

Projet PiséDurable

Rapport final

ENTPE : Antonin Fabbri, Joachim Blanc Gonnet, Stéphane Cointet, Fionn McGregor

RA2 : Vincent Rigassi

Domus Energies : Dominique Taullé

Entreprise de maçonnerie : Nicolas Meunier

Date : 15/11/2017

I. Table des matières

I.	Rappel des objectifs du projet.....	4
	Contexte	4
	Nature et description de l'opération.....	4
II.	Etude de faisabilité de construction de 4 logements en pisé	5
III.	Etude du comportement réel d'habitations en pisé	6
	Présentation générale des cas d'études	6
	Instrumentation de la maison de Chasselay	7
	Instrumentation de la maison de St Antoine (Isère)	13
IV.	Conclusion	18

II. Rappel des objectifs du projet

Contexte

Dans un contexte général de réchauffement climatique et de raréfaction des ressources, l'utilisation des matériaux locaux contenant de l'argile permettraient d'offrir un mode constructif alternatif particulièrement attractif. En effet, ces matériaux abondants ne sont pas transformés industriellement, tandis que leur mise en œuvre ne génère pas de déchet et est largement moins énergivore que celle de la chaux, des briques cuites ou du ciment.

Cependant, malgré le retour d'expérience provenant du large parc immobilier européen des constructions en terre et montrant de bonnes caractéristiques mécaniques, thermiques et hydriques, ce mode constructif pour la réalisation d'habitations neuves reste marginal. Ceci est principalement dû à la complexité associée à leur comportement qui conduit à préférer d'autres matériaux de constructions, écologiquement moins performants, mais bénéficiant de procédures de tests normalisés et réputés plus performant thermiquement et structurellement.

Un autre problème concerne la réhabilitation et la rénovation des constructions en terre crue. En effet, la méconnaissance du comportement du matériau peut conduire à appliquer des solutions classiques pour les autres matériaux de construction, mais qui peuvent s'avérer préjudiciables dans le cas du pisé. Un exemple fréquent est l'utilisation d'enduits intérieurs et extérieurs imperméables à la vapeur et/ou l'utilisation de systèmes isolant non perspirants. Dans ce cas, le mur ne peut plus réguler sa teneur en eau, cette dernière peut alors atteindre des niveaux extrêmes (causés par des micro-remontées capillaires ou des micro-fuites) ne permettant plus au mur d'assurer l'intégrité mécanique du bâtiment.

Partant de ces constats, l'ambition du projet est de lever le verrou actuel de la méconnaissance des performances hygrothermiques des murs en pisé lorsqu'ils sont non enduits par des matériaux imperméables à la vapeur. Le but est de démontrer que la présence de tels murs peut être un atout pour la performance thermique et la qualité de l'air intérieur des habitations, et est compatible avec les exigences de confort actuelles.

Nature et description de l'opération

Initialement, l'étude comprenait quatre volets complémentaires

- La conception d'une habitation en pisé en visant la conformité à la RT 2012, ceci en travaillant à la fois sur les rapports de volumétrie de l'enveloppe, sur la nature des constituants de l'enveloppe et sur l'exposition aux apports et déperditions thermiques.
- La réalisation d'une construction en pisé conforme à la RT 2012.
- L'étude du comportement réel, « en service », des habitations en terre.
- La diffusion et la valorisation des travaux.

Cependant, comme cela est expliqué plus en détail au §II de ce rapport, la réalisation d'une construction n'a pas été possible. Il a donc été décidé, en accord avec la région Auvergne-Rhône-Alpes, de réorienter le projet en le centrant sur la pré-étude réalisée sur le projet ACTIS ainsi que sur la partie suivi thermique des bâtiments existants. Ces deux parties sont présentées plus en détails dans les sections II et III de ce rapport.

III. Etude de faisabilité de construction de 4 logements en pisé

Le projet a été validé en septembre 2015, dès lors les différents partenaires du projet ont prospecté pour trouver un maître d'ouvrage susceptible de commanditer une construction en pisé.

Compte tenu du délai entre l'émergence de la proposition de projet et la validation, le maître d'ouvrage pressenti initialement pour la construction d'une maison individuelle a modifié ses projets.

En octobre 2015 nous avons eu des contacts positifs avec un bailleur social : ACTIS office HLM de la ville de Grenoble qui disposait d'un terrain sur la commune de La Terrasse en Isère.

Suite à des contacts avec la commune, leur architecte conseil et l'instructeur de la communauté de communes nous avons pu établir les bases pour réaliser un projet architectural répondant aux attentes de la commune, du règlement d'urbanisme et du maître d'ouvrage pour la réalisation de 4 logements. Ce projet a ensuite été présenté avec les partenaires du projet. Une étude thermique a également été réalisée afin d'optimiser la conception pour la conformité à la RT 2012. Suite de cela une estimation des coûts de travaux a été établie, tenant compte du chiffrage spécifique aux travaux pisé et à une estimation sur les autres corps d'état. Les résultats de cette étude de faisabilité sont reportés en annexe 1.

Cette faisabilité a été présentée en mars 2016 à Actis. Début mai 2016 le comité d'engagement de Actis n'a pas pu confirmer le projet compte tenu du coût, ne pouvant s'engager au-dessus d'un montant de 1260€ HT / m² Shab or notre estimation d'un projet de 4 logements était au minimum à 1400 € HT/ m² Shab même en construction conventionnelle. Le problème du coût n'est donc pas dû à l'utilisation du pisé, mais à la petite taille de l'opération (4 logements) qui ne peut s'équilibrer compte tenu des difficultés de financement de l'habitat social en zone rurale (zone 2). Néanmoins, cette étude a démontré qu'il était possible de réaliser des constructions comportant des murs en pisé et conformes avec la RT2012.

IV. Etude du comportement réel d'habitations en pisé

Présentation générale des cas d'études

Afin d'étudier le comportement réel, « en service », des habitations en terre, nous nous sommes appuyés sur deux maisons individuelles, construites en 2010 (Figure 1) et 2011 (Figure 2).



Figure 1 : Maison à Chasselay, (Rhône) construite en 2010.



Figure 2 : relevé des données de la maison de St Antoine (Isère), construite en 2011.

Les systèmes de chauffage, d'eau chaude sanitaire, d'éclairage et auxiliaires pour chacune des deux habitations sont reportées au tableau 1.

SYSTEMES RT 2012	St Antoine	Chasselay
Chauffage	poêle bouilleur à buche	poêle à buche
Eau Chaude Sanitaire	Chauffe eau solaire individuel (CESI) avec appoint électrique et appoint par poêle bouilleur (non fonctionnel aujourd'hui)	Chauffe eau solaire individuel avec appoint électrique
Eclairage	standard	standard et biotique
Auxiliaires	ventilation par ouverture des baies (pas de VMC) circulateur solaire	ventilation par ouverture des baies (pas de VMC) circulateur solaire

Tableau 1. Présentation des « systèmes RT 2012 » mis en place dans les deux habitations étudiées.

Un calcul de conformité à la RT2012 de chacune de ses deux habitations a été réalisées. Les résultats, reportés dans un rapport complémentaire, ont montré que les deux habitations n'étaient pas conformes à la RT2012, et cela quel que soient les hypothèses de calculs qui ont été faite sur les paramètres pour lesquels nous n'avions pas de données fiables (tels que les ponts thermiques).

Cependant, le changement du système de chauffage par des systèmes moins pénalisés que les poêles à buche permettrait de se rapprocher de la limite imposée par la RT2012, et cela pour les deux habitations.

Instrumentation de la maison de Chasselay

La maison de Chasselay a été instrumentée durant la première année du projet afin d'avoir le suivi des consommations ainsi que l'évolution des températures et humidité relative extérieures ainsi que dans certaines pièces de la maison.

Les consommations en chauffage sont estimées par mesure de la masse du bois à chaque remplissage de chacun des 4 stockages intermédiaires dans le garage. La mesure est réalisée à partir d'une brouette aménagée pour pouvoir être portée sur une balance (précision 0,1kg). Les résultats sont reportés au Tableau 2. Pour information, le contenu énergétique du bois sec type feuillu est de 3.9 kWh/kg (soit 2.5 kg de bois est équivalent à 1 litre de fioul).

stockage gauche haut				
	masse bois kg	date et heure début	date et heure fin	humidité moyenne %
1	236,8	07/10/2016 - 20H	04/11/16- 16h	
2	209	13/12/16 -13h	21/12/16- 7h	
3	276,95	18/01/17 -20 h	27/01/17- 14 h 30	
4	229	07/03/2017 -22h	27/04/17 -22h	

stockage droit haut				
	masse bois kg	date et heure début	date et heure fin	humidité moyenne %
1	230,4	20/11/16-18h	05/12/16-13h	
2	216,9	03/01/17-19h	10/01/17-20h	
3	246,1	07/02/17-1h	21/02/17-20h	

stockage gauche bas				
	masse bois kg	date et heure début	date et heure fin	humidité moyenne %
1	245,9	4/11/16-16h	19/11/16-22h	
2	282,8	21/12/16-9h	02/01/17-22h	
3	208,85	27/01 -16 h	06/02/17-21h	
4	98	28/04/17 -20 h	mai	

stockage droit bas				
	masse bois kg	date et heure début	date et heure fin	humidité moyenne %
1	222,6	05/12/16-22h	13/12/16-12h	
2	221,55	10/01/17-21h	18/01/2017-19h	
3	203,75	21/02/17-21h	07/03/17-20h	

Tableau 2. Mesure de la consommation du bois de chauffage.

