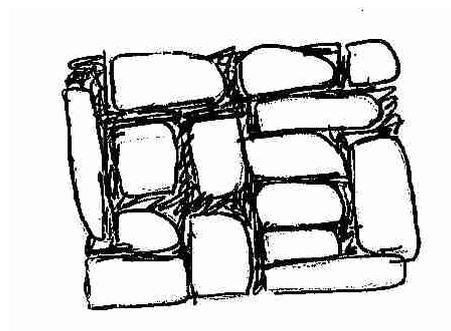


Figure 2-12 : Vue de face d'un mur en moellons

- Le mur en double parement de pierre de taille et blocage intérieur d'une épaisseur supérieure à 50 cm :

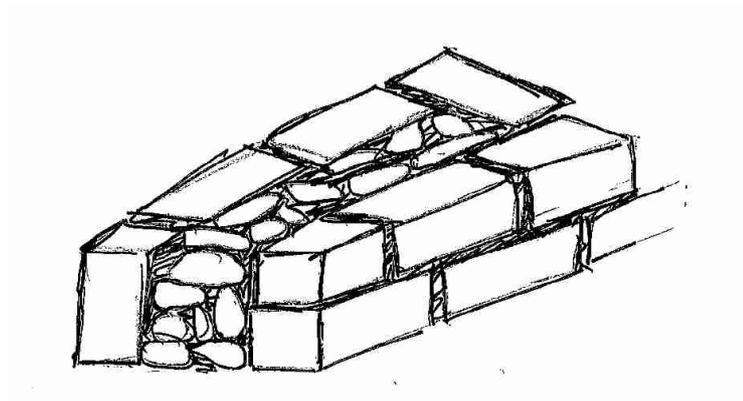


Figure 2-13 : Vue d'un mur en double parement pierre de taille avec blocage intérieur

- Le mur en pierre de taille et moellons de 50 cm et plus :

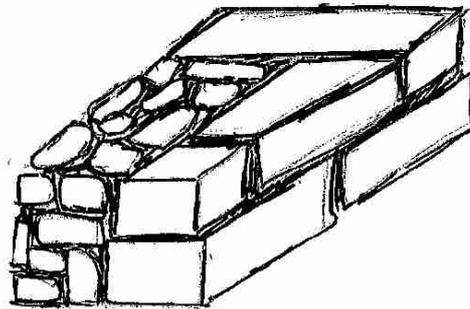


Figure 2-14 : Vue d'un mur en moellons et pierre de taille

3.2.2.3 Les typologies architecturales rencontrées

L'utilisation de la pierre de tuffeau dans la construction remonte aux premiers siècles de notre ère (vestiges de la villa de Brain-sur-Allons, amphithéâtre de Gennes). A cette époque cela restait tout de même occasionnel, selon G. Plat : « Les Romains, malgré l'abondance et parfois la beauté des bancs de pierre tendre, ont employé de préférence les matériaux les plus durs. » Au XI^{ème} siècle, l'emploi du tuffeau en maçonnerie se développe. D'abord uniquement en petit appareil (moellons), le moyen appareil (pierre de taille) commence à être utilisé dans la seconde moitié du XI^{ème} siècle pour les contreforts ou l'encadrement des baies. Au début du XII^{ème} siècle, la construction se fait pour l'essentiel en pierre de taille. La standardisation des longueurs et des hauteurs diminue le rendement de l'activité d'extraction mais permet un gain de temps de pose et une diminution du volume du mortier. A l'époque moderne, la dimension des pierres de taille augmente fortement. Vers le milieu du XIX^{ème} siècle, l'appareil est devenu régulier, normalisé en hauteur et largeur. Cet emploi du grand appareil est destiné en majorité aux monuments et maisons de maître. Les édifices plus modestes utilisent toujours des pierres de faibles dimensions. A partir de la fin du XIX^{ème} siècle, l'exploitation du tuffeau amorce son déclin. La production est aujourd'hui quasi-inexistante et ne sert qu'à la restauration. (Prigent, 2000).

Au niveau de l'Anjou et de la Touraine, 3 typologies principales de maisons sont rencontrées. Pour plus de détails, les fiches du PNRLAT⁸ dont sont issues les figures sont disponibles sur leur site.

⁸ <http://www.parc-loire-anjou-touraine.fr/fr>, 2013

La maison de maître

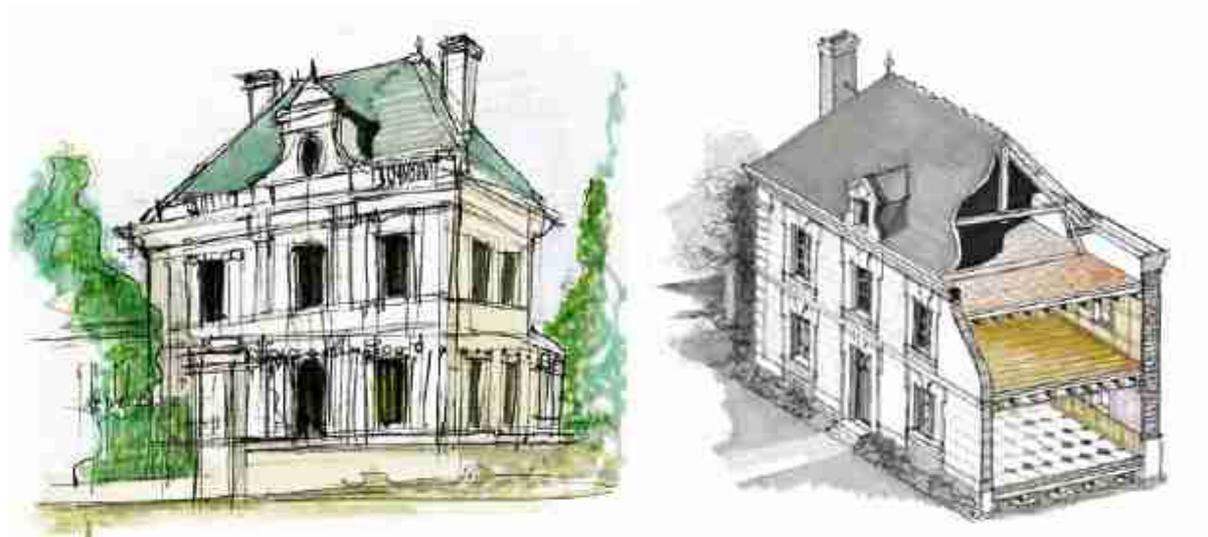


Figure 2-15 : Représentations de la maison de maître (Sources : fiches Bâti en tuffeau PNRLAT)

La maison de maître est la maison bourgeoise du XIX^{ème} siècle. Elle est représentative du modèle académique commun à l'ensemble de la France.

En milieu urbain, elle dispose d'une cour derrière une clôture qui ne masque pas la façade. Un jardin se trouve en fin de parcelle. En milieu rural, l'habitation domine une vaste cour autour de laquelle se dressent des granges ou des demeures plus traditionnelles. La maison de maître était un moyen de mettre en évidence son statut social.

La toiture en ardoise est à quatre pans. Les façades sont ornementées par des chaînes d'angle, des bandeaux et des frontons sculptés ou des linteaux pour confirmer le statut social des propriétaires.

La maison de maître dispose régulièrement d'un vide-sanitaire ou d'une cave semi-enterrée. Les murs débutent avec un soubassement en pierre froide (porosité faible) qui sert de barrage aux remontées capillaires. En bord de Loire, les maisons sont généralement entièrement en pierre de taille d'épaisseur faible (22 à 30 cm). En s'écartant de l'axe fluvial, la pierre de taille peut être réservée aux encadrements et à la façade principale. Les murs en moellons sont alors enduits à la chaux grasse ou aérienne.

A l'intérieur, les parements sont enduits en plâtre et les allèges et soubassement peuvent être habillés de boiseries.

La maison de bourg



Figure 2-16 : Représentations de la maison de bourg (Source : fiches Bâti en tuffeau PNRLAT)

La maison de bourg est très diversifiée sur le parc car soumise aux contraintes géographiques des villages. Il y a ainsi aussi bien des « villages rues », des « villages buttes » ou des villages troglodytes.

Dans les centres bourgs, les façades sont alignées en limite de voirie. Dans les villages à proximité des cours d'eau, l'habitat troglodyte a laissé la place à des maisons s'adossant aux coteaux ou en limite de parcelle. L'éloignement progressif des buttes donne de multiples implantations.

La compacité des lieux et la mitoyenneté étaient des moyens de réduire les déperditions thermiques. Cependant, ces habitations ne disposaient pas d'autant d'apports solaires que les maisons plus isolées.

Les toitures ont généralement deux versants.

Suivant le statut social du propriétaire, la façade principale est plus ou moins ornementée. Elles sont fréquemment en pierres de taille. En bord de Loire, les édifices peuvent être entièrement en pierre de taille. En s'éloignant du fleuve, les façades secondaires sont plus régulièrement en moellons et tout-venant enduits à la chaux.

La maison dispose généralement d'un vide-sanitaire ou d'une cave semi-enterrée. Les murs sont souvent construits sur un soubassement en pierre froide qui permet de réduire les remontées capillaires.

La maison rurale



Figure 2-17 : Représentations de la maison rurale (Source : fiches Bâti en tuffeau PNRLAT)

La maison rurale date majoritairement du XIX^{ème} siècle. Elle présente une grande hétérogénéité sur l'ensemble du parc car elle allie tuffeau et d'autres matériaux locaux.

Suivant la localisation (proximité de la Loire ou Sud de l'Anjou), elle s'implante en hameaux ou en forme de U avec des bâtiments agricoles. Toutefois, sa façade Sud est généralement la façade principale.

Bien que souvent en ardoise, la toiture peut être en tuile du côté de la Touraine. On retrouve régulièrement une corniche taillée dans la pierre de taille en ornement de la façade.

Les fenêtres sont à double vantaux avec des carreaux plus hauts que larges.

La maison rurale est souvent construite en murs de moellons montés avec un mortier de terre et jointés à la chaux par la suite. Toutefois, il arrive souvent de rencontrer une façade Sud en pierre de taille et le reste de l'habitation, moins visible, en moellons. Les encadrements des menuiseries et les chaînages d'angle sont systématiquement en pierre de taille.

La maison rurale dispose rarement de fondations ce qui implique généralement des remontées capillaires. Cependant, elle peut être dotée d'un soubassement en grès, silex ou d'un lit de pierre plus dure qui limite le phénomène de remontées capillaires.

En ce qui concerne la charpente, elle est généralement à fermes à entrain retroussé.

3.2.3 Quelques points de vigilance en réhabilitation

Au cours de différentes visites de bâtiments en tuffeau réhabilités et en recueillant l'expérience des professionnels, les principaux désordres liés à une modernisation du bâti ont été mis en évidence.

3.2.3.1 L'humidité

L'humidité est la première cause d'altération du tuffeau. Un soin particulier en réhabilitation doit donc être apporté à sa gestion.

La première chose à retenir est que la maison ancienne ne cherche pas à lutter contre l'humidité mais elle cherche plutôt à gérer les problèmes qui y sont liés. Dans le patrimoine

en tuffeau, et ancien plus généralement, l'eau n'est jamais bloquée mais son cheminement est guidé pour favoriser son évacuation. Les matériaux et enduits utilisés permettent donc à l'eau de transiter.

