

# Instrumentation hygrothermique d'une paroi en béton cellulaire.

## Hygrothermal monitoring of an aerated cellular concrete wall.

Fatima EL MANKIBI <sup>1\*</sup>, Yacine AIT OUMEZIANE<sup>1</sup>, Valérie LEPILLER<sup>1</sup>, Marina GASNIER<sup>2</sup>, Philippe DESEVAUX<sup>1</sup>

<sup>1</sup>FEMTO-ST Institute, Univ. Bourgogne Franche-Comte, CNRS  
Département Energie, Parc technologique, 2 avenue Jean Moulin – 90000 Belfort.

<sup>2</sup>FEMTO-ST Institute/RECITS, Univ. Bourgogne Franche-Comte, CNRS  
Département Energie, Parc technologique, 2 avenue Jean Moulin – 90000 Belfort.

\*(auteur correspondant : [fatima.elmankibi@femto-st.fr](mailto:fatima.elmankibi@femto-st.fr))

**Résumé** – Cet article décrit le travail d'instrumentation effectué sur une paroi expérimentale en béton cellulaire et le suivi de son comportement hygrothermique. La mise en place de capteurs permet de suivre l'évolution de la température et de l'humidité relative dans les ambiances, aux surfaces et à l'intérieur de la paroi, soumise à des conditions climatiques variables contrôlées. Les résultats obtenus sont discutés afin d'évaluer la qualité de l'instrumentation mise en œuvre et d'analyser le comportement hygrothermique de la paroi.

**Mots-clés** : Instrumentation, béton cellulaire, suivi hygrothermique

**Abstract** – This article deals with the instrumentation methodology of an aerated cellular concrete wall and the monitoring of its hygrothermal behaviour. The installation of sensors allows the evolution of the temperature and the relative humidity to be followed in the surroundings, on the surfaces and inside the wall, subjected to variable climatic controlled conditions. The results are discussed in order to evaluate the instrumentation methodology relevance and to analyse the hygrothermal behaviour of the wall.

**Keywords**: Monitoring, aerated cellular concrete, hygrothermal behaviour.

### Nomenclature

$T$  température, °C  
 $x$  profondeur, m

#### *Symboles grecs*

$\Phi$  humidité relative, %

#### *Indices et exposants*

$ac$  ambiance chaude  
 $af$  ambiance froide  
 $sc$  surface chaude  
 $sf$  surface froide

## 1. Introduction

Le secteur du bâtiment constitue un enjeu central de la loi sur la transition énergétique. En effet, il représente plus de 40% de la consommation d'énergie finale en France et environ 25% des émissions de CO<sub>2</sub> [1]. Dans ce contexte, la rénovation et le réusage du patrimoine bâti existant représente une source substantielle d'économie d'énergie grise et d'émission de gaz à effet de serre. A ce titre, il apparaît nécessaire de mieux connaître les caractéristiques et performances de ces bâtiments afin de proposer des solutions de rénovation efficaces et adaptées.

Le travail présenté dans ce papier s'inscrit dans le cadre d'un contexte de recherche qui vise à s'intéresser aux procédures de caractérisation des propriétés hygrothermiques des matériaux de construction. Ainsi, l'objectif est ici de décrire la démarche d'instrumentation mise en œuvre

sur une paroi expérimentale et d'évaluer son comportement hygrothermique face à des sollicitations climatiques contrôlées en laboratoire. Les données expérimentales collectées doivent permettre d'identifier les propriétés hygrothermiques du matériau constitutif de la paroi par résolution du problème inverse, à partir de techniques d'optimisation, des transferts d'humidité et de chaleur en milieu poreux.

Le choix du béton cellulaire comme matériau d'étude se justifie par sa facilité de mise en œuvre et ses performances thermiques et hygriques intéressantes [3-5]. En effet, outre ses propriétés d'isolation, ce matériau de construction hygroscopique et perspirant possède de bonnes capacités de régulation de l'humidité [6].