Les consommations en eau chaude sanitaire, l'appoint de chauffage électrique et les consommation d'éclairage sont mesurés via un compteur de mesure de courant (raccordement selon la norme de la NCF 15-100).

Les mesures des température et humidité relative sont réalisées via des capteurs radio WLCE-25 de la marque WAGO.

L'ensemble des données mesurées sont directement accessibles en ligne à l'adresse <http://prt-chasselay.dyndns.org/sd/dataplotter/dataplotter.html>.

Le plan d'instrumentation est reporté aux Figures 3 et 4. Le capteur de température et humidité relative extérieur est placé en paroi nord. Ce positionnement a été choisi afin de limiter les effets du rayonnement solaire sur les mesures. Pour comparaison, un autre capteur extérieur a été placé en paroi ouest (noté « salon ext » sur la Figure 3).

Afin d'étudier l'impact de la production d'humidité sur les températures, des capteurs ont été placés dans la salle de bain et dans la cuisine, qui sont les pièces dans lesquelles la production d'humidité est susceptible d'être la plus importante.

Enfin, deux capteurs ont été placés dans le salon et un capteur a été placé dans chaque chambre, l'une étant constamment occupée et l'autre quasiment jamais. Cette seconde chambre (« CH2 ») n'est d'ailleurs quasiment jamais chauffée et est donc très humide en hiver.

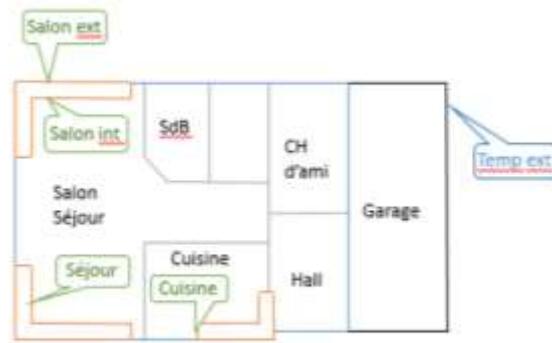


Figure 3. Plan d'instrumentation du rez-de-chaussée de la maison de Chasselay

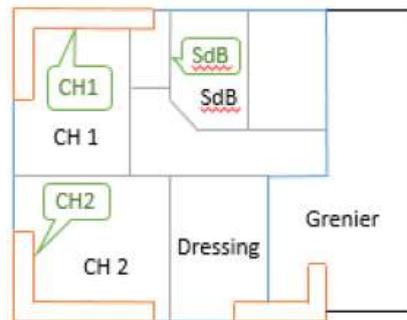


Figure 4. Plan d'instrumentation du 1^{er} étage de la maison de Chasselay

Afin de récupérer les données, les mettre en forme et corriger les entrées défectueuses, un programme a été réalisé sous Matlab. Les résultats obtenus en décembre 2016 sont reportés en Figures 5 (températures), 6 (humidité relative), 7 (pressions de vapeur) et 8 (consommations). Les résultats obtenus en juin 2017 sont quant à eux reportés en figures 8, 9, 10 et 11.

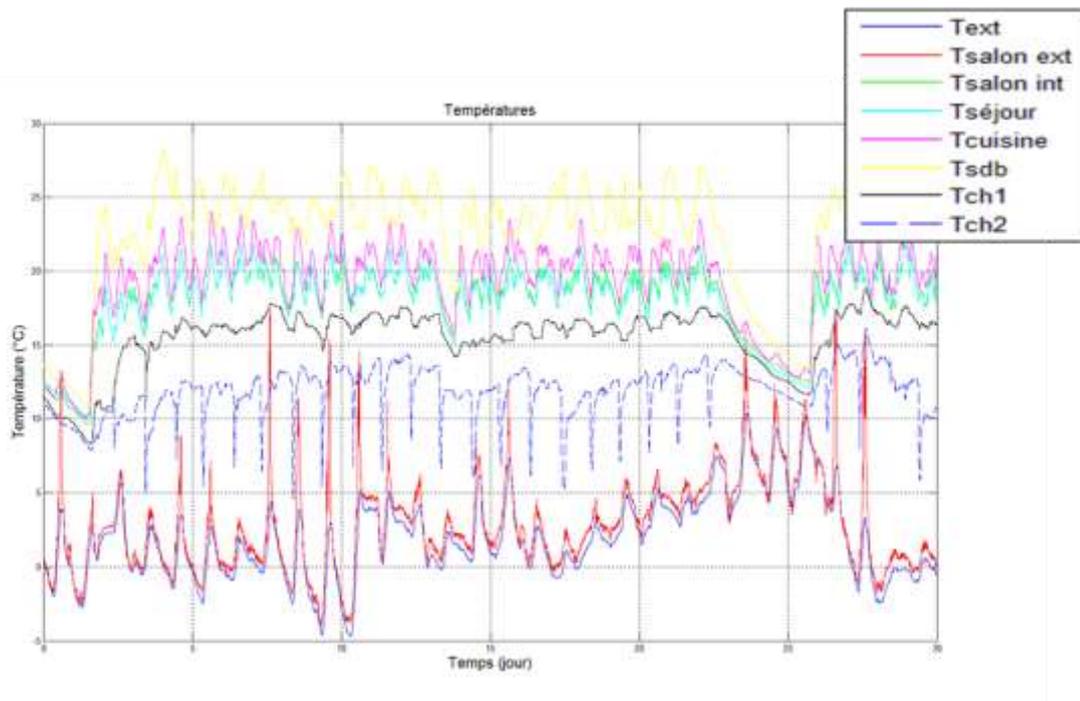


Figure 5. Evolution des températures extérieures et dans les pièces instrumentées entre le 1 décembre et le 30 décembre 2016.

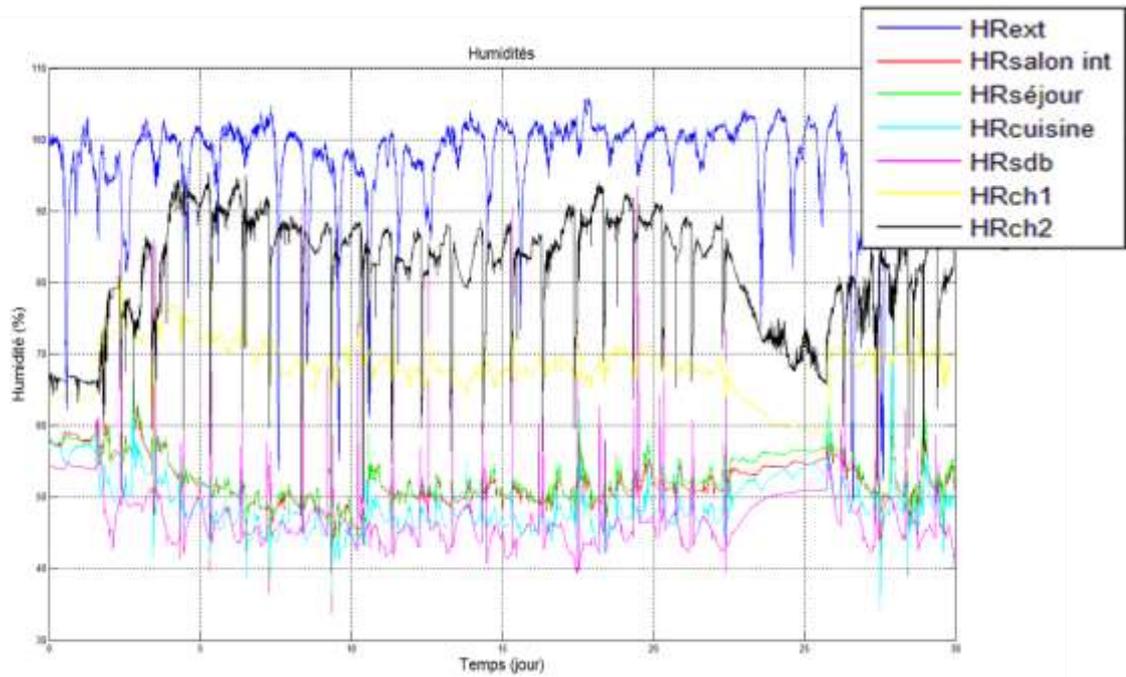


Figure 6. Evolution des humidités relatives extérieures et dans les pièces instrumentées entre le 1 décembre et le 30 décembre 2016.