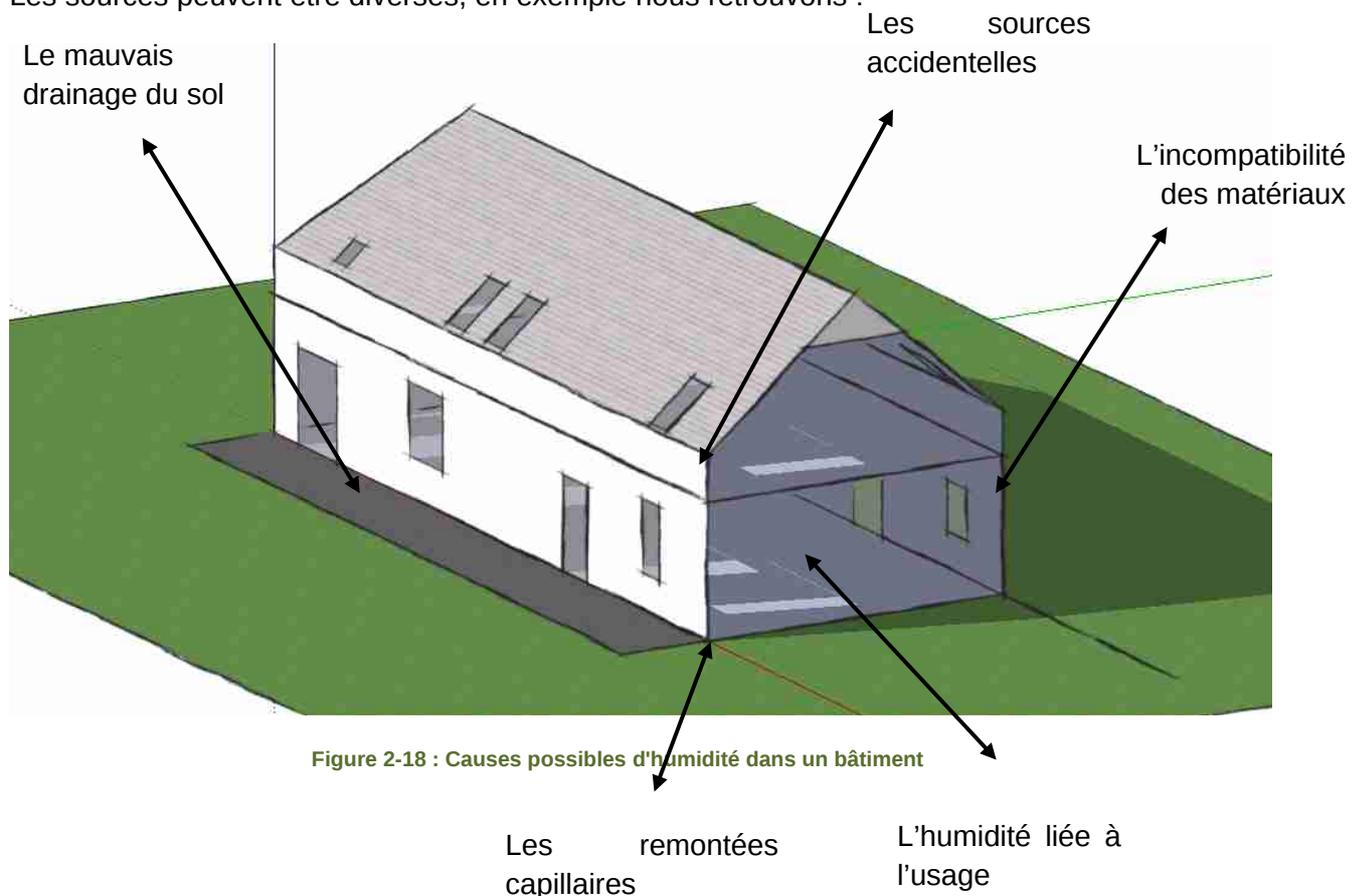
Cependant, des réhabilitations malheureuses, des défauts de construction ou tout simplement des problèmes d'usures peuvent bloquer le cheminement de l'humidité et favoriser son accumulation. Ceci se traduit de différentes manières :

- Le développement de moisissures et de champignons,
- La prolifération d'insectes xylophages,
- L'apparition de salpêtre,
- Etc.

Par ailleurs, un matériau humide est difficile à chauffer et sa résistance thermique diminue avec la teneur en eau (cf. paragraphe 3.2.1.2.2).

La première étape d'un traitement de l'humidité est d'identifier précisément la source de celle-ci. La source et le point de manifestation peuvent être très éloignés. Un diagnostic doit donc être effectué avec précision sur l'ensemble du bâtiment.

Les sources peuvent être diverses, en exemple nous retrouvons :



- L'humidité liée à l'usage : les occupants dégagent de la vapeur d'eau par leur respiration et leurs activités. Cette vapeur d'eau peut condenser au contact d'une paroi froide,

- Les sources accidentelles : on entend ainsi les inondations ponctuelles, les ruptures de canalisations extérieures, de gouttières, etc.
- La mise en place de matériaux incompatibles : l'arrivée au XXème siècle des matériaux étanches sur les façades (comme vu au paragraphe 3.2.3.2) a perturbé le comportement des parois. L'humidité s'accumule au niveau de ces matériaux et dégrade la pierre,
- Les remontées capillaires : le bâti ancien y est couramment soumis, l'eau remonte dans les maçonneries. Pour y faire face, les parois étaient souvent dotées d'un soubassement en pierre plus dures,
- Le mauvais drainage du sol : les revêtements étanches qui arrivent en pied de mur bloque l'évaporation de l'humidité. L'eau de pluie rejaillit du sol et gonfle le mur en humidité.

Il s'agit là de quelques sources potentielles dont la liste n'est pas exhaustive.

Le point le plus important dans la gestion de l'humidité est l'entretien du bâtiment. Cet entretien passe par la surveillance des points suivants qui seront à contrôler chaque année (Figure 2-19).



Figure 2-19 : Points de vigilance et d'entretien (Source : fiche n°5 Traiter l'humidité PNRLAT)

Voici une liste non exhaustive de traitements possibles de l'humidité. Ceux-ci sont à adapter au diagnostic réalisé. Il s'agit là de préconisations données à titre indicatif.

- Évacuer l'humidité domestique : hotte aspirante, ventilation mécanique, aération manuelle par ouverture des fenêtres, etc.
- Traiter les ouvertures : l'eau peut passer sous les dormants, il faut veiller à l'évacuer.
- Favoriser l'évaporation : mise en place d'un hérissou pour l'humidité du sol, mise en place d'une isolation perspirante au niveau des murs, etc.
- Installer un drain : réduction de l'impact des remontées capillaires et du rejaillissement de la pluie.
- Adapter la végétation : installation de plantes ayant une fonction de régulation de l'humidité.

Ces informations sont issues de la fiche *Traiter l'humidité* du PNRLAT et de l'ouvrage *Traiter l'humidité* de Yves Baret (Baret, 2011).

3.2.3.2 Les matériaux incompatibles avec le tuffeau

Les enduits ciments

Le problème le plus couramment relevé est la désagrégation de la pierre de tuffeau après la mise en place d'un enduit extérieur en ciment. Ce phénomène a principalement lieu sur les bâtiments en moellons. Après plusieurs années, les pierres s'effritent et l'enduit se détache, laissant apparaître les dégâts. Les pierres de tailles apparentes en jambage de fenêtres sont souvent les premières touchées : elles s'effritent à l'interface avec l'enduit ciment.

Les maçonneries de pierre de taille peuvent aussi être sujettes à ses dégradations dans le cas où les joints sont refaits en ciment.

L'enduit ciment est un enduit imperméable qui ne permet pas la circulation de l'eau. Celle-ci s'accumule à l'interface et dégrade le matériau le plus tendre, dans ce cas : le tuffeau.



Figure 2-20 : Pierres de taille en tuffeau dégradées par alévolisation à l'interface avec le soubassement. Celui-ci a été enduit de ciment, le rendant étanche \$



Figure 2-21 : Pierres de taille d'angle dégradées à cause de l'enduit ciment appliqué par dessus

La compatibilité pierre/pierre

Il n'est pas rare que des pierres soient remplacées lors de restauration des édifices. La teinte ne doit pas être le seul critère de sélection d'une pierre de restauration. En effet, comme pour les enduits, lors du contact entre deux pierres, c'est le matériau le plus tendre (généralement le tuffeau) qui se dégrade à cause de l'accumulation d'eau à l'interface. Il faut donc prendre en compte les caractéristiques physiques et hygriques de la pierre de restauration pour qu'elles soient les plus proches possibles de celles du tuffeau.

Les habillages en zinc

Le zinc permet de protéger la pierre qui se situe en dessous. Cependant, l'eau s'accumule en amont de la corniche en zinc et dégrade alors les pierres (Figure 2 -22).



Figure 2-22 : Corniche coiffée de zinc, l'eau stagnante a dégradé le tuffeau en dessous

4 Les campagnes d'instrumentation

4.1 Présentation de la démarche

Les objectifs de ces campagnes de mesures sont d'évaluer le comportement d'un bâtiment en tuffeau et d'évaluer des solutions de réhabilitation sur ce patrimoine.

Pour cela, les campagnes ont débuté par la visite de 16 bâtiments en tuffeau. Parmi ces bâtiments, huit bâtiments ont été retenus pour faire l'objet d'une instrumentation légère d'été. Enfin, pour connaître plus précisément le comportement de ces bâtiments, un zoom a été réalisé sur trois bâtiments avec une instrumentation plus importante.

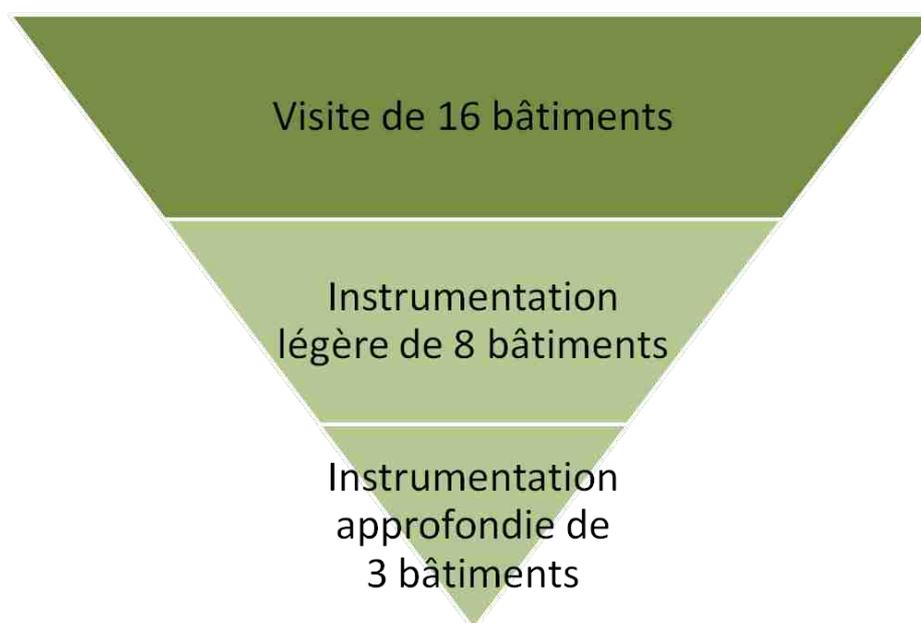


Figure 3-23 : Schéma de la démarche de travail

4.2 Visites de 16 bâtiments en tuffeau

L'objectif de ces visites est de dresser un état des lieux du patrimoine en tuffeau, d'identifier les qualités et les défauts de ces bâtiments d'un point de vue hygrothermique.

Pour cela, en relation avec le PNRLAT, un panel de 16 bâtiments en tuffeau (bâtiments publics et maisons individuelles) a fait l'objet de visites au printemps 2011. Les trois typologies de maisons individuelles présentées au paragraphe 3.2.2.3 ont été visitées. Ces bâtiments, disséminés sur le territoire comme le montre la carte ci-dessous, présentent différents stades de réhabilitation : « dans leur jus », en cours de réhabilitation ou réhabilités.



Figure 3-24 : Localisation des bâtiments visités

La mise en relation avec les propriétaires via le PNRLAT nous a fourni un panel de propriétaires volontaires et sensibilisés aux questions d'économies d'énergie. Ces visites ne sont donc pas nécessairement représentatives de l'ensemble du parc bâti en tuffeau.

Le tableau ci-dessous présente les opérations visitées et leur stade de réhabilitation. Pour chaque visite, nous avons dressé un compte-rendu reprenant les points clés suivants :

- Année de construction
- Orientation du bâtiment
- Typologie
- Épaisseurs des parois
- Maçonneries
- Pathologies observées
- Isolation
- Système de chauffage et de ventilation
- Projet de réhabilitation et retours d'expérience le cas échéant

Les comptes-rendus sont disponibles pour l'ensemble des maisons dans les cahiers annexes.