Dans ce cadre, une paroi en béton cellulaire a été mise en œuvre en laboratoire. La mesure des températures et humidités relatives est effectuée à partir de thermocouples et d'hygromètres installés dans les ambiances, aux surfaces ainsi qu'à trois profondeurs différentes au sein de la paroi. La paroi d'étude est placée dans une enceinte bi-climatique capable de générer des conditions variables et contrôlées de température et d'humidité relative. Les séquences de mesure obtenues permettent d'évaluer la qualité de l'instrumentation mise en œuvre et d'évaluer le comportement hygrothermique de la paroi.

## 2. Dispositif expérimental

L'enceinte bi-climatique utilisée est la cellule Thermo3R présentée figure 1. Ce dispositif contient, d'une part une enceinte chaude qui permet de faire varier la température dans la gamme [20°C;50°C] à l'aide une résistance chauffante. La température y est régulée par un système de contrôle de type PID. L'humidité relative est générée par un brumisateurs à ultrasons possédant un système de régulation de type tout ou rien.

D'autre part, l'enceinte froide est équipée d'un groupe frigorifique. Elle permet de faire varier la température de -20 à 20°C à l'aide d'une régulation de type tout ou rien. Il est à noter que la zone froide ne permet pas de régulation de l'humidité relative, tributaire des consignes de température imposées.

La paroi en béton cellulaire, de dimensions 1,25 m de largeur, 1,50 m de hauteur et 0,25 m d'épaisseur, est placée entre les deux enceintes (figure 1). Les deux enceintes sont équipées d'un joint élastomère assurant l'étanchéité.



Figure 1 : Enceinte bi-climatique.

### 3. Instrumentation de la paroi

16 thermocouples de type K dont la soudure fait 0,5 mm de diamètre permettent de mesurer la température et 16 sondes hygrométriques de marque Honeywell série HIH-4000 permettent de mesurer l'humidité relative.

Les thermocouples ont été étalonnés avec leur chaîne de mesure de 0 à 50°C par paliers de 5°C à l'aide d'un bain thermostaté. La température de référence est mesurée par une sonde Pt100. Parallèlement, toutes les sondes hygrométriques ont été étalonnées avec leur chaîne de mesure à 23°C aux humidités relatives 31, 42, 54 et 90% générées par des solutions salines. L'acquisition des données est réalisée à partir du logiciel LabVIEW. La précision des thermocouples est de  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  et la précision des sondes hygrométriques est de  $\pm 3,5\%$ .

Les positions des capteurs sont montrées dans les figures 2 et 3 :

- dans les ambiances : 2 thermocouples et 2 sondes d'hygrométrie ont été placés à deux positions différentes à l'intérieur de chaque enceinte (figure 2-a).
- sur les surfaces de paroi : 3 thermocouples et 3 sondes d'hygrométrie ont été installés sur les blocs 1, 3 et 5 sur une surface, et sur les blocs 2, 3 et 4 sur la surface opposée (figures 2-a et 2-b).
- à l'intérieur de la paroi : 3 thermocouples positionnés à des profondeurs différentes (5, 12,5 et 20 cm) ont été insérés dans les blocs 1 et 5, et 3 sondes d'hygrométrie aux mêmes profondeurs dans les blocs 2 et 4.