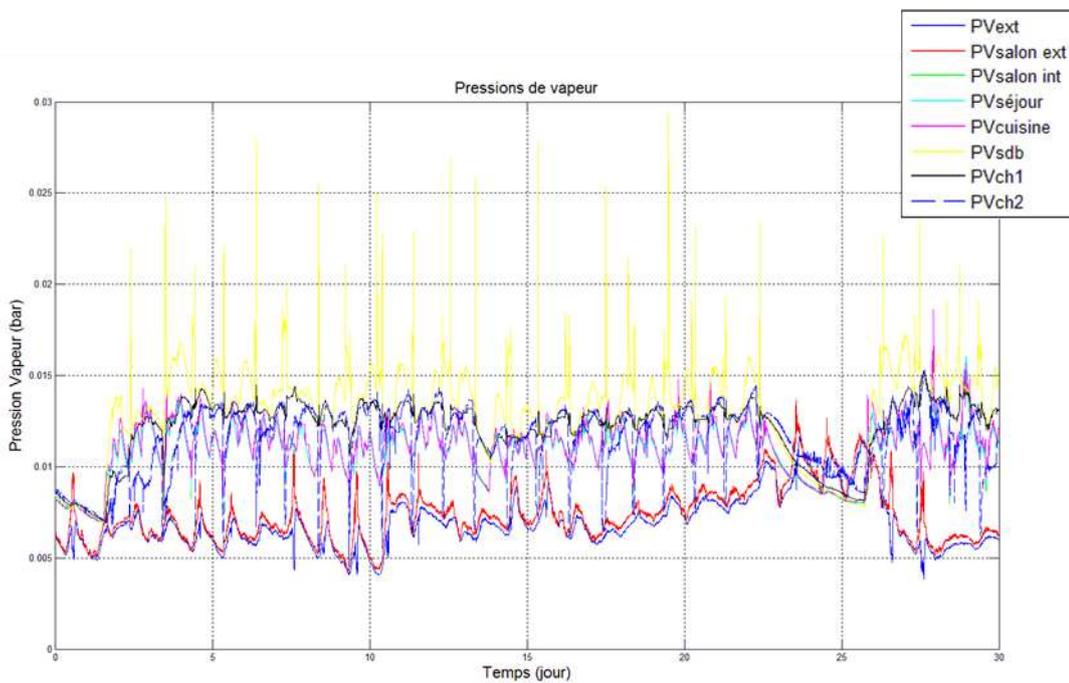


Figure 7. Evolution des pressions de vapeur extérieures et dans les pièces instrumentées entre le 1 décembre et le 30 décembre 2016.

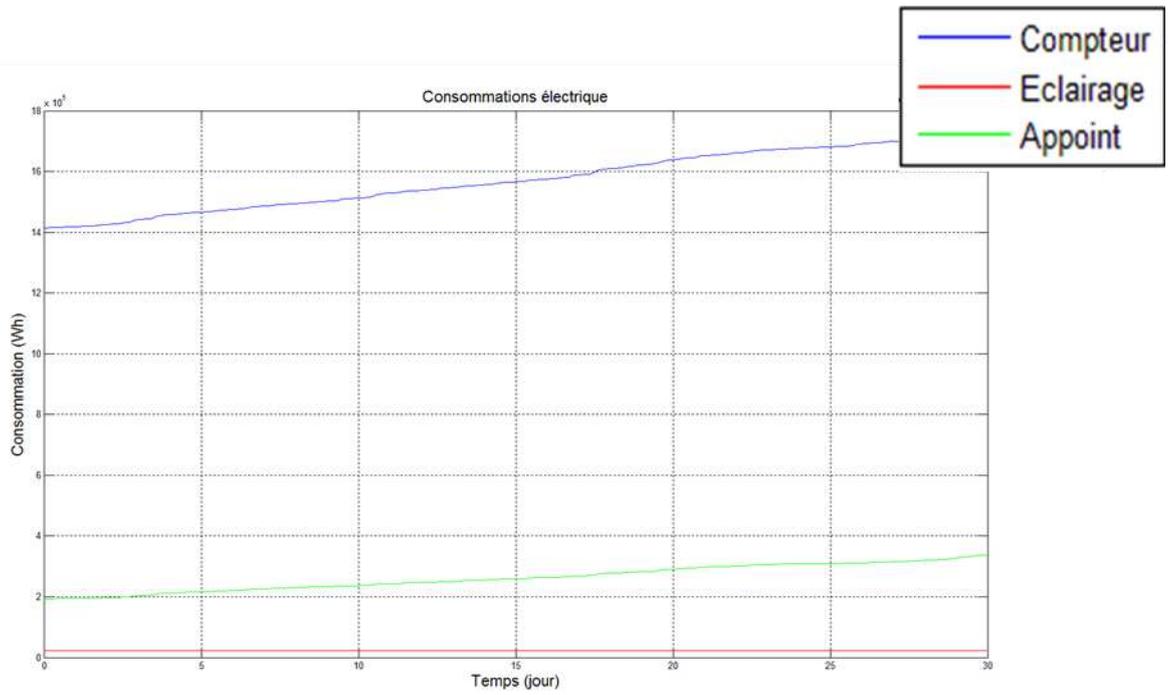


Figure 8. Evolution des consommations électriques entre le 1 décembre et le 30 décembre 2016.

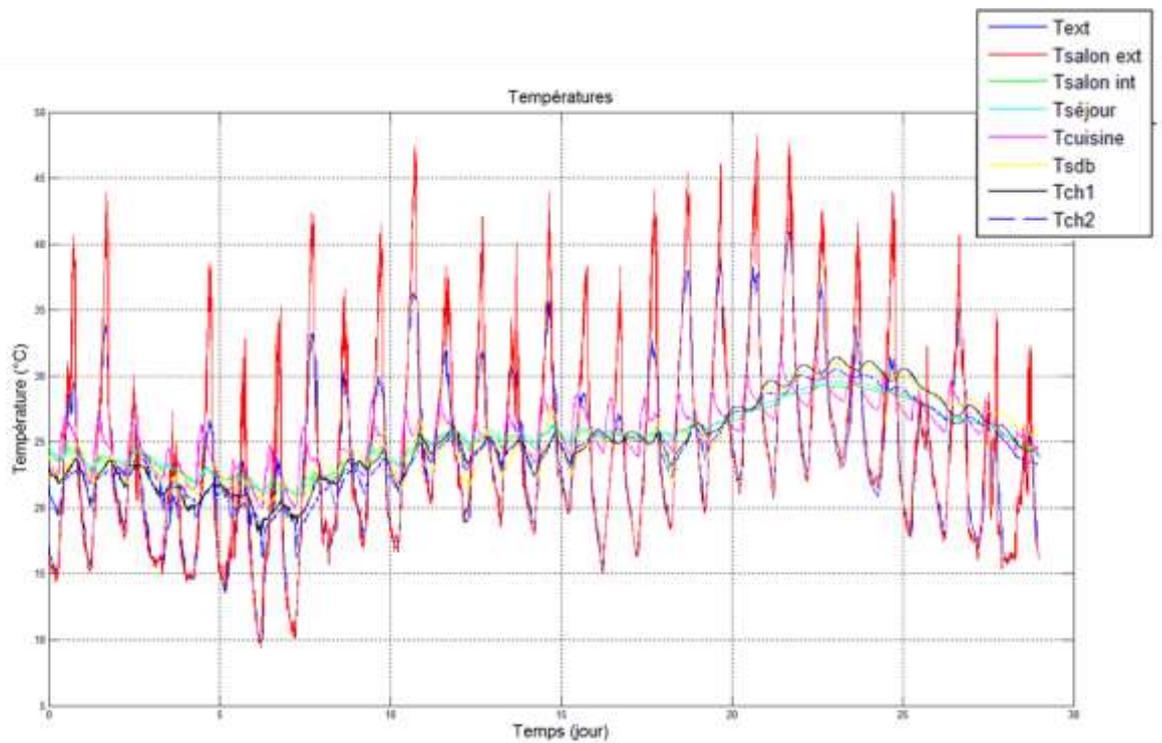


Figure 9. Evolution des températures extérieures et dans les pièces instrumentées entre le 1 juin et le 30 juin 2017.