Bâtiment	Cahier	Date de visite	Non isolé	Isolé ou en cours d'isolation	Instrumentation ⁹
Maison de maître du 15 ^{ème} siècle – Vivy (49)	N°2	19 juin 2011	X		A
Maison de bourg – Saint-Mathurin sur Loire (49)	N°3	29 avril 2011		X <i>Laine de chanvre et bois</i>	A
Ancienne grange - Coudray-Macouard (49)	N°1	29 avril 2011		X <i>Enduit chaux- chanvre</i>	A
Gîte collectif – Lerné (37)	N°4	6 avril 2011		X <i>Laine chanvre et lin</i>	L
Maison rurale – Cheviré Le Rouge	N°5	20 mai 2011		X <i>Enduit chaux- chanvre</i>	L
Maison de bourg - Gizeux	N°6	13 avril 2011	X		L
Maison semi-troglodyte - Montsoreau	N°7	Avril 2011	X		L
Maison rurale - Cheillé	N°8	22 avril 2011		X <i>Chaux- chanvre banché</i>	L
Maison troglodyte – Villaines les Rochers	N°9	22 avril 2011		X <i>Enduit chaux- chanvre banché</i>	N
Ancienne mairie – Le Puy Notre Dame	N°10	7 juin 2011	X		N
Maison rurale - Clefs	N°11	20 mai 2011		X <i>Enduit chaux- chanvre</i>	N
Mairie - Forges	N°12	7 juin 2011	X		N
Maison de maître – Saint-Martin	N°13	10 mai 2011	X		N
Maison 15 ^{ème} siècle - Langeais	N°14	22 avril 2011		X <i>Chaux- chanvre banché et laine de chanvre</i>	N
Maison - Varennes	N°15	26 mai 2010	X		N
Maison rurale – Vieux Vivy	N°16	27 avril 2011	X		N

⁹ L = légère, A= approfondie, N= non

4.3 L'instrumentation légère

Pour répondre à l'objectif d'amélioration de la connaissance du comportement des bâtiments en tuffeau, nous avons choisi d'instrumenter quelques bâtiments.

Parmi les 16 bâtiments visités, huit bâtiments ont été sélectionnés parmi lesquels on retrouve les trois typologies architecturales ainsi que différents stades de réhabilitation. Voici la liste des bâtiments instrumentés.

- Ancienne grange – Coudray-Macouard
- Maison de maître – Vivy
- Maison de bourg – Saint-Mathurin sur Loire
- Gîte collectif – Lerné
- Maison rurale – Cheviré Le Rouge
- Maison de bourg – Gizeux
- Maison semi-troglodyte – Montsoreau
- Maison rurale – Cheillé

L'objectif de cette instrumentation légère est de caractériser le comportement des ambiances intérieures des bâtiments en tuffeau en été. Des mesures de températures et d'humidités relatives ont été menées durant environ deux mois sur les huit bâtiments précédents. Les pièces suivantes ont été instrumentées : séjour, cuisine, salle de bain et chambres. Suivant l'agencement des bâtiments, certains ajustements ont été réalisés mais le plan d'instrumentation général est le suivant.

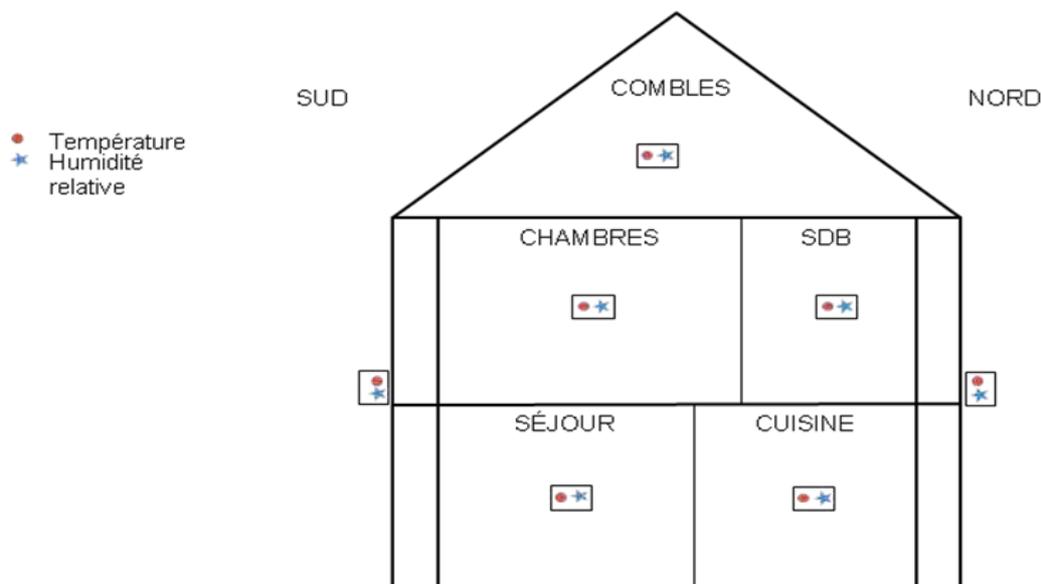


Figure 3-25 : Plan général de l'instrumentation légère

Les plans d'instrumentation des huit bâtiments précédents sont disponibles dans les comptes-rendus de visite du bâtiment concerné (voir les cahiers annexes).

Les résultats de ces mesures seront donnés au paragraphe 5.

4.4 L'instrumentation approfondie

Pour aller plus loin dans la connaissance du comportement hygrothermique des bâtiments en tuffeau, l'instrumentation légère a été approfondie sur trois bâtiments :

- Ancienne grange – Coudray-Macouard
- Maison de maître – Vivy
- Maison de bourg – Saint-Mathurin sur Loire

L'objectif est de caractériser les évolutions des ambiances intérieures en hiver et d'évaluer les transferts hygrothermiques dans les parois en tuffeau. Les mesures de températures et d'humidités relatives de l'instrumentation légère ont été poursuivies.

Les parois principales (2 orientations) ont été instrumentées. Des mesures de températures et d'humidités relatives ont été réalisées en 2 profondeurs et 2 hauteurs sur une façade. Les objectifs sont

- L'étude de l'évolution des températures et des humidités relatives en fonction de la profondeur dans les parois,
- L'étude de l'impact des remontées capillaires ou du rejaillissement des eaux de pluie.

L'instrumentation réalisée suit alors le plan général de la Figure 3 -26.

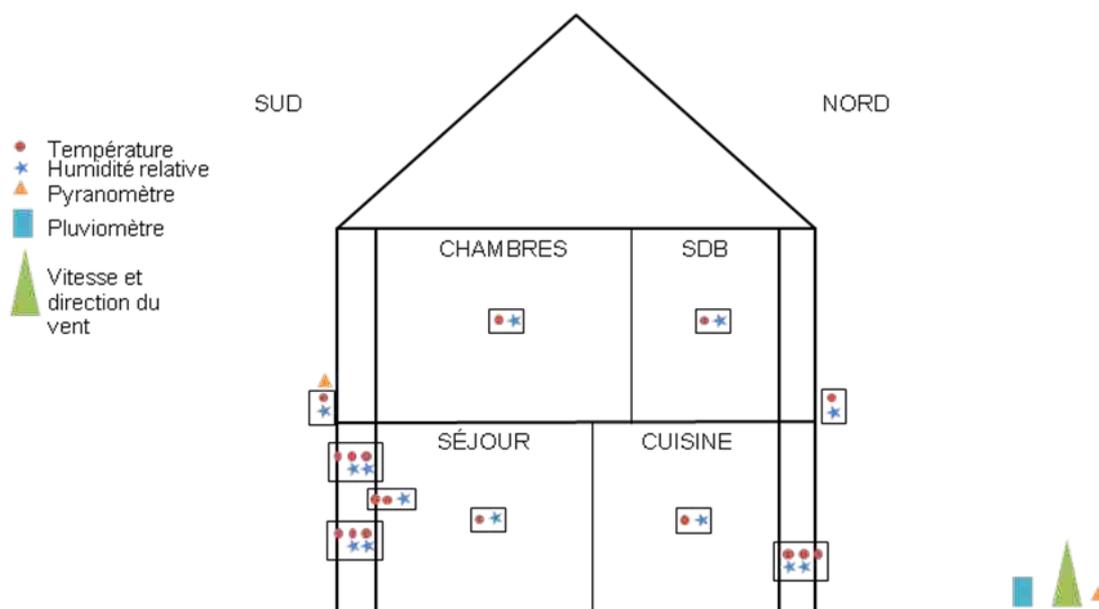


Figure 3-26 : Plan général de l'instrumentation approfondie

Pour chaque point de mesure dans les parois, l'instrumentation est réalisée suivant la Figure 3 -27.

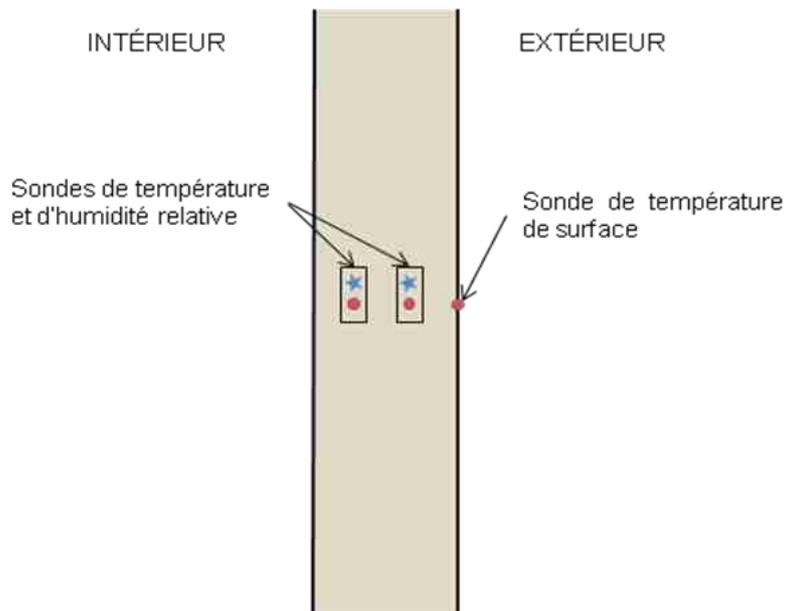


Figure 3-27: Plan général d'instrumentation des parois

Les plans d'instrumentation des trois bâtiments sélectionnés sont disponibles dans les comptes rendus de visite (voir les cahiers annexes).

Les résultats de ces mesures seront donnés au paragraphe 5

5 Résultats des mesures

La synthèse des analyses qui suivent portent sur les bâtiments suivant (cf. descriptif en annexe) :

- Gîte collectif – Lerné
- Maison semi-troglodyte – Montsoreau
- Maison rurale – Cheviré Le Rouge
- Maison de maître – Vivy
- Maison de bourg – Saint-Mathurin sur Loire
- Maison rurale – Cheillé

Des analyses plus détaillées par bâtiment sont présentées dans les cahiers annexes.

Sur les 6 bâtiments, un total de 22 pièces ont été suivies. On distinguera les différentes pièces instrumentées selon la typologie suivante :

- pièces dont tous les murs extérieurs sont en tuffeau,
- pièces sous toiture,
- pièces rénovées, c'est à dire présentant une isolation thermique (pièces en tuffeau ou sous toiture).

5.1 L'inertie thermique dans les bâtiments en tuffeau

Les bâtiments anciens sont réputés pour leur inertie. Les bâtiments en Tuffeau ne font pas exception (cf §2.1.2). Les indicateurs de l'inertie sont le déphasage et l'amortissement. La figure 4-1 présente ces 2 indicateurs pour les différents types de pièce (selon la nomenclature présentée ci dessus), ces indicateurs ont été définis sur des mesures d'été.