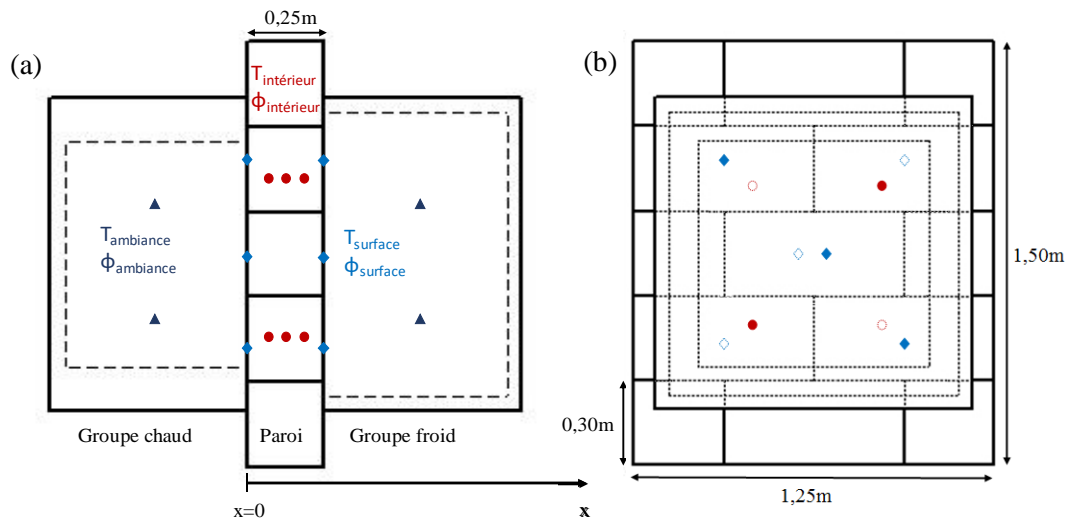


Figure 2 : Positions des capteurs : (a) vue de gauche, (b) de face.

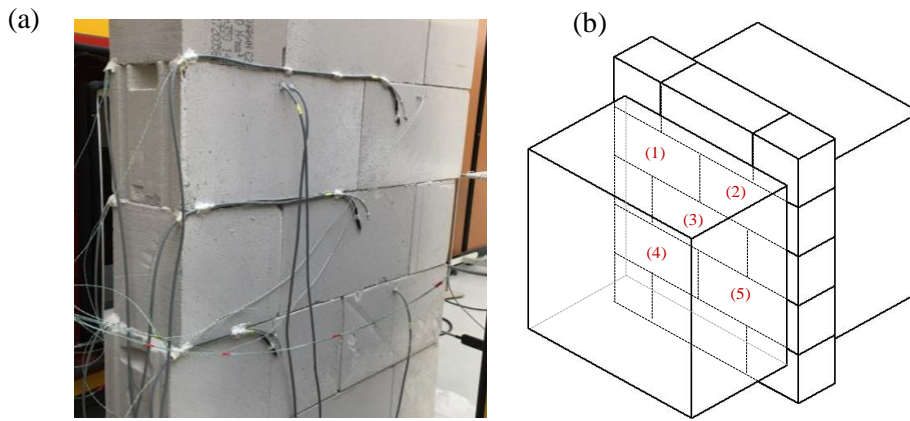


Figure 3 : Positions des capteurs sur la paroi.

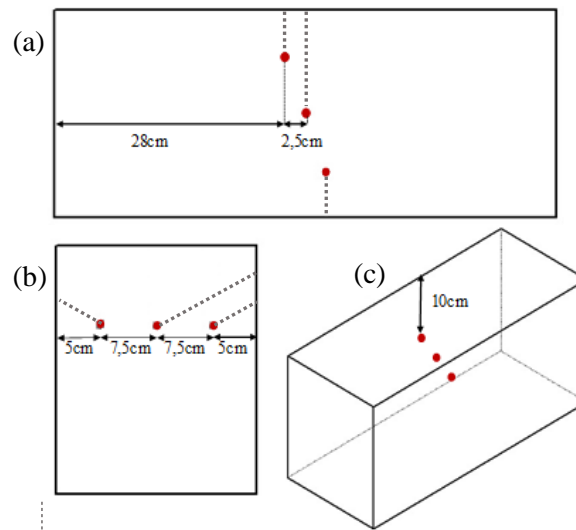


Figure 4 : Position des capteurs à l'intérieur d'un bloc : (a) vue de dessus, (b) vue de gauche et (c) vue isométrique.

### 3.1. A la surface de la paroi

Tous les capteurs sont maintenus sur la surface de la paroi avec du mortier-colle (Cellucol), le même que celui utilisé pour lier les blocs de béton cellulaire (figure 3-a). Afin de comparer l'influence de la colle utilisée sur la réponse du capteur, 3 thermocouples ont été collés avec du mortier-colle alors que les 3 autres ont été collés avec un mastic réfractaire haute température noir de marque Rubson. Une distance d'environ 3 cm est laissée entre les capteurs (figure 5). La position des différents capteurs installés à la surface est présentée dans les figures 2 et 3.