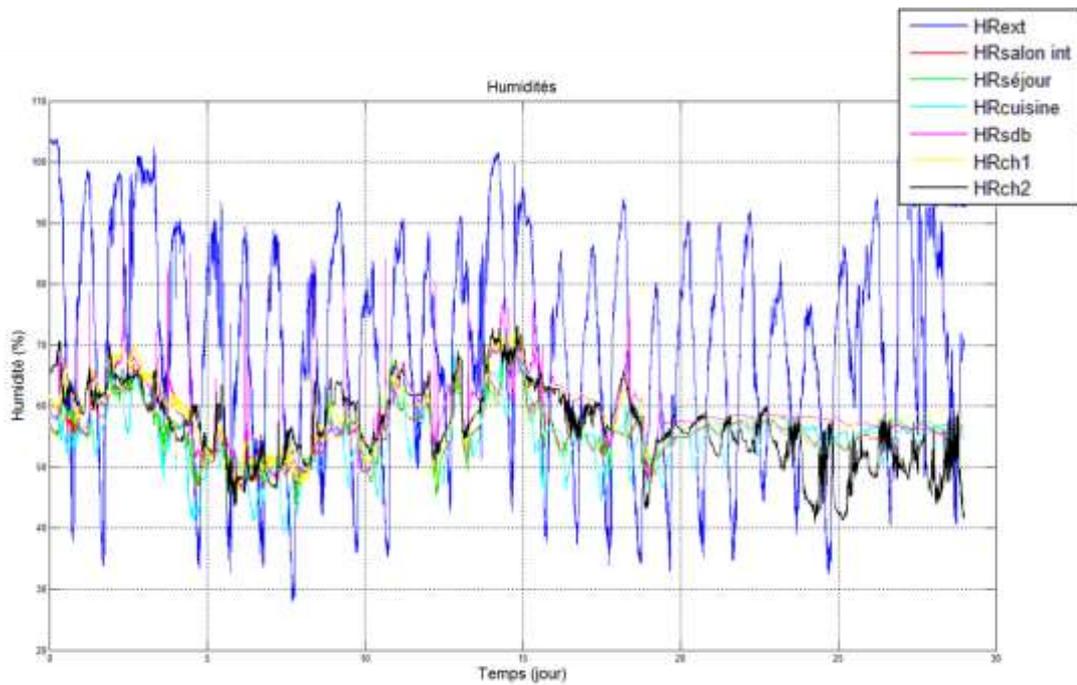


Figure 10. Evolution des humidités relatives extérieures et dans les pièces instrumentées entre le 1 juin et le 30 juin 2017.

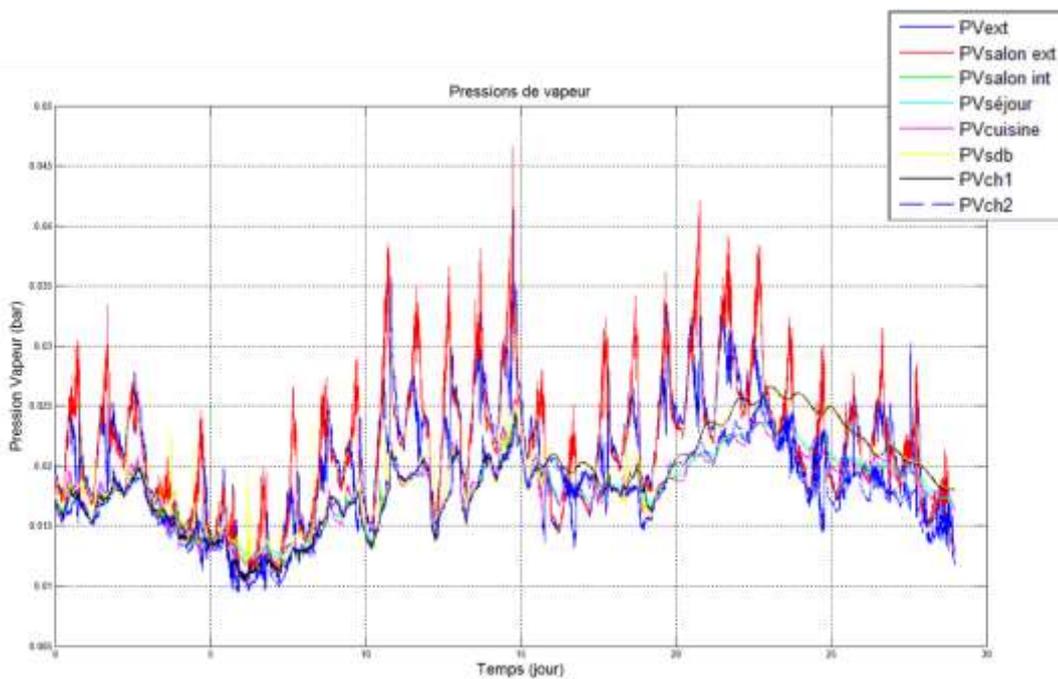


Figure 11. Evolution des pressions de vapeur extérieures et dans les pièces instrumentées entre le 1 juin et le 30 juin 2017.

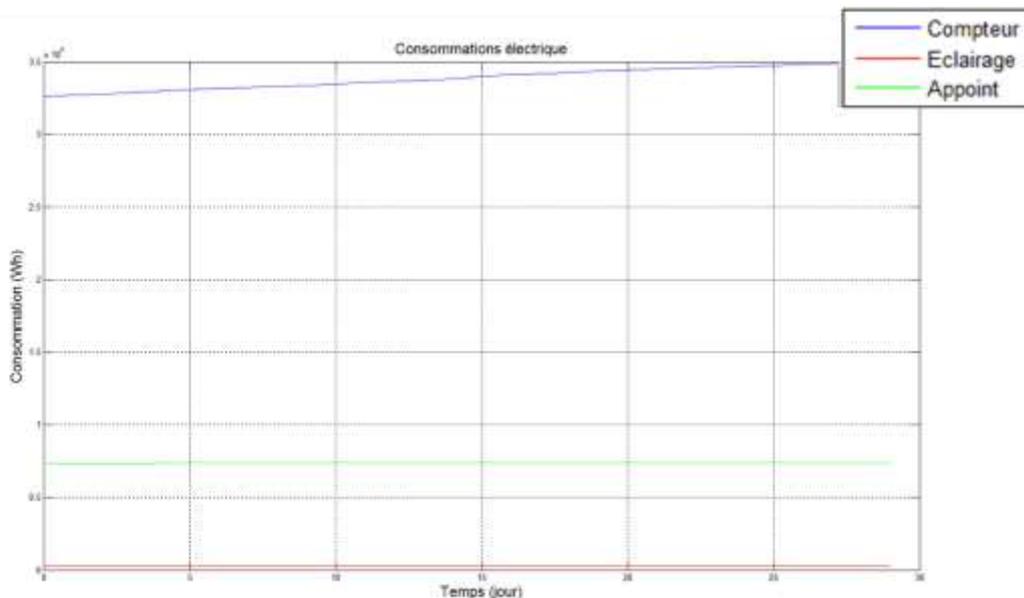


Figure 12. Evolution des consommations électriques entre le 1 juin et le 30 juin 2017.

Ces mesures ayant été finalisées à la fin du projet, il n'a pas encore été possible de les exploiter totalement. Nous pouvons néanmoins d'ores et déjà remarquer les points suivants.

Tout d'abord, la comparaison entre les mesures de température « Text » et « Tsalon ext » nous renseigne sur le degré d'ensoleillement : plus l'écart est grand, plus la paroi ouest du salon sera sujette à un fort rayonnement solaire. On peut ainsi voir qu'au mois de décembre, et plus généralement pendant les mois d'hiver, l'écart entre « Text » et « Tsalon ext » reste faible (de l'ordre de 1°C en journée), tandis que les écarts explosent en juin (de l'ordre de 15°C en journée). Cette donnée est essentielle en vue de comprendre l'impact qu'auraient les apports solaires sur le comportement global de l'habitation.

L'autre point intéressant qu'il est possible de mentionner est la forte inertie thermique de l'habitation. En effet, la Figure 9 montre de fortes variations de températures extérieures au mois de juin, allant de 10°C la nuit à 35°C en journée. Cependant, alors qu'aucun système de chauffage ni de climatisation n'est opérationnel durant cette période (la ligne chauffage d'appoint reste constante sur la Figure 12, et aucune consommation de bois n'a été notée), la température intérieure reste comprise entre 20°C et 25°C, avec néanmoins un pic entre 25°C et 30°C entre le 20 et le 28 juin.

Cette forte inertie thermique est également visible entre le 22 et le 26 décembre 2017, période pendant laquelle la maison était non habitée et non chauffée, et pour laquelle on observe une décroissance en température de 20°C à 13°C en 4 jours alors que les températures extérieures oscillent entre 5°C et 10°C. L'analyse de l'humidité relative durant cette période est également intéressante. En effet, alors qu'il serait normal d'observer une hausse sensible de l'humidité relative durant cette période, due au refroidissement général de la maison, cette dernière reste stable entre 50% et 60%, mis à part pour la chambre 2 et la salle de bain pour lesquelles le comportement est différent du fait de leur utilisation (pièces très humides en temps normal car la chambre 2 n'est pas chauffée et la salle de bain dispose d'une importante source d'humidité). Ce phénomène de tampon hydrique particulièrement intéressant est également mis en évidence par l'analyse des courbes de pression de vapeur. En condition normale d'exploitation, la pression de vapeur à l'intérieur de l'habitation est

supérieure à la pression de vapeur à l'extérieur. Ce point n'est pas surprenant car l'occupation d'une maison est génératrice d'humidité. Cependant, lors de la phase de non-occupation, la pression de vapeur intérieure devient inférieure à la pression de vapeur extérieure, ce qui met en évidence la présence de puits d'humidité au sein de la maison, ce qui évite à l'humidité relative de prendre des valeurs trop importantes.