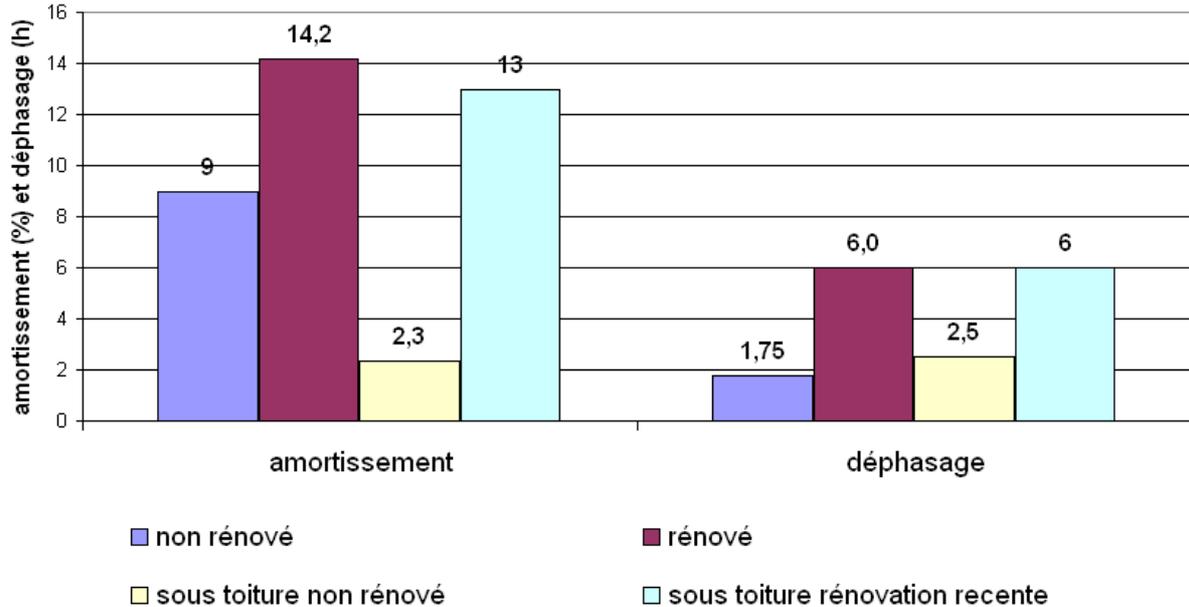


Figure 4-28: Valeurs moyennes d'amortissement et déphasage pour les différentes typologies de pièces

On constate tout d'abord, comme on pouvait s'y attendre, que les bâtiments suivis ont une inertie thermique. L'amortissement de 9 pour les pièces "en tuffeau" est important, alors que le déphasage de 1,75 h en moyenne n'est pas si important. Dans les pièces sous toiture, l'absence de parois lourdes amène un amortissement plus faible.

Pour les bâtiments rénovés, l'amortissement est plus important (14 en moyenne), mais c'est surtout le déphasage qui est multiplié par 3. Sous toiture, la rénovation apporte de l'inertie avec des valeurs d'amortissement et déphasage équivalentes aux pièces "classiques".

L'incidence de l'inertie sur les températures en été est présentée sur le graphique de la figure 4-2. On y trouve les températures moyennes, leurs maximum et minimum pour chaque pièce instrumentée.

Dans les pièces non rénovées, les températures moyennes sont comprises entre 22,3 et 24,6. Les maxima peuvent dans ces pièces dépasser 30°C pour des maximum extérieurs supérieurs à 40°C. Dans les pièces sous toiture, l'inertie réduite ne permet pas d'atténuer les températures extrêmes. On constate ainsi des températures maximales qui peuvent dépasser les 40°C.

Lorsque les pièces ont été rénovées, hors combles, les températures moyennes sont comprises entre 19,9 et 22,3°C. Les maximums ne dépassent jamais 28°C correspondant au seuil de confort.

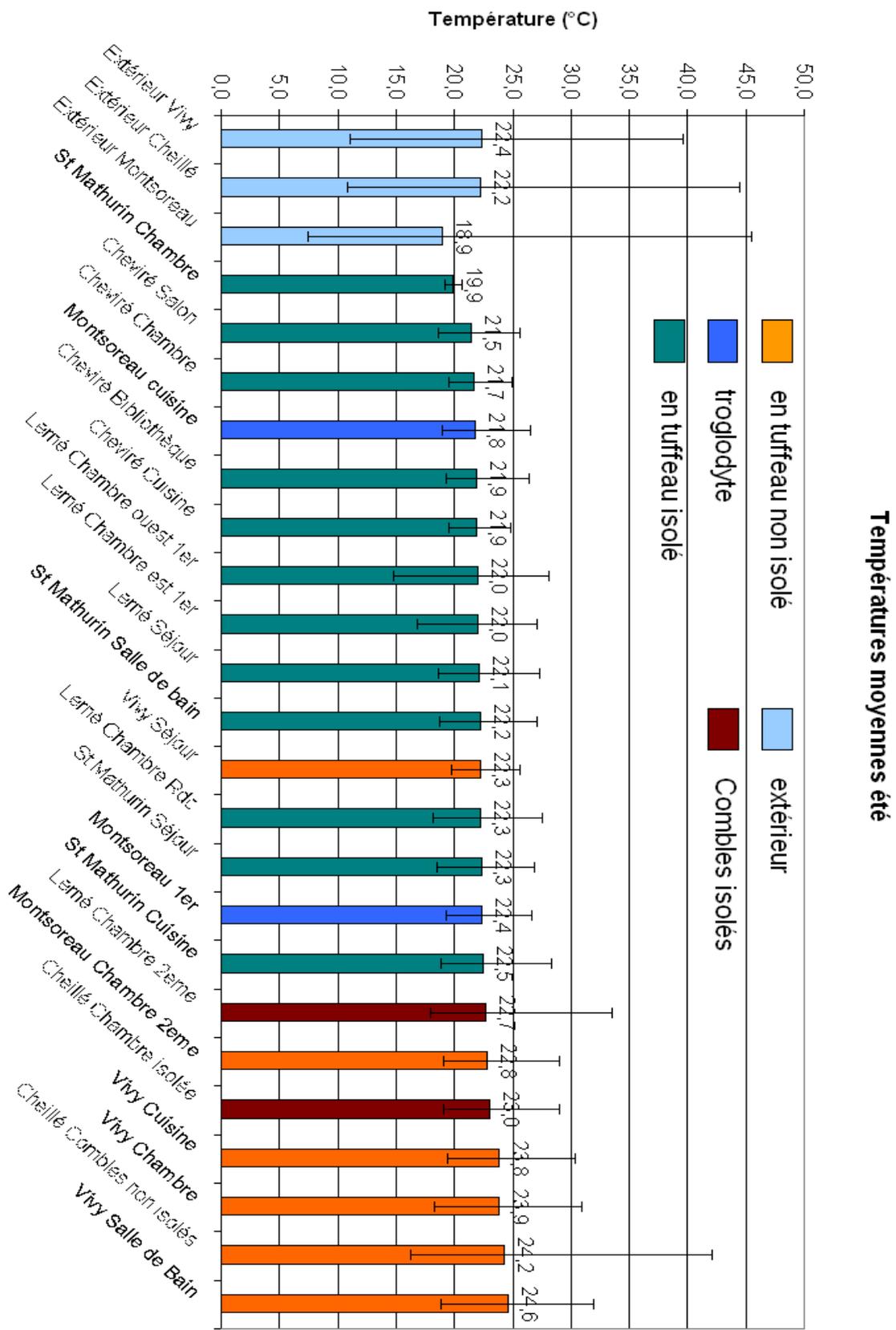


Figure 4-29: températures moyennes minimales et maximales mesurées dans les 22 pièces

5.2 Le confort hygrothermique

Il est de coutume de dire que l'inertie du bâti ancien, étudié dans le paragraphe précédent, permet un bon confort d'été. Or la notion de confort ne dépend pas uniquement de la température. Dans cette partie, nous étudierons donc le confort d'été selon 2 paramètres : la température et l'humidité (cf. §2.1.2).

5.2.1 Le confort d'été

La figure 4-3 présente le taux d'inconfort moyen en été (cf. §2.1.2) dans les différentes pièces instrumentées, classées de la plus confortable à la moins confortable.

On observe que les pièces les moins confortables sont les pièces non rénovées, et situées sous toiture, soit – comme vu au paragraphe précédent - celles présentant une inertie plus faible.

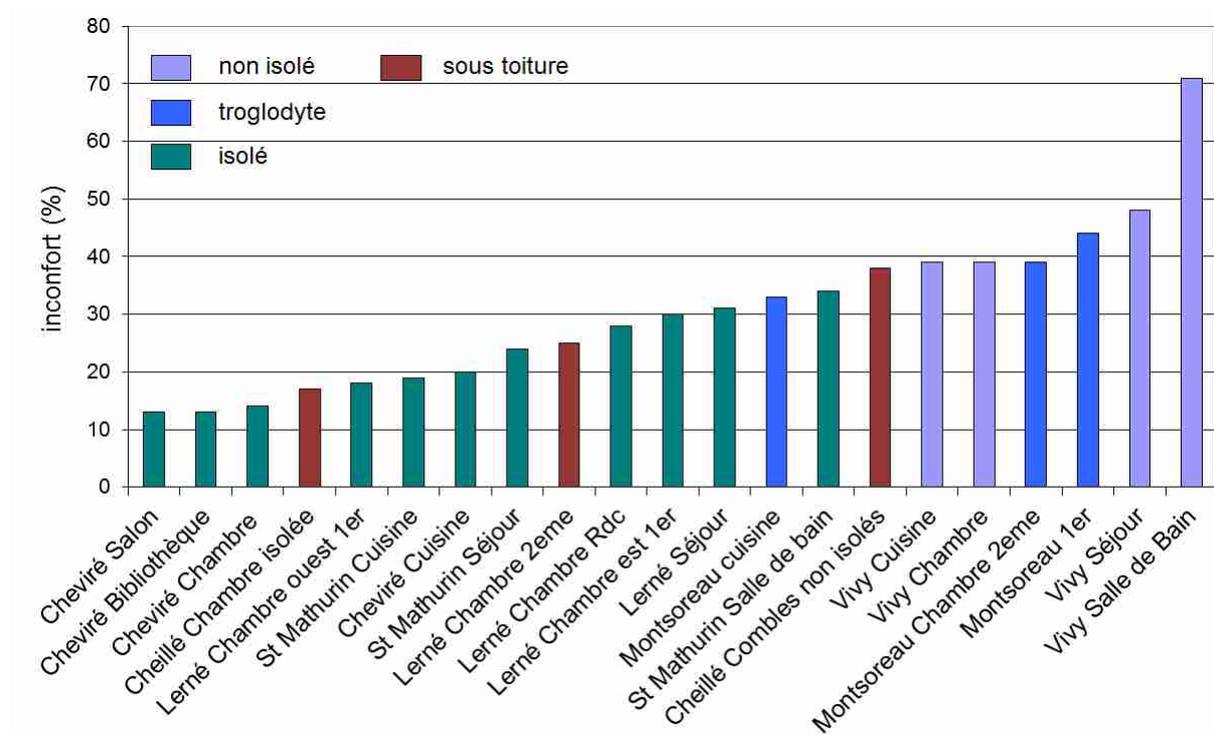


Figure 4-30: Inconfort d'été dans toutes les pièces suivies

La figure 4-4 présente les diagrammes de confort pour différents types de pièces. Ces diagrammes montrent que la source de cet inconfort peut être thermique et / ou hygrique pour les pièces non rénovées (Vivy salle de bain et cuisine) et seulement hygrique pour les pièces rénovées (séjours de Lerné et Cheviré Le Rouge).