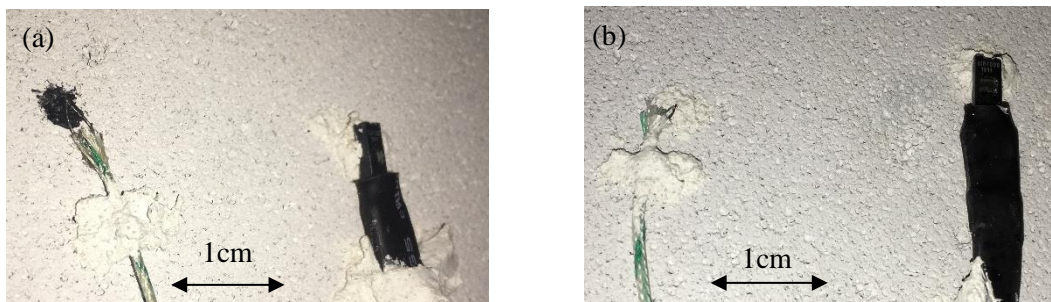


Figure 5 : Capteurs à la surface de la paroi.

### 3.2. A l'intérieur de la paroi

Pour installer les capteurs à l'intérieur de la paroi, les blocs de béton cellulaire ont été percés à l'aide de mèches à béton à différentes profondeurs (5 cm, 12,5 cm et 20 cm) avec un diamètre de perçage pour les thermocouples de 3 mm, et pour les sondes d'hygrométrie de 8 mm. Pour éviter au maximum de perturber les flux d'humidité et de chaleur par les capteurs, le perçage a été effectué avec un angle de 30° par rapport à la normale des surfaces externes [7]. Ces capteurs sont espacés de 2 cm pour les thermocouples et 2,5 cm pour les sondes d'hygrométrie (figure 4). La poudre extraite du matériau après perçage est réintroduite après l'insertion des capteurs. Le trou est ensuite colmaté avec du silicone (figure 6). Cette technique d'instrumentation a été validée dans [6]. Cependant, contrairement à ce qui a été fait dans [6] où du polystyrène extrudé a été utilisé pour colmater les trous de perçage, il n'a pas été ici nécessaire en raison du faible diamètre de perçage réalisé.

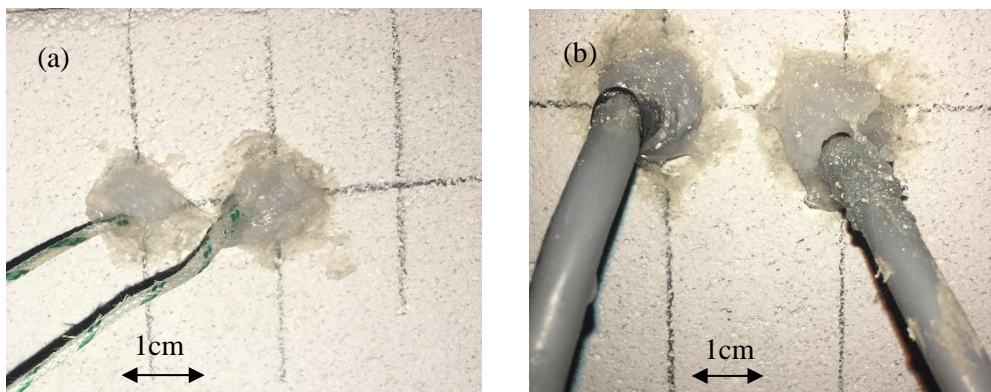


Figure 6 : Capteurs à l'intérieur de la paroi : (a) Thermocouples, (b) Sondes hygrométriques.

## 4. Résultats et discussion

La paroi a été initialement séchée pendant une semaine à 50°C. Dans la séquence d'étude présentée, les deux groupes ont été maintenus à 20°C pendant les 10 premières heures, puis entre 10 et 25 h, la température du groupe froid a été fixée à 15°C. De 25 h à 32 h, la température de ce groupe a encore été baissée à 10°C, puis les deux groupes ont été remis à 20°C jusqu'à la 49ème heure. Le groupe froid a été ensuite éteint et le groupe chaud lancé avec une consigne de 25°C. Il est à noter que les fluctuations observées sur les courbes d'ambiance et de surface sont liées à la régulation du groupe frigorifique. En outre, aucune consigne n'a été imposée concernant l'humidité relative. Les résultats obtenus sont présentés dans les figures 7, 8 et 9.