Instrumentation de la maison de St Antoine (Isère)

La maison de Saint Antoine a été instrumentée lors de sa fabrication, en 2011, dans le cadre de la thèse de Pierre-Antoine Chabriac, et donc avant le début du projet PiséDurable. Il paraît néanmoins nécessaire de rappeler brièvement le plan d'instrumentation.

Le mur qui a été instrumenté durant sa construction est encadré en rouge sur la Figure 13. Notre choix s'est porté sur ce mur car son exposition (sud-ouest) le rend propice à de grandes variations de températures et d'hygrométrie. Les deux parties du mur ont été instrumentées. Elles seront désignées par la suite par « mur sud » et « mur ouest ».

Ces murs sud et ouest ont été instrumentés avec des sondes de teneurs en eau CS616 et des CS215 de la marque *Campbell Scientific*. Ces capteurs ont été placés à mi-hauteur dans les murs, soit à $2\text{ m} \pm 1\text{ cm}$ de hauteur.

Les sondes de teneur en eau CS616 sont placées perpendiculairement au front d'humidité. Dans chacun des murs, nous avons placé une CS616 à $10\text{ cm} \pm 1\text{ cm}$ de la surface intérieure de la maison, une autre à $25\text{ cm} \pm 1\text{ cm}$ de profondeur, au cœur du mur, puis une à $10\text{ cm} \pm 1\text{ cm}$ de la surface extérieure du mur. Ces sondes ont été placées à 40 cm des extrémités du mur pour s'affranchir des effets de bords. De même, elles ont été positionnées en quinconce pour éviter toutes perturbations électromagnétiques entre elles. Elles ont, de plus, été posées sur un lit de terre tamisée d'un centimètre d'épaisseur puis recouvertes par un autre centimètre de terre fine pour les protéger des gros granulats qui pourraient les endommager pendant la phase de damage.



Figure 13. Présentation du mur instrumenté (encadré rouge)

L'ensemble des câbles a été ramené jusqu'à l'angle du mur dans lequel, court sur toute la hauteur une gaine TPC de 63 mm de diamètre passant par le soubassement pour ressortir à environ 1 m de la partie ouest du mur.

La centrale d'acquisition, *Campbell Scientific* CR1000 et le multiplexeur AM16/32, sur lesquels sont connectées les six sondes CS616 et six CS215 modifiées présentes dans les murs sont placés à l'extérieur de la maison (à 5 m environ du mur ouest) sur un trépied équipé d'un panneau solaire permettant d'alimenter la batterie de la centrale d'acquisition.

Afin d'enregistrer les conditions extérieures, une autre CS215 est protégée dans un abri ventilé, i.e. pour s'affranchir du vent et du rayonnement solaire. Cette sonde fait également office d'indicateur de pluie quand elle renvoie 100% d'humidité relative. Une seconde CS215 non modifiée a été placée à l'intérieur de la maison pour mesurer les conditions intérieures. Le câble de ce capteur passe au travers du mur via un des trous qui a servi à maintenir le coffrage durant la construction.

Pour ne pas encombrer l'intérieur de la maison avec un capteur filaire qui ressort sur l'extérieur, nous avons remplacé celui-ci par un capteur de température et humidité relative USB sans fil. Leur répartition est présentée sur le schéma de la Figure 14 (points rouge).

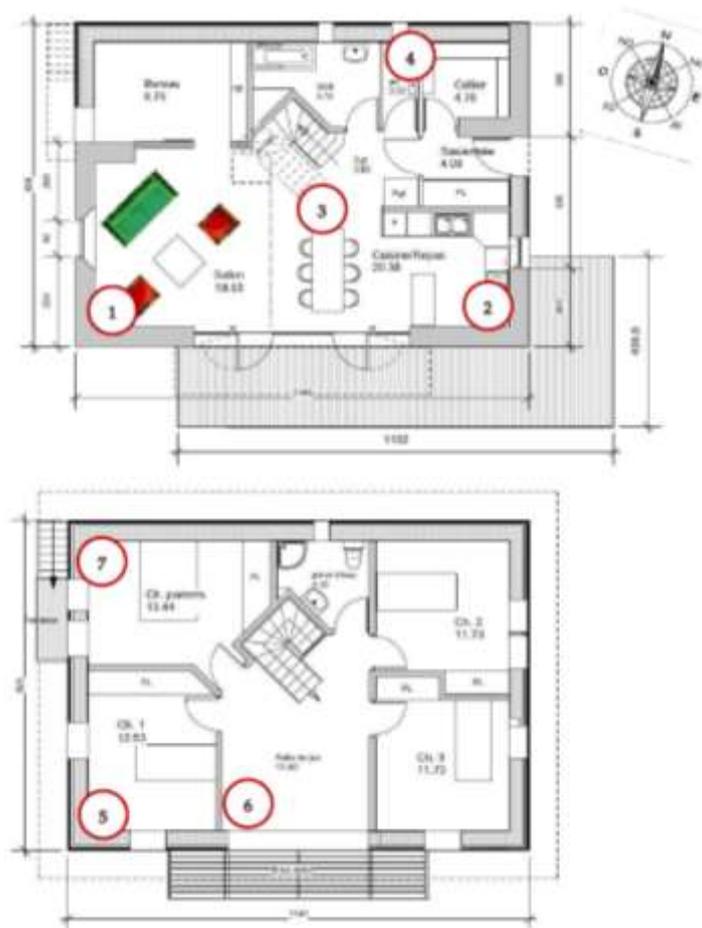


Figure 14. Placement des sondes USB dans la maison sur les plans du rez de chaussées (en haut) et de l'étage (en bas) de la maison.

Quatre capteurs sont placés au rez-de-chaussée tandis que trois autres sont installés à l'étage. Le premier capteur remplace la CS215 dont il est question précédemment ; le deuxième est situé à l'angle

sud-est afin de vérifier si l'on a une différence notable de température entre l'est et l'ouest ; le capteur 3 est placé à l'immédiate proximité du poêle de masse (non représenté sur le plan) ; le quatrième est quant à lui placé en face nord ; le cinquième est placé, comme le premier à l'angle sud-ouest de la maison afin de voir si l'on observe une différence de température entre le rez-de-chaussée et l'étage à ce même angle, la sixième est placé en façade sud et le septième et dernier à l'angle nord-ouest.

Il est généralement admis que le contrôle de la température et la qualité de l'air sont significativement améliorés dans les bâtiments en terre. Pour illustrer ce point et comprendre son origine, nous avons exploité des mesures réalisées en hiver alors que la maison n'était pas chauffée ni habitée.

La comparaison entre les mesures à l'intérieur et à l'extérieur, reportée en Figure 15, montre que l'humidité relative et les variations de température à l'intérieur de la maison sont fortement réduites, bien que cette dernière soit vide et non chauffée. De plus, un décalage de température d'environ 3 heures est observé, et la température moyenne intérieure est supérieure de $2,1^{\circ}\text{C}$ à celle de l'extérieur. Ces résultats tendent à prouver les capacités de contrôle passif de ce bâtiment, mais il faut plus d'informations pour conclure sur le rôle bénéfique des murs de terre.

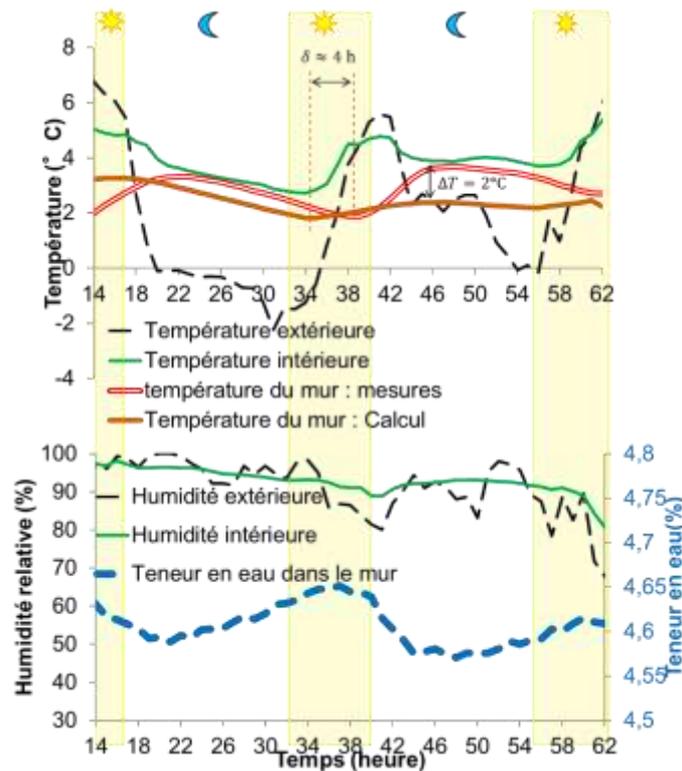


Figure 15. Humidités relatives et températures extérieures (noir), intérieures (vert) ; températures mesurée (rouge) et calculée avec un modèle purement thermique (marron) au milieu du mur ouest ; teneur en eau mesurée au milieu du mur ouest (bleu). Les soleils correspondent aux périodes de jour et les lunes aux périodes de nuit.