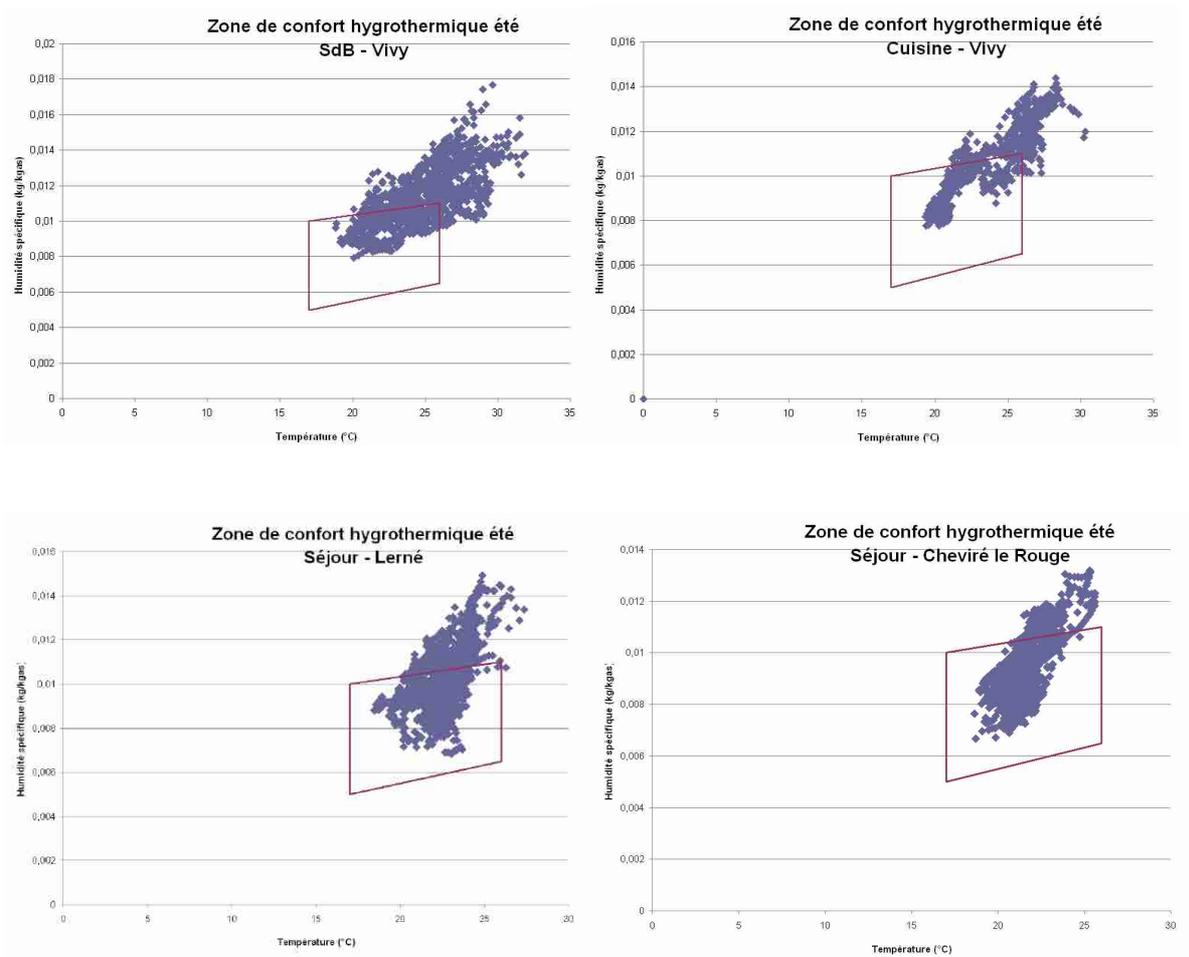


Figure 4-31: Diagrammes de confort d'été dans différents types de pièce

5.2.2 L'évolution du confort au cours de l'année

Dans ce paragraphe, nous traitons de l'évolution du confort et de ses sources au cours de l'année. Nous étudierons un bâtiment non rénové (Vivy) et un bâtiment rénové (Saint Mathurin).

La figure 4-5 présente l'évolution du taux d'inconfort au cours des saisons pour chaque pièce de la maison de maître non rénovée de Vivy. Le taux d'inconfort varie selon les saisons et selon les pièces : de 15% dans le séjour au printemps à 71% dans la salle de bain l'été.

Les diagrammes de confort de la figure 4-6 montrent l'évolution de la source de l'inconfort selon les saisons dans le séjour de Vivy. L'hiver, l'inconfort est dû à un assèchement de l'air alors que l'été l'air est trop humide. A noter que l'inconfort n'est jamais dû à une "surchauffe", même l'été.

Taux d'inconfort moyen par saison (Vivy)

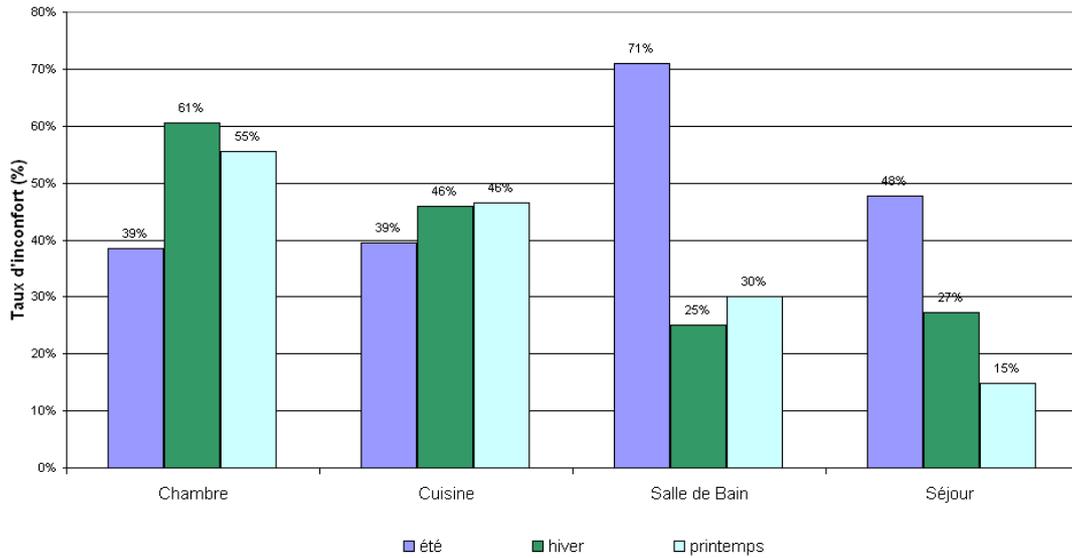


Figure 4-32 : Taux d'inconfort par pièces et par saisons à Vivy

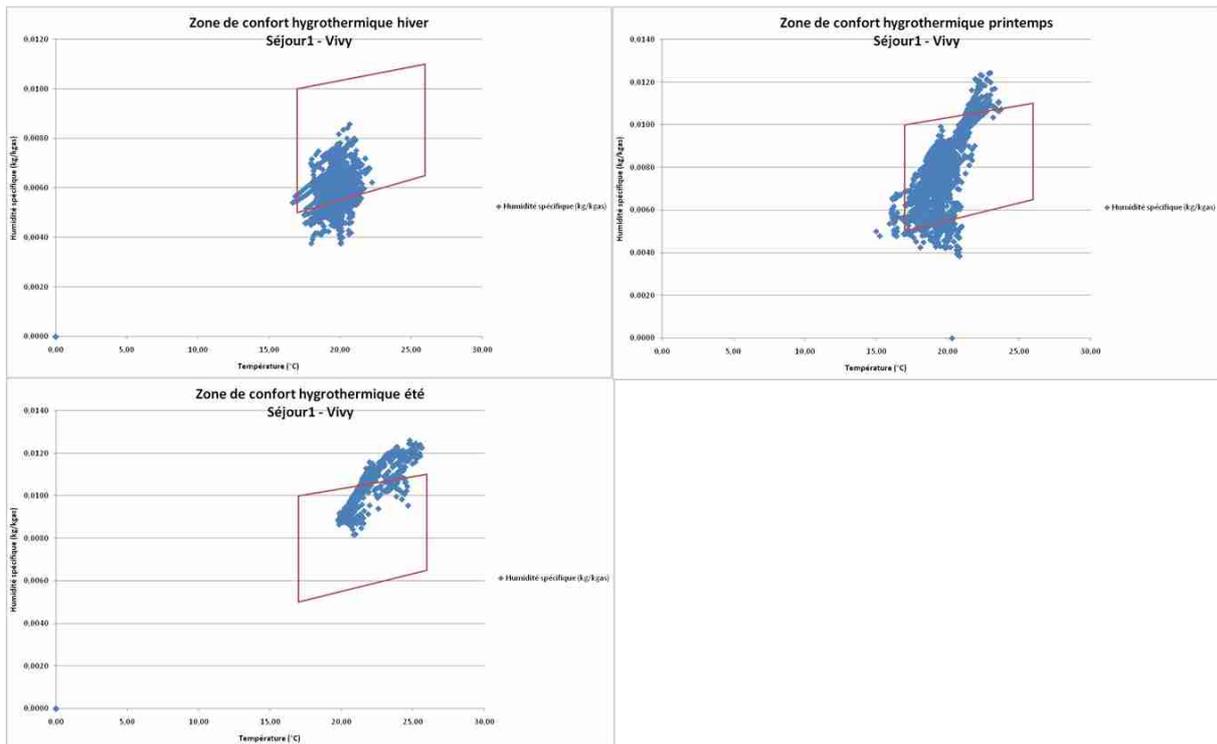


Figure 4-33 : Évolution du confort hygrothermique de l'hiver à l'été dans un bâtiment non isolé

La figure 4-7 présente, pour le bâtiment rénové de Saint Mathurin, les taux d'inconfort pour toutes les pièces instrumentées selon les saisons. L'inconfort mesuré va de 0% dans la chambre lors de l'été 2012 à 76 % dans la salle de bain lors de l'hiver 2011 - 2012. A noter

que les travaux d'isolations ont eu lieu au cours de la période de la mesure et peuvent expliquer en partie les évolutions constatées.

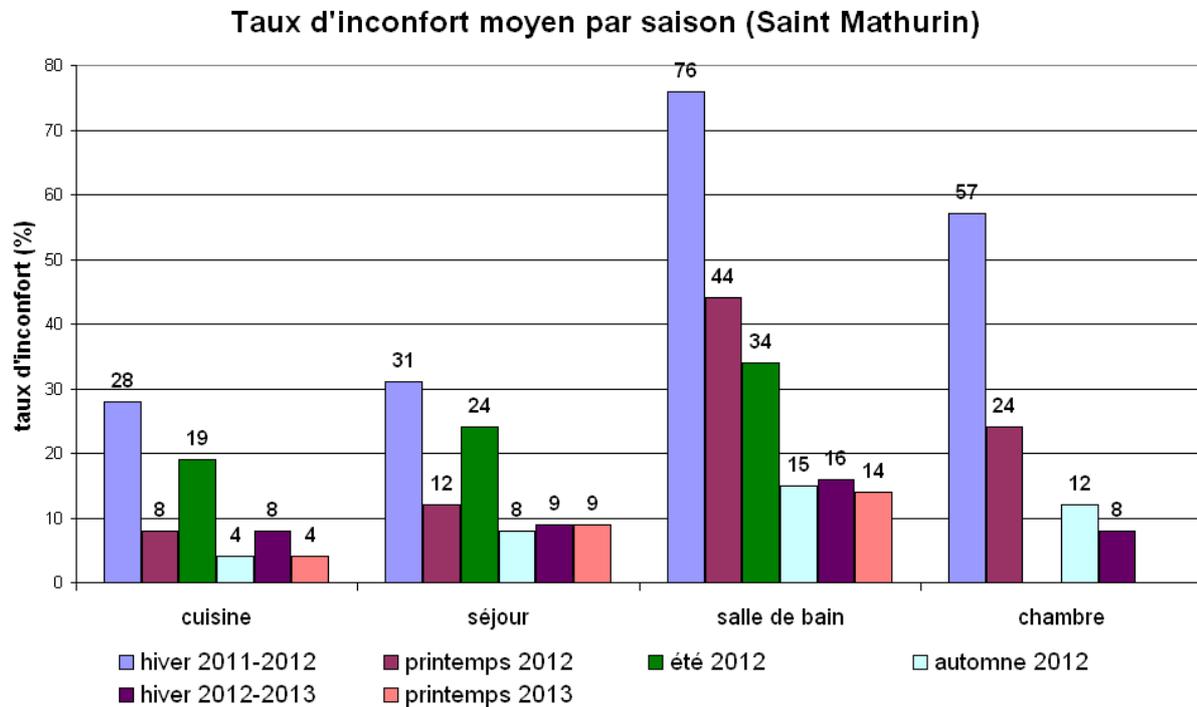


Figure 4-34 : Taux d'inconfort par pièce et par saison à Saint Mathurin

La figure 4-8 présente les diagrammes de confort pour 3 saisons dans le séjour.