La différence observée entre les mesures données par les deux capteurs d'ambiance est faible. Elle s'explique par l'homogénéité des zones froide et chaude de faible volume. Les capteurs de surface affichent des valeurs très proches, quelle que soit leur position (figure 7). Une légère différence est cependant observée au moment du changement de consigne.

Les mesures de température et d'humidité relative de surface présentent des fluctuations atténuées par rapport aux mesures dans les ambiances. Une comparaison des mesures données par les thermocouples localisés sur la surface froide avec celles extraites des images prises par caméra infrarouge, montre un écart moyen de l'ordre de 0,2°C entre ces deux méthodes de mesure, écart tout à fait satisfaisant.

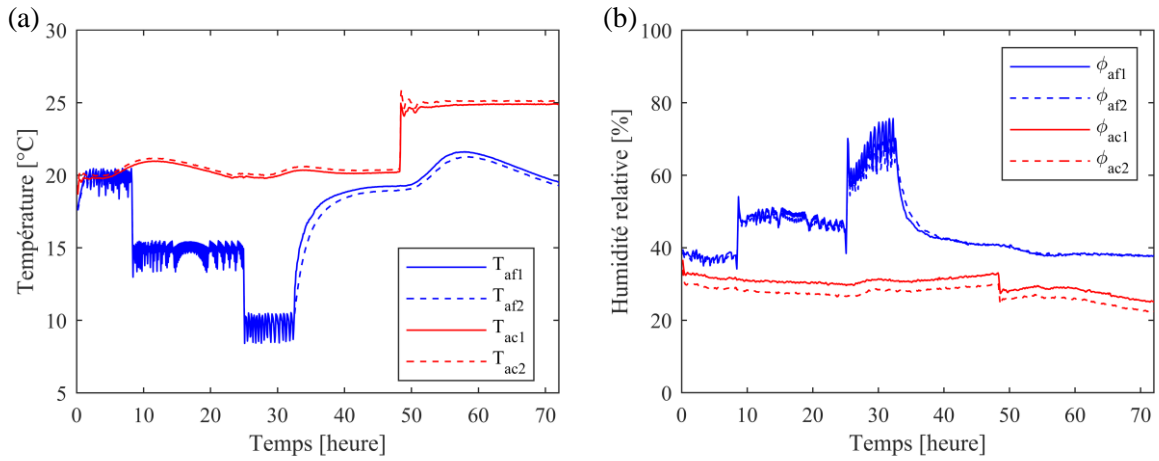


Figure 7 : (a) Température (b) humidité relative à l'ambiance.