Considérons alors les processus qui se produisent à l'intérieur du mur en pisé instrumenté. Pour faciliter l'analyse, la température mesurée au milieu de la paroi est comparée à celle prédite par un calcul unidimensionnel purement thermique. L'équation thermique est résolue avec le code de calcul COMSOL Multiphysics® en utilisant le module PDE. Les simulations sont faites pour une géométrie 1D de longueur $L = 0,5 \text{ m}$ (direction x). Il représente une section transversale latérale du mur testé. La capacité thermique et la conductivité thermique sont pris respectivement égaux à $1100 \text{ kJ/m}^3/\text{K}$ et

1,01 W/m/K, qui sont les valeurs mesurées au laboratoire pour cette terre à 20°C et $w = 4,65\%$ (méthode du fil chaud). Les conditions aux limites des simulations sont établies en fonction de mesures intérieures et extérieures et sont calculées en supposant un coefficient de transfert thermique de 15 W/m²/K, valeur commune pour les conditions de convection naturelle. Enfin, la condition initiale est extraite du résultat d'une pré-simulation, afin de prendre en compte le gradient de température initial à l'intérieur du mur.

Des différences significatives peuvent alors être observées entre les températures calculées et mesurées. Le calcul conduit logiquement à une température quasi constante au milieu du mur dont la valeur moyenne est égale à 2,4°C, qui est comprise entre les températures moyennes intérieure et extérieure. Ce lissage de température est dû à la densité et à l'épaisseur de la paroi qui conduisent à une forte inertie thermique. En comparaison, la température mesurée pendant les périodes nocturnes a tendance à être supérieure à celle calculée, tandis que l'inverse se produit pendant les périodes diurnes. Une déphasage (noté δ dans la Figure 15) d'environ 4 heures peut être observée entre les valeurs mesurées et calculées.

En fait, pour bien comprendre le comportement thermique des murs en pisé, nous devons considérer le rôle de l'eau. Comme mentionné précédemment, l'eau interstitielle sera soumise à des processus d'évaporation et de condensation. La modification de la teneur en eau qui en résulte modifie la conductivité thermique et la capacité thermique du matériau. Mais, comme le montre la Figure 15, la variation de la teneur en eau reste assez limitée dans ce cas d'étude, et son impact sur les propriétés thermiques du matériau ne serait pas suffisant pour expliquer les différences entre les températures calculées et mesurées.

En fait, ces changements de phase ont également des implications sur le bilan énergétique du mur. En effet, pour s'évaporer, une quantité de chaleur doit être fournie à l'eau liquide (réaction endothermique). Cette consommation de chaleur à température constante s'appelle la chaleur latente de l'évaporation. Au contraire, une quantité de chaleur est libérée lors de la condensation de l'eau (réaction exothermique). Et, comme cela est montré dans la Figure 15, pendant la journée, les températures augmentent et l'hygrométrie externe diminue. En conséquence, l'équilibre entre la paroi et l'air environnant conduit à l'évaporation de l'eau capillaire, ce qui est cohérent avec la réduction globale de la teneur en eau mesurée dans la paroi. Cette évaporation induit une absorption de chaleur, et limite ainsi l'augmentation de la température de la paroi. À l'échelle du bâtiment, cela devrait aider à limiter l'augmentation de la température intérieure causée par le transfert de chaleur entre l'extérieur et l'intérieur de la maison à travers le mur en pisé. Inversement, lorsque la température diminue pendant la nuit, la condensation de la vapeur d'eau se produit au sein du réseau poreux, ce qui conduit à une augmentation globale de la teneur en eau et à un dégagement de chaleur. En conséquence, pour les mêmes motifs que ci-dessus, la diminution des températures du mur et de l'intérieur sera limitée.

Ces phénomènes de changement de phase pourraient ainsi expliquer le décalage temporel entre les valeurs mesurées et calculées ainsi que leur différence d'amplitude. Mais ils ne peuvent pas expliquer pourquoi la température moyenne mesurée à l'intérieur du mur est plus élevée que celle estimée à partir du calcul thermique.

En fait, ce dernier point peut s'expliquer par l'absorption des radiations solaires par le mur. Une illustration de ce processus est présentée à la Figure 16, qui montre une différence significative entre la température mesurée dans les murs sud et ouest (jusqu'à 2°C). Ce qui vaut la peine d'être mentionné est que cette différence augmente fortement pendant les périodes de jour mais diminue lentement pendant la nuit. Par conséquent, même en hiver, lorsque les périodes d'ensoleillement sont limitées,

leur effet sur le réchauffement du mur se fait ressentir pendant une durée assez longue (plus d'une nuit dans l'exemple de la Figure 16).

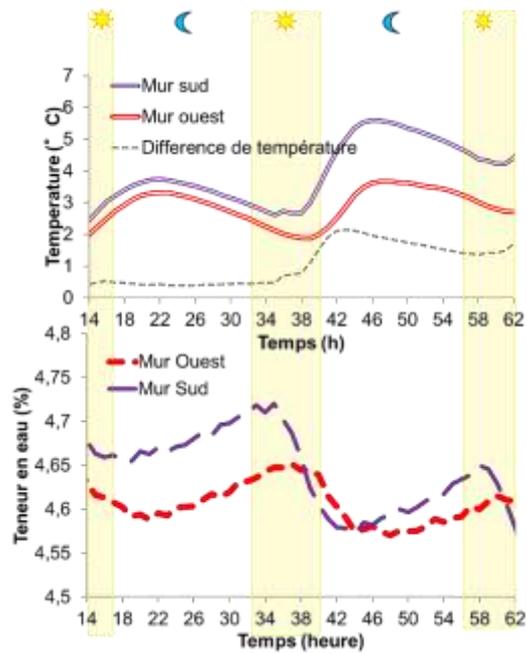


Figure 16. Comparaison des températures et des teneurs en eau dans les murs sud et ouest. Les soleils correspondent aux périodes de jour et les lunes aux périodes de nuit.

V. Conclusion

Le projet PiséDurable avait pour ambition de démontrer les conditions qui permettraient de réaliser des habitations comportant des murs en pisé non isolés compatibles avec la RT2012 et de valider cette approche par un projet de construction réel. Même si le projet de construction n'a pas pu être réalisé, la démonstration de la compatibilité des murs en terre avec la règlement thermique a été faite par le biais de l'étude de faisabilité de la construction de 4 logements en pisé.

L'autre axe majeur du projet concernait l'analyse du comportement des maisons existantes de Saint-Antoine et de Chasselay. En effet, compte tenu de l'intérêt écologique fort des constructions en terre, un nombre grandissant d'études en laboratoire sont réalisées afin de mieux comprendre leurs comportements hygrothermique, acoustique et mécanique. Cependant, relativement peu d'analyses sont conduites à l'échelle du bâtiment.

La première étude, réalisée sur la maison de Chasselay, a consisté à mesurer l'ensemble des paramètres pris en compte dans la RT2012, afin de pouvoir, à terme, comparer les calculs réglementaires au comportement réel de l'habitation. Les dernières mesures ayant été faites à la fin du projet, la comparaison entre les calculs et les mesures n'a pas pu être réalisée. Cependant, des premières informations intéressantes sur le comportement de la maison, telle sa forte inertie thermique et sa capacité à réguler l'hygrométrie intérieure, ont été identifiées.

La seconde étude, réalisée sur la maison de St Antoine, a consisté à analyser les champs de température et d'humidité dans les ambiances et dans le mur, alors que la maison n'était pas habitée ni chauffée. Ce choix a été fait afin de s'affranchir de l'impact du comportement des occupants. Les résultats obtenus ont alors clairement mis en évidence la forte inertie thermique de l'habitation et son aptitude à stocker une partie de l'énergie solaire. Notons que ces résultats sont en continuité avec ceux obtenus dans le cadre du projet ANR Primaterre (cf. thèse de doctorat de Lucile Soudani).

Annexe 1.