On observe les évolutions des sources d'inconfort au cours de l'année : en hiver l'inconfort est principalement lié à une humidité faible (très proche de la limite basse). Au printemps, l'air se situe entre les deux limites d'humidité et enfin en été l'inconfort est lié à une humidité trop élevée. Ceci est à mettre en lien avec l'augmentation de l'humidité spécifique extérieure : l'air extérieur est plus sec en hiver qu'en été.

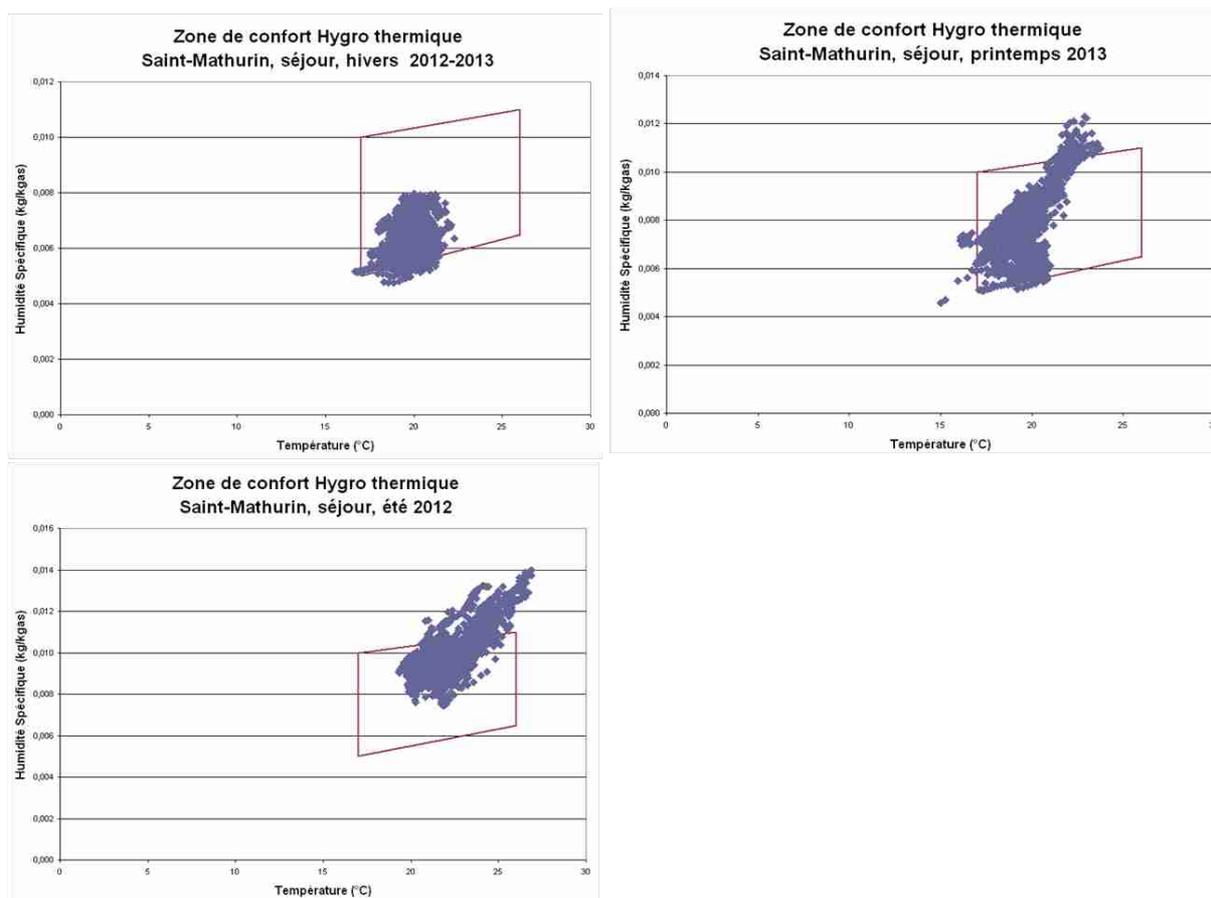


Figure 4-35 : Évolution du confort hygrothermique de l'hiver à l'été dans un bâtiment isolé

5.3 Les transferts hygriques et thermiques dans les parois

Afin de mieux comprendre le comportement des bâtiments en Tuffeau, nous avons mesuré l'évolution des températures et de l'humidité au sein des parois. Nous prendrons - dans ce paragraphe - deux exemples de murs orientés au nord : un bâtiment non rénové (Vivy) et un bâtiment rénové (Saint Mathurin). A noter que les murs nord sont des murs du salon pour les 2 bâtiments. Par contre, à Saint Mathurin, la cuisine est ouverte sur le salon.

5.3.1 Transferts thermiques

Les graphiques 4-9 et 4-10 présentent les températures au sein des parois nord en hiver respectivement à Vivy (non isolé) et à Saint Mathurin (isolé).

A Vivy (Figure 4-9), il s'agit d'un mur de 70 cm d'épaisseur constitué de 2 parois de pierre de taille de 22 cm rempli d'un blocage. L'absence d'isolant implique une évolution progressive de la température au sein du mur entre la température extérieure, celle proche de la surface extérieure (15 cm) et la température au plus profond du mur (40 cm). L'inertie du mur provoque un amortissement des variations des températures extérieures dès 15 cm de profondeur, mais avec un faible déphasage. La température du mur à 40 cm est quant à elle plutôt influencée par les variations de température de l'air intérieur (visible lors de l'arrêt du chauffage du 24/12 au 27/12).

Températures dans le mur nord Vivy

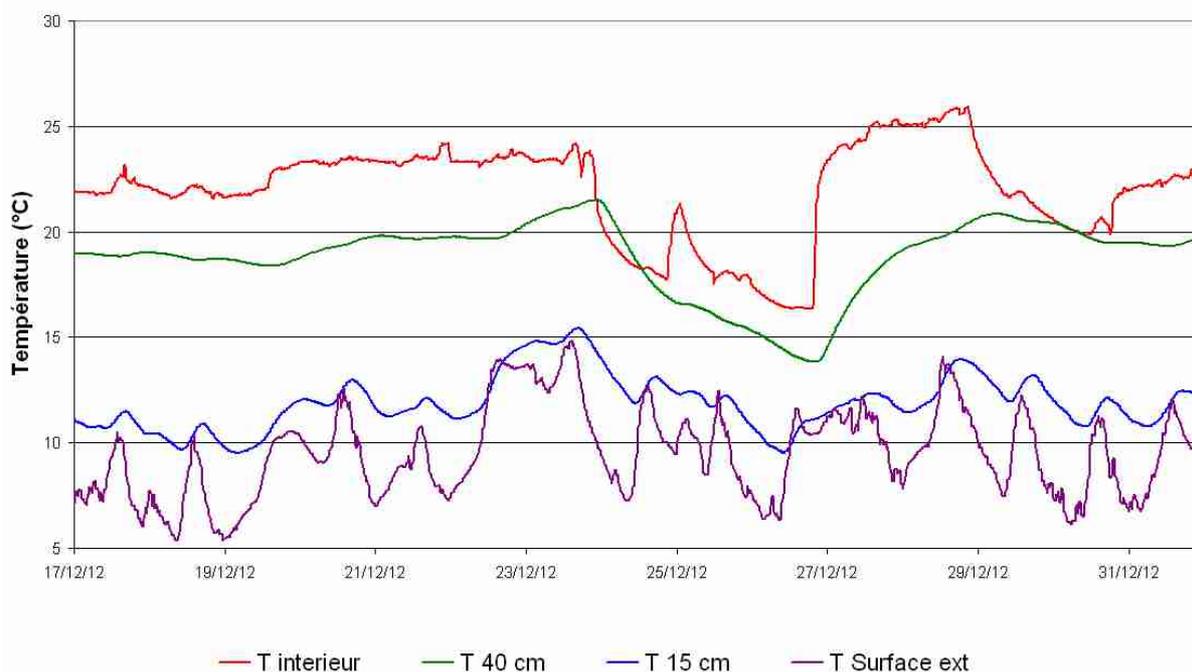


Figure 4-36: Températures dans le mur nord en hiver à vivy (mur non isolé)

température dans le mur nord Saint Mathurin

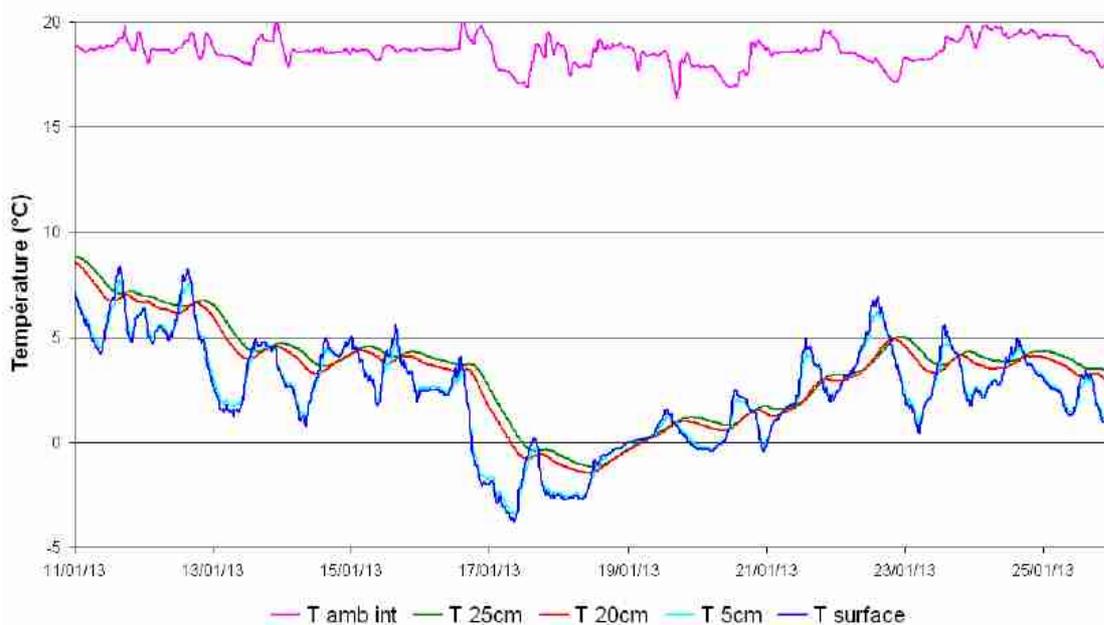


Figure 4-37 : Températures dans le mur nord en hiver à Saint Mathurin (mur isolé)

A Saint-Mathurin (Figure 4-10), il s'agit d'un mur de pierre de taille de 22 cm isolé par 2 couches de laine de chanvre-bois de 10 cm. Dans une paroi isolée, le gradient de température au sein du mur est faible : il n'y a que quelques degrés de différence entre la

température de surface et la température à 25 cm de profondeur (dans l'isolant). Par contre, on observe l'amortissement des variations et un léger déphasage entre la surface et l'intérieur du mur. Du fait de la présence d'un isolant, la température intérieure est très différente des températures au sein du mur et son évolution est complètement déconnectée.

La figure 4-11 présente les températures dans le mur nord du séjour à Vivy, en surface et à des profondeurs de 15 et 40 cm (depuis l'extérieur) durant l'été 2013. On constate un déphasage et un amortissement croissant avec l'épaisseur du mur entre la température extérieure et la température mesurée à 15 cm puis à 40 cm. Le tableau 4-1 présente les amortissements entre la température de surface extérieure et les températures à 15 et 40 cm dans le mur ainsi qu'à l'intérieur du bâtiment. Les calculs ont été effectués pour la journée du 14 juillet 2013 sur les maximums de températures relevées ainsi que sur les minimums.

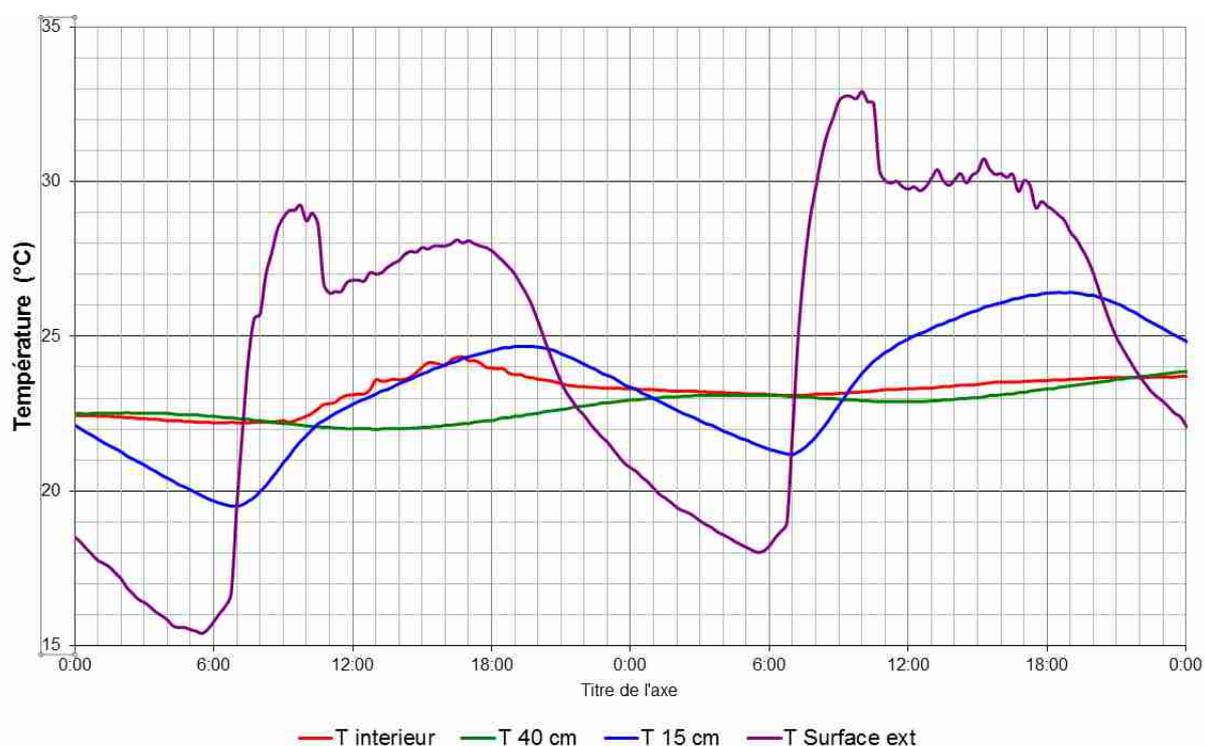


Figure 4-38: : Évolution des températures au sein du mur nord du séjour à Vivy les 14 et 15 juillet 2013

	T 15 cm	T 40 cm	T intérieur
Sur minimum	1h15	7h30	0h45
Sur maximum	2h30	10h	0h15

Tableau 4-1 : déphasage dans le mur nord du séjour à Vivy les 14 et 15 juillet 2013

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

En effet, le déphasage entre les températures d'air intérieur et extérieur provient non seulement de l'ensemble des déphasages de chaque paroi et éléments de parois (y compris les vitrages), mais aussi des éléments de structures intérieurs et enfin du renouvellement d'air (Stephan 2012). Ainsi, à Vivy, le potentiel d'amortissement et de déphasage par la paroi nord est important, mais il est réduit par les menuiseries et un renouvellement d'air important et non maîtrisé.

5.3.2 Transferts hygriques

Les graphiques n° 4-11 et 4-12 présentent les humidités spécifiques au sein des parois nord en hiver respectivement à Vivy (non isolé) et Saint Mathurin (Isolé).

De même que pour la température, on constate à Vivy (non isolé et donc sans pare vapeur) une augmentation progressive de l'humidité dans le mur entre l'humidité extérieure et l'humidité à 40 cm de profondeur. Cette augmentation s'accompagne d'un amortissement et d'un déphasage des variations de l'humidité extérieure.

L'humidité de l'air intérieur est supérieure à l'humidité extérieure mais inférieure à l'humidité à 40 cm de profondeur dans le mur. L'évolution de l'humidité intérieure est déphasée et amortie par rapport à l'air extérieur mais dans une moindre mesure que l'humidité à 40 cm de profondeur dans le mur. Au vu de ces courbes, il semblerait que le mur soit une source d'humidité pour l'air intérieur. La ventilation naturelle par les défauts d'étanchéité permet d'atténuer cette humidité (dans la mesure où l'air extérieur est moins humide).

Humidité spécifique du mur nord - Vivy

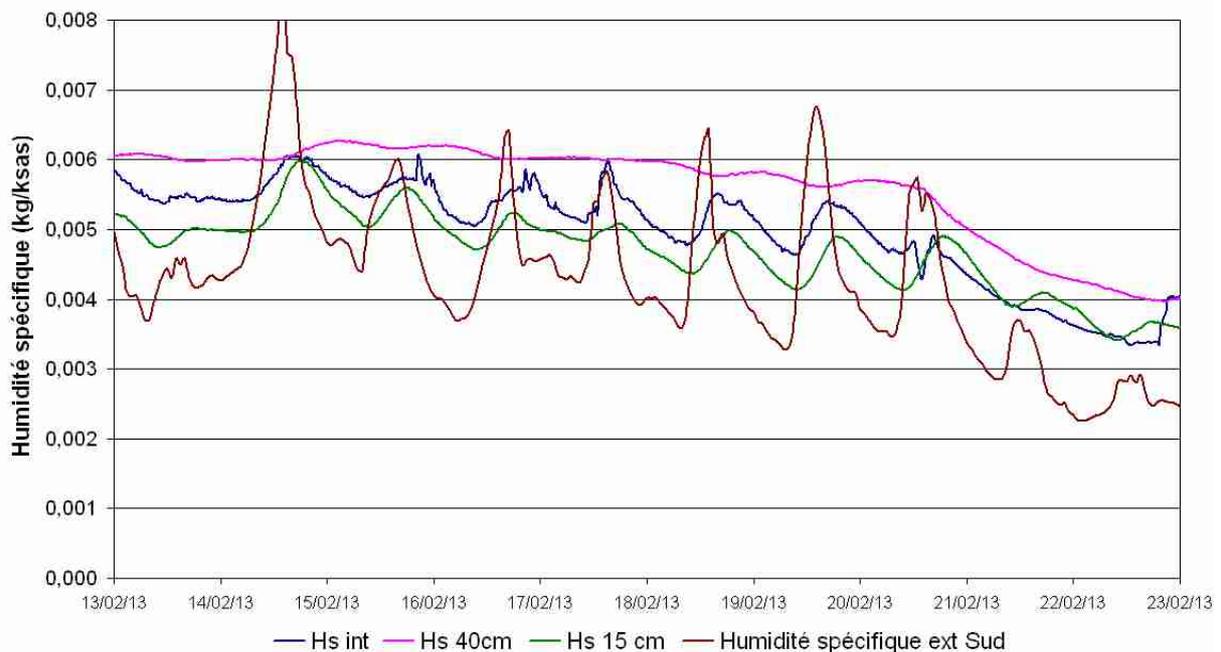


Figure 4-39: humidité spécifique dans le mur nord en hiver à Vivy

A Saint Mathurin, de même que pour la température, on constate un amortissement et déphasage dans le mur qui augmente au fur et à mesure que l'on se rapproche de l'intérieur. Par contre, on observe un découplage entre ce qui se passe dans le mur et l'humidité intérieure du fait de la présence d'un pare vapeur. A noter que l'humidité à l'intérieur est supérieure à l'humidité extérieure. La source d'humidité n'étant pas le mur (de part la présence d'un pare vapeur), il semblerait que celle-ci provienne de la cuisine.

Humidité spécifique dans le mur nord St Mathurin

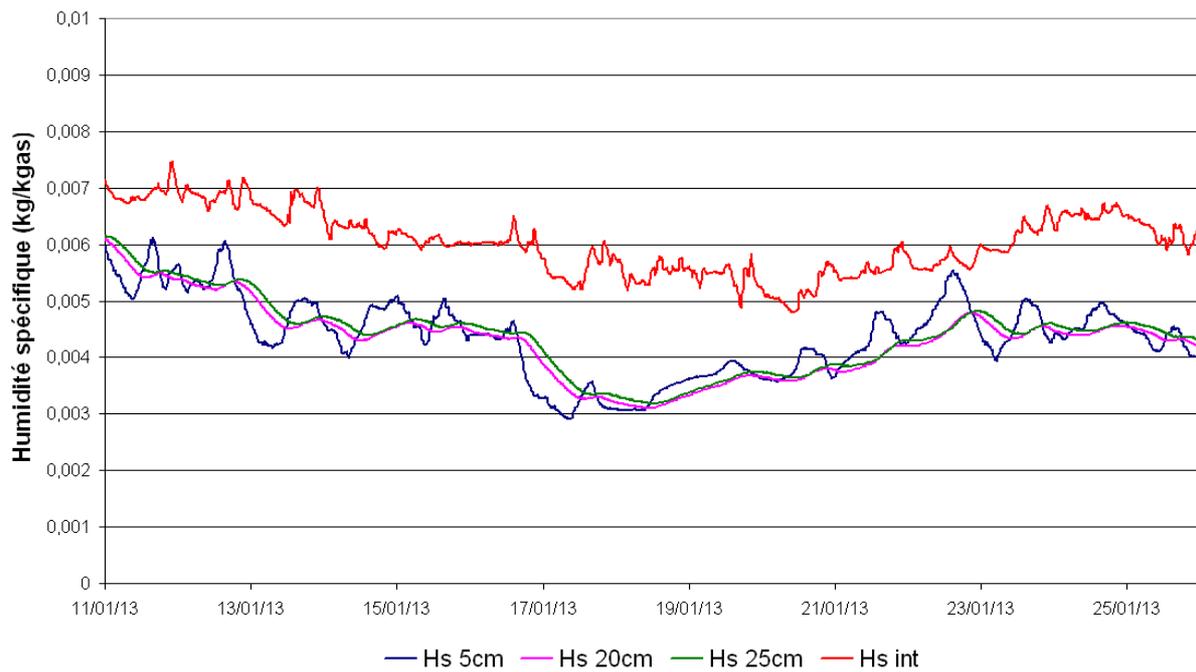


Figure 4-40: Humidité spécifique dans le mur nord à Saint Mathurin

5.4 Analyse

Remarque préalable :

- rappelons que seuls des bâtiments rénovés avec des matériaux biosourcés (enduits chaux-chanvre, laine de chanvre, etc.) ont été suivis,
- chaque cas étant particulier et les paramètres nombreux, il est difficile de tirer des conclusions générales sur la façon dont ont été rénovés les bâtiments.

Il a été constaté dans les bâtiments en tuffeau un amortissement et un déphasage thermiques spécifiques. Cette inertie permet la plupart du temps d'éviter des surchauffes en été. Il apparaît que cette inertie est supérieure dans les bâtiments rénovés, même avec une isolation par l'intérieur. Deux phénomènes peuvent l'expliquer :

- la pose d'isolant, même par l'intérieur, diminue grandement la diffusivité de la paroi (pas par sa masse volumique, mais par son λ faible), car le mur de départ a une diffusivité élevée et peu d'inertie. Le caractère isolant améliore donc le déphasage et l'amortissement.
- un des facteurs influant sur ces caractéristiques de l'inertie est le renouvellement d'air (STEPHAN 2012). Or la plupart du temps, la rénovation permet d'améliorer l'étanchéité à l'air et donc de réduire le renouvellement naturel. Dans le cas des bâtiments suivis, en l'absence de ventilation mécanique, la meilleure étanchéité et l'utilisation de matériaux d'isolation appropriés, pourraient expliquer l'amélioration de l'inertie.