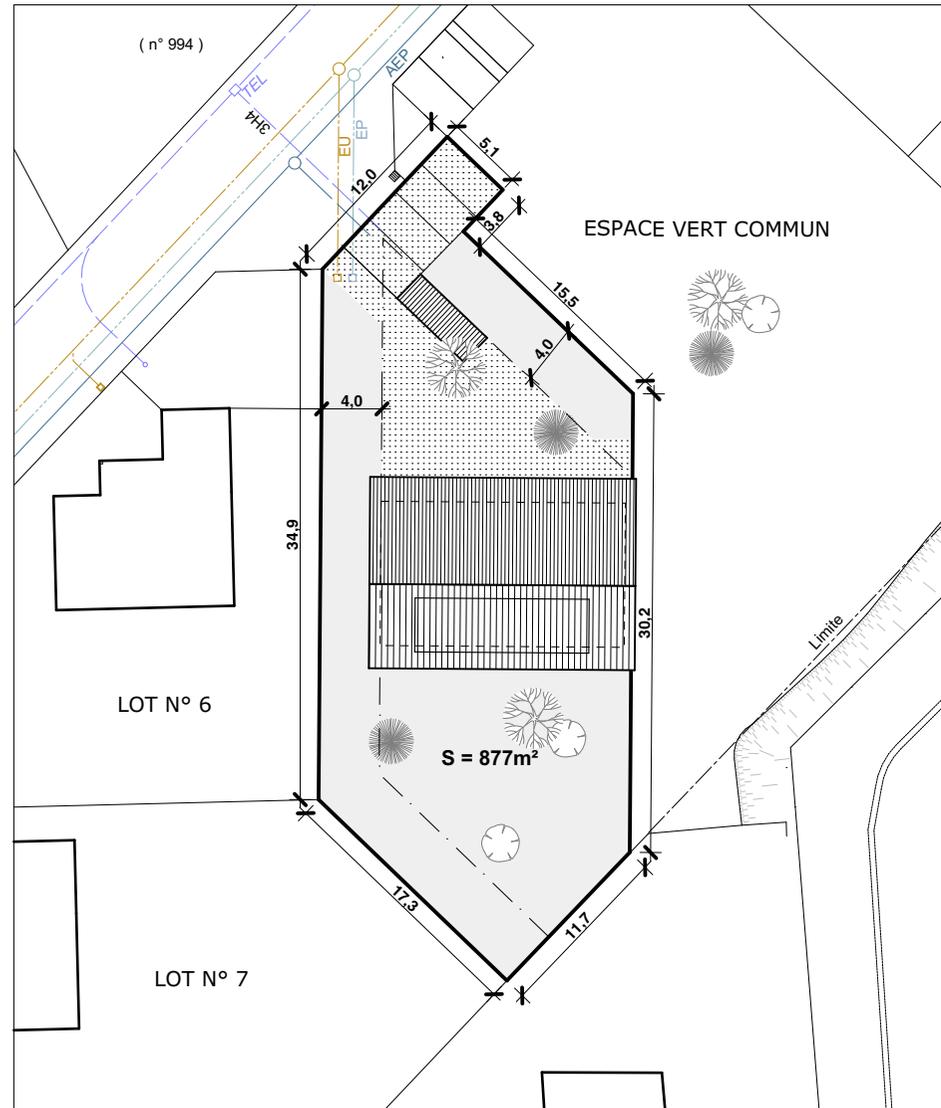
**Etude de faisabilité pour la construction de 4 logements en
Pisé.**



FAISABILITE
/ CONSTRUCTION DE 4 LOGEMENTS
EN PISE
A LA TERRASSE (38), ACTIS

Le 14/03/2016

FAISABILITE /CONSTRUCTION DE 4 LOGEMENTS EN PISE A LA TERRASSE (38), ACTIS

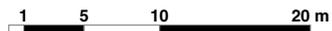
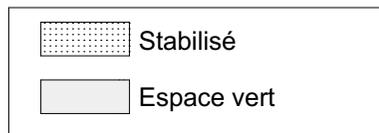
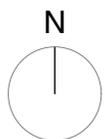


Plan masse

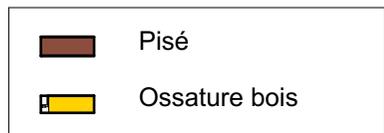
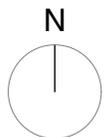
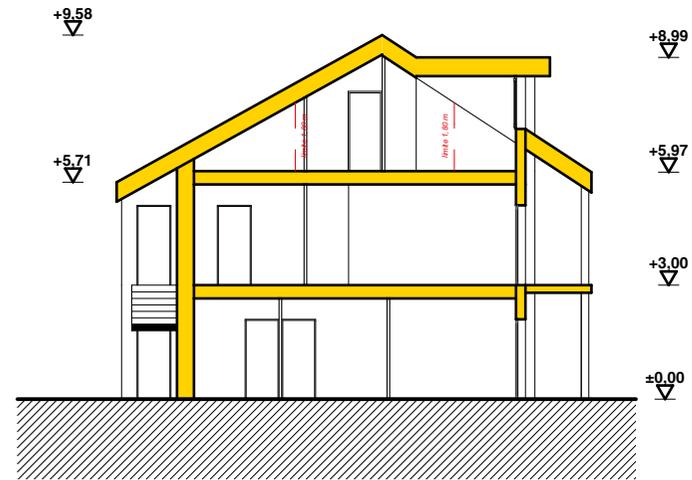
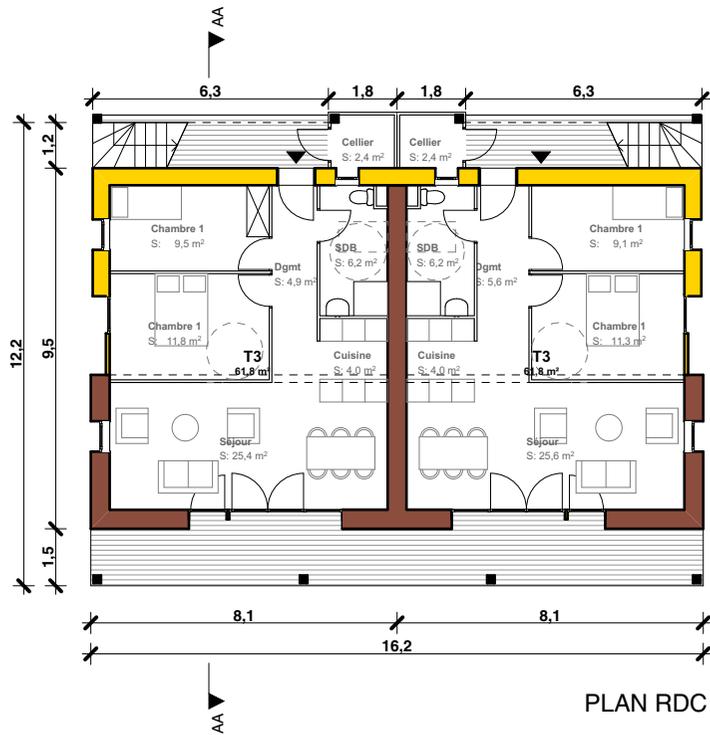
RIGASSI ET ASSOCIES ARCHITECTES

Le 14/03/2016

échelle 1:500



FAISABILITE /CONSTRUCTION DE 4 LOGEMENTS EN PISE A LA TERRASSE (38), ACTIS



Calcul SRT
RDC 153,6 m²
R+1 : 153,6 m²
Combles 70,3 m²
TOTAL : 377,5 m²

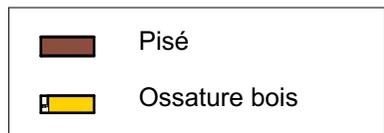
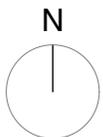
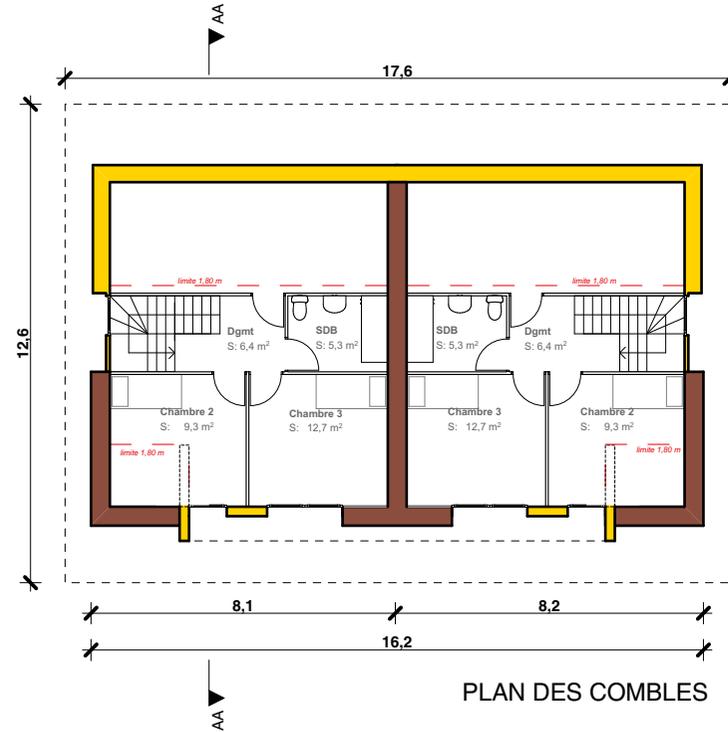
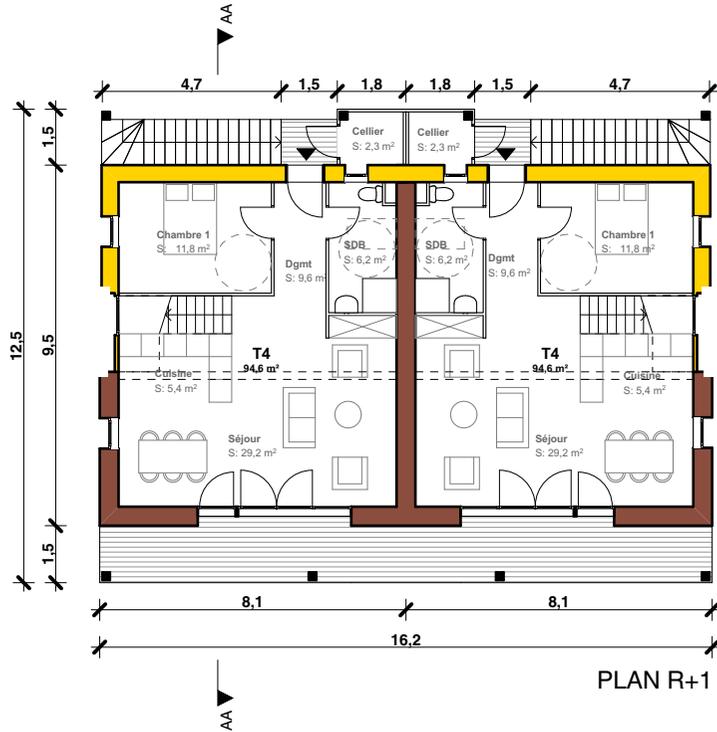
Plans