Cependant, le confort dans les bâtiments ne tient pas qu'à la température, et l'analyse des diagrammes hygrothermiques montre que les bâtiments en tuffeau ne sont pas aussi confortables que l'on pourrait le penser au vu de leur inertie. Sur la base des cas suivis, les bâtiments en tuffeau paraissent inconfortables à cause de l'excès d'humidité en été et du manque d'humidité en hiver.

A noter que la plupart des bâtiments suivis ne présentaient pas de ventilation mécanique.

6 Conclusion

S'il est difficile de tirer des conclusions définitives sur la manière de réhabiliter les bâtiments en tuffeau, il apparaît cependant que la gestion de l'humidité est l'une des pistes prioritaires à examiner pour assurer la pérennité de l'ouvrage et le confort de ses occupants.

Le matériau tuffeau a un rapport très singulier à l'humidité, qu'elle provienne de l'air ou du sol. S'il est capable de capter l'eau en grande quantité, le tuffeau peut aussi voir ses propriétés thermiques se dégrader si son accumulation est prolongée. Ceci souligne l'importance d'un diagnostic préalable et adapté à chaque situation rencontrée, car le bâti ancien est plus que tout autre influencé et pensé selon son contexte local. Il doit en être de même pour sa réhabilitation.

Sur la base des bâtiments instrumentés au cours de l'étude, les matériaux biosourcés semblent constituer une alternative intéressante pour isoler les parois en tuffeau, à condition d'avoir pris en compte au préalable la présence historique de l'eau.

Les cahiers annexés à cette étude livrent de nombreux éléments d'analyse scientifique sur les phénomènes observés dans des maisons réhabilités (test de perméabilité, thermographie infra-rouge, mesures de température et humidité...). Ils sont le témoignage des techniques pouvant être appliquées, avec plus ou moins de réussite, en réhabilitation. Et si les jugements peuvent parfois sembler sévères, il faut se rappeler que l'on ne soumet pas toujours les autres chantiers à une telle batterie de tests. Ces cahiers, que nous vous invitons à parcourir, fournissent une formidable base de données dont l'exploitation pourra être poursuivie dans les années qui viennent, pour avancer encore dans la compréhension de cette pierre si singulière qu'est le tuffeau.

7 Bibliographie

BARET Yves, "traiter l'humidité", Eyrolles 2011

BECK, K. (2006). *Étude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altérations de pierres calcaires à forte porosité*. Thèse de doctorat, Université d'Orléans.

BERNARD Pierre A. L'inertie, facteur d'économie de chauffage. Le Moniteur, avril 1979

CANTIN, R., BURGHOLZER, J., GUARRACINO, G., MOUJALLED, B., TAMELIKECHT, S., & ROYER, B. G. (2010). Field assessment of thermal behaviour of historical dwellings in France. *Building and Environment*, vol. 45, pp. 473-484.

CSTB 2006. French thermal regulation.2005 Th-U method

DGUHC / CETE de l'Est / DGCB-LASH / MP. Connaissance des bâtiments anciens et économies d'énergie. Rapport de synthèse, août 2007

GRAULIERE, P. (2006). *Typologie des bâtiments d'habitation existants en France. Synthèse des caractéristiques des bâtiments d'habitation existants permettant l'évaluation du potentiel d'amélioration énergétique*. Rapport de synthèse, Energies Demain.

HYGROBA, « Etude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes, cahier 0 », CETE de l'est février 2013.

JACQUOT, A. (2003). *De plus en plus de maisons individuelles*. INSEE.

MP, D. /-L. (2010). *Connaissance des bâtiments anciens et économies d'énergie*. Rapport de synthèse.

PNRLAT , Fiches techniques du patrimoine bâti du Parc Naturel Régional Loire Anjou Touraine : http://planclimat.alkante.com/accueil_plan_climat_territorial/habitat/habitat_fiches_techniques

PRIGENT Daniel. La pierre de construction et sa mise en œuvre : l'exemple de l'Anjou, Utilis est lapis in structura – Mélanges offerts en hommage à Léon Pressouyre, CTHS, Paris, 2000.

STEPHAN Emma; CANTIN Richard; MICHEL Pierre; CAUCHETEUX Antoine; TASCA-GUERNOUTI Sihem, "Évaluation de l'impact d'une isolation thermique sur le confort d'été et les besoins énergétiques d'un bâtiment ancien", IBPSA France juin 2012

8 Annexes : description des sites instrumentés

8.1 Maison de maître à Vivy



- Année de construction : partie XVIème et partie XIXème (cuisine)
- Orientation du bâtiment : Nord/Sud
- Particularités : finition des encadrements, grand volume, cave en voute sous une partie de la maison
- Type de parois : double parement en pierre de taille, sauf au droit de quelques niches et soubassement de fenêtre (simple parement)
- Épaisseurs des parois : jusqu'à 65cm
- Pathologies observées : absence de joints sur certain parement, quelques moisissures sur les parois exposées à la pluie
- Isolation : paroi non isolée
- Nombre d'étages : 1
- Système de chauffage : chaudière fioul et radiateurs + foyer ouvert
- Système de ventilation : simple flux
- Divers : présence de deux cheminées avec trappe de fermeture + four à pain accolé au pignon est
- Projet de réhabilitation (isolations, changements de menuiseries) : sans objet

8.2 Maison de bourg à St-Mathurin-Sur-Loire



- Année de construction : antérieure au XIXe siècle
- Orientation du bâtiment : Nord/Sud
- Particularités : rénovation en cours pour objectif BBC rénovation
- Type de parois : la maison est composée de 2 bâtiments accolés. Le premier, côté rue, est entièrement monté en pierre de taille de tuffeau (simple-

parement). Le second est en calcaire gréseux et silex au niveau du rez-de-jardin.

- Épaisseurs des parois : 18 à 22cm
- Pathologies observées : forte dégradation des murs liés à la présence, avant rénovation, d'un enduit ciment .
- Isolation : parois isolées par 20cm de laine de chanvre et bois avec PV. Les combles sont isolées par 40cm de ouate de cellulose en vrac.
- Nombre d'étages : 1
- Système de chauffage : chaudière bois à accumulation
- Système de ventilation : double flux
- Divers : présence d'une cheminée avec trappe de fermeture + four à pain interne

8.3 Grange rénovée au Coudray-Macouard



- Année de construction : XVIIIème,
- Orientation du bâtiment : Nord/Sud
- Typologie : Maison de bourg
- Particularités : Maison entièrement remontée entre 2006 et 2010
- Type de parois : mixte moellons et pierres de taille
- Épaisseurs des parois : 55cm (moellons) et 22cm (pierres de taille)
- Pathologies : légères remontées capillaires sur la façade Sud
- Isolation des parois : enduit chaux-chanvre 10-12cm sur certaines parois
- Nombre d'étages : 1
- Système de chauffage : chauffage et plancher chauffant via une PAC air/eau + foyer ouvert
- Système de ventilation : VMC simple flux
- Divers (présence de cheminées, aération naturelle nocturne...) : ventilation naturelle, présence d'une cheminée avec clapet
- Projet de réhabilitation (isolations, changements de menuiseries, de systèmes de chauffage...) : sans objet

8.4 Gîte collectif, Lerné



- Année de construction : XVIème
- Orientation du bâtiment : Ouest/Est
- Typologie : Maison rurale
- Particularités : Gîte, ancienne grange
- Type de parois : moellons double parement
- Épaisseurs des parois : 55cm
- Pathologies : sans objet
- Isolation : contre-cloison en plaques de gypse, isolants souples : laine chanvre/lin/coton et en vrac : chenevotte
- Nombre d'étages : 2
- Système de chauffage : chaudière bois et panneaux solaires
- Système de ventilation : VMC Double flux
- Divers (présence de cheminées, aération naturelle nocturne...) : sans objet
- Projet de réhabilitation (isolations, changements de menuiseries, de systèmes de chauffage...) : non

8.5 Maison rurale, Cheviré le Rouge



- Année de construction : partie XVIème, partie XIXème, partie moderne
- Orientation du bâtiment : Nord/Sud
- Typologie : Maison rurale
- Particularités : exposée sur une butte, cave sous la partie XIXème
- Composition des parois : partie XVIème en moellons, partie XIXème en pierre de taille simple parement, partie moderne en brique « Monomur »
- Épaisseurs des parois : 65cm et 22cm et 37cm
- Pathologies : légères traces d'humidité constatées au Sud
- Isolation des parois : 7cm d'enduit chaux-chanvre dans les parties XVIème et XIXème
- Nombre d'étages : 1
- Système de chauffage : géothermie et poêle à bois
- Système de ventilation : /
- Divers (présence de cheminées, aération naturelle nocturne...) : ventilation naturelle
- Projet de réhabilitation (isolations, changements de menuiseries, de systèmes de chauffage...) : aménagement de l'étage et éventuellement ITE au Nord

8.6 Maison de bourg à Gizeux



- Année de construction : probablement construite avant le XIXe siècle
- Orientation du bâtiment : Nord/Sud
- Typologie : Maison de bourg
- Particularités : Mitoyenneté au Nord et à l'Est ; non habitée
- Parement : mur de moellons double parement sauf au Sud (pierre de taille simple parement)

- Épaisseurs des parois : 50cm et 22cm au Sud
- Pathologies : condensation en pied de mur
- Isolations : lame d'air + briques plâtrières et enduit plâtre
- Nombre d'étages : comble habitable non aménagés
- Système de chauffage : cheminée
- Système de ventilation : /
- Divers : présence d'un four à pain derrière la cheminée
- Projet de réhabilitation (isolations, changements de menuiseries, de systèmes de chauffage...) : réhabilitation et isolation complète de la maison

8.7 Maison semi-troglodyte à Montsoreau



- Année de construction : sur le cadastre napoléonien (avant 1813)
- Orientation du bâtiment : Sud en flanc de colline
- Typologie : Maison de bourg
- Particularités : une partie de la cuisine troglodyte (cf. photos)
- Type de parois : moellons double parement jointoyées à la chaux (enduit en soubassement)
- Épaisseurs des parois : 55cm
- Pathologies : remontées capillaires (cf. photos) et humidité importante ressentie (avec traces d'humidité au niveau des joints à l'intérieur)
- Isolation : nu au rez de chaussée
- Nombre d'étages : 2
- Système de chauffage : radiateur sur pompe à chaleur air/eau + four à pain
- Système de ventilation : sans
- Divers (présence de cheminées, aération naturelle nocturne...) : sans objet
- Projet de réhabilitation (isolations, changements de menuiseries, de systèmes de chauffage...) : isolation des parois envisagées

8.8 Maison rurale à Cheillé



- Année de construction : XVIème
- Orientation du bâtiment : Nord/Sud
- Typologie : Maison rurale
- Particularités : une partie de l'étage n'est pas encore réhabilité, l'appentis en basse goutte au Nord fait office d'espace tampon
- Type de parois : moellons double parement enduit à la chaux
- Épaisseurs des parois : 55cm
- Pathologies : sans objet
- Isolation : 26cm de béton chaux-chanvre banché en toiture, murs nus
- Nombre d'étages : 1
- Projet de réhabilitation (isolations, changements de menuiseries) : aménagement du reste de l'étage

9 Cahiers annexes

Cahier 1 : Maison de maître à Vivy

Cahier 2 : Maison de bourg à Saint-Mathurin sur Loire

Cahier 3 : Grange rénovée au Coudray-Macouard

Cahier 4 : Gîte rural à Lerné

Cahier 5 : Maison rurale à Cheviré Le Rouge

Cahier 6 : Maison de bourg à Gizeux

Cahier 7 : Maison semi-troglodyte à Montsoreau

Cahier 8 : Maison rurale à Cheillé

Cahier 9 : Villaine Maurusseaux

Cahier 10 : Le Puy Notre Dame

Cahier 11 : Clefs

Cahier 12 : Forges

Cahier 13 : Saint Martin de la Place

Cahier 14 : Langeais

Cahier 15 : Varennes

Cahier 16 : Vieux Vivy

Direction régionale
de l'environnement,
de l'aménagement
et du logement

5 rue Françoise Giroud
CS 16326
44263 NANTES Cedex 2
Tél : 02 72 74 73 00
Fax : 02 72 74 73 09

directeur de publication :
Hubert Ferry-Wilczek

ISSN : 2109-0017