RIGASSI ET ASSOCIES ARCHITECTES

Le 14/03/2016
échelle 1:200

3
1
5

FAISABILITE /CONSTRUCTION DE 4 LOGEMENTS EN PISE A LA TERRASSE (38), ACTIS



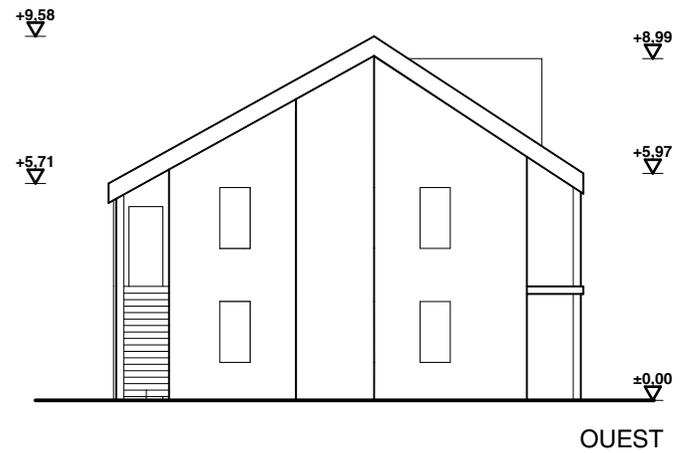
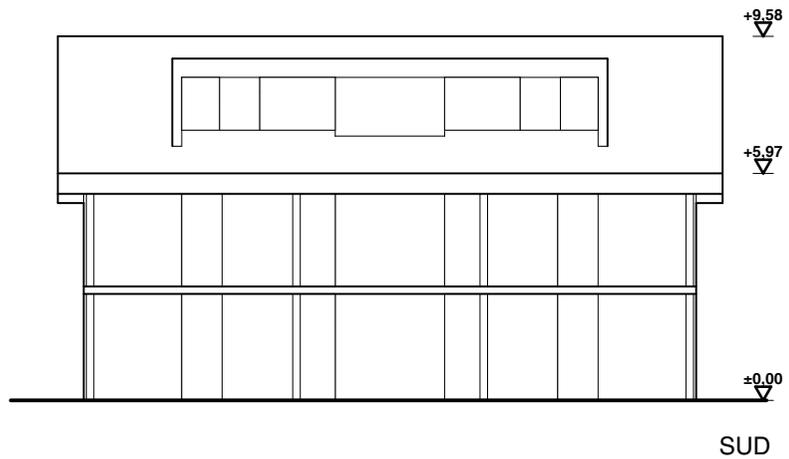
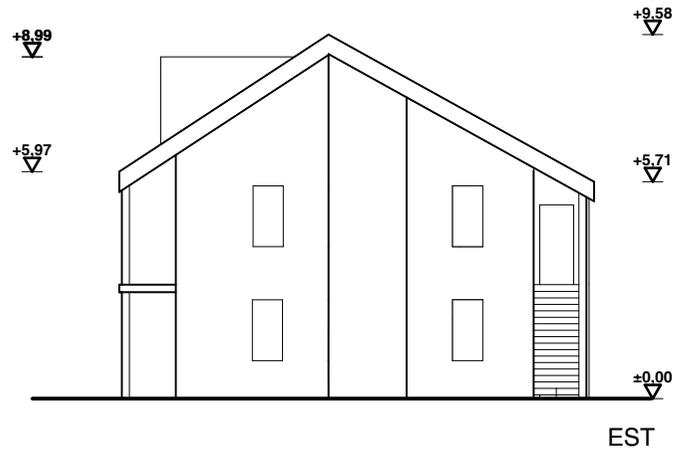
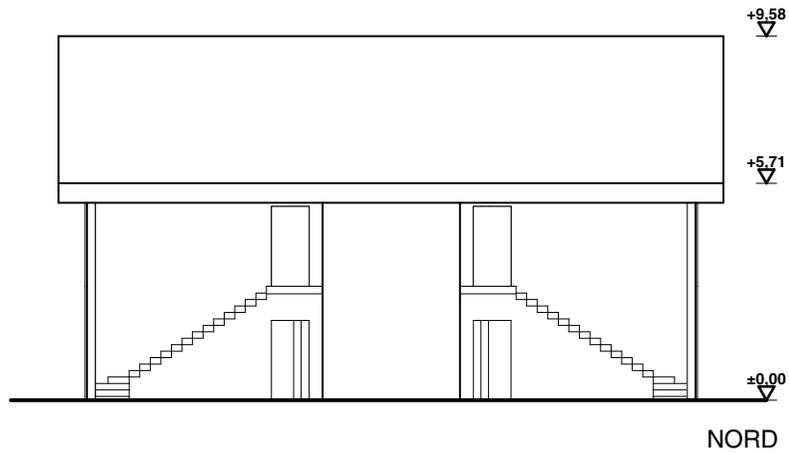
Calcul SRT
RDC 153,6 m²
R+1 : 153,6 m²
Combles 70,3 m²
TOTAL : 377,5 m²

Plans

RIGASSI ET ASSOCIES ARCHITECTES

Le 14/03/2016
échelle 1:200

FAISABILITE
/CONSTRUCTION DE 4 LOGEMENTS EN PISE
A LA TERRASSE (38), ACTIS



LA TERRASSE

Construction de 4 logements

Maitre d'ouvrage : ACTIS - Architecte RIGASSI ARCHITECTES

Estimatif des travaux en phase APS - V1 - Mars 2016

	DESIGNATION	Solution T3 et T4 duplex Paille-pisé	Solution 4 T3 Paille- Pisé	Solution T3 et T4 duplex Mixte pisé-paille - béton cellulaire	Solution T3 et T4 duplex Béton cellulaire - Mext PVC
	<i>Hypothèses et précisions :</i> <i>Etude réalisée suivant plans Architecte du 03 mars 2016</i> <i>Pas de fondations profondes ni de renforcement de sols</i> <i>Absence de pollution des sols</i> <i>Absence de présence d'eau</i> <i>Pas de surcoute liés a des mitoyennetés</i> <i>Isolement des façades égal à 30 dB</i> <i>Pas de rapport de sol</i>				
1	VOIRIE - RESEAUX DIVERS - PAYSAGE	55 000,00 €	55 000,00 €	55 000,00 €	55 000,00 €
2	TERRASSEMENTS - GROS ŒUVRE	30 854,15 €	30 854,15 €	59 017,40 €	103 600,65 €
3	PISE	89 957,00 €	88 436,60 €	60 145,90 €	0,00 €
4	STRUCTURE BOIS	125 090,79 €	107 318,34 €	97 031,79 €	63 272,79 €
5	MENUISERIES EXTERIEURES	38 983,20 €	34 235,60 €	33 758,40 €	28 533,60 €
6	FACADES	21 825,63 €	19 699,33 €	20 490,63 €	19 155,63 €
7	CLOISONS - ISOLATIONS - FAUX PLAFONDS	33 448,30 €	24 950,60 €	37 357,80 €	36 233,30 €
8	MENUISERIE INTERIEURE	19 442,58 €	11 522,16 €	19 442,58 €	19 442,58 €
9	CARRELAGE - FAÏENCES - SOLS SOUPLES	25 295,08 €	18 212,60 €	25 014,08 €	20 350,56 €
10	SOLS SOUPLES	5 802,40 €	2 984,00 €	5 802,40 €	5 802,40 €
11	PEINTURE	15 700,00 €	12 200,00 €	15 700,00 €	15 700,00 €
12	LOTS TECHNIQUES	84 000,00 €	80 000,00 €	84 000,00 €	84 000,00 €
	TOTAL HT (valeur Mars 2016) :	545 399,13 €	485 413,38 €	512 760,98 €	451 091,51 €
	SHA(en m2)	314,00	244,40	314,00	314,00
	TOTAL HT m ² /sha	1 736,94 €	1 986,14 €	1 633,00 €	1 436,60 €
	TOTAL HT / logement	136 349,78 €	121 353,35 €	128 190,25 €	112 772,88 €