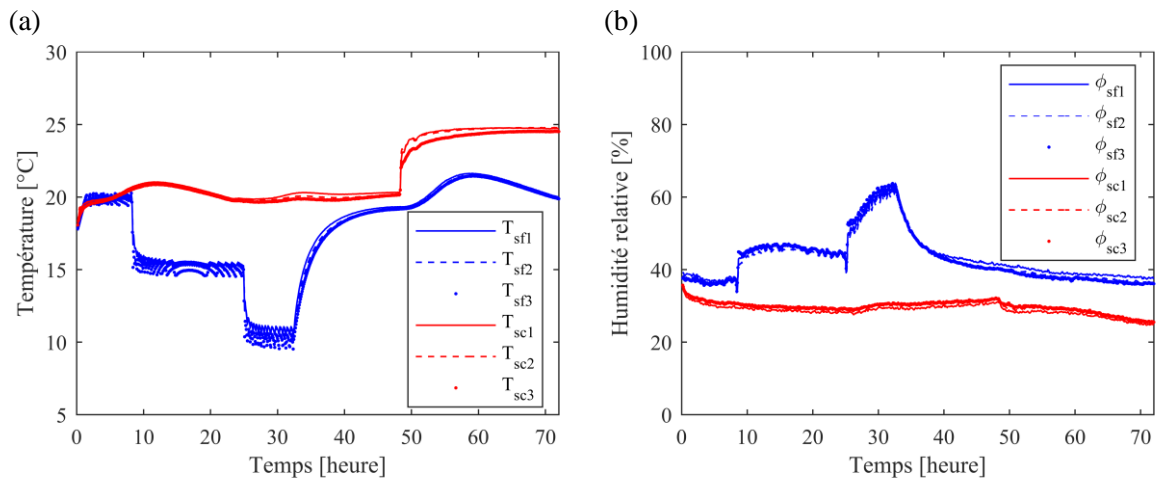


Figure 8 : (a) Température (b) humidité relative à la surface.

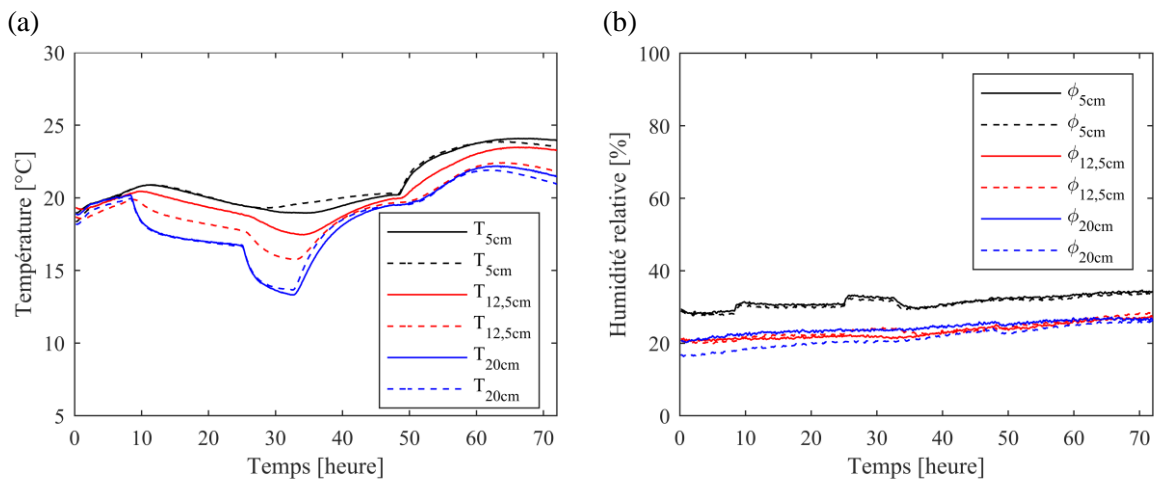


Figure 9 : (a) Température (b) humidité relative à l'intérieur de la paroi.

Le tableau 1 résume les écarts observés entre les différents capteurs. Les capteurs situés à 5 cm de chaque surface présentent la même réponse, avec un écart moyen de 0,2°C et un écart-type de 0,2°C pour les thermocouples, et 0,6% et 2,7% pour les hygromètres. Les capteurs situés au milieu de la paroi présentent quant à eux une différence plus importante, de l'ordre de 2°C entre 10 h et 32 h. Toutefois, si nous observons la séquence en entier, l'écart moyen observé pour les thermocouples à cette position est de 0,9°C. A la même profondeur, les capteurs d'humidité relative ne présentent pas de tels écarts pour la séquence d'étude présentée (en moyenne 0,8%). Les écarts mesurés entre capteurs apparaissent plus importants à l'intérieur de la paroi que dans les ambiances et en surface ce qui témoigne de l'incertitude liée à la position des capteurs en profondeur.

Aucune différence n'a été observée sur l'utilisation du mortier-colle ou de la colle réfractaire pour maintenir les thermocouples sur la paroi. Il est à noter que le silicone n'est pas forcément le meilleur choix en terme de fixation. Il a été observé que les capteurs ne tenaient pas parfaitement en place. Le mortier-colle sera donc utilisé par la suite pour maintenir les capteurs à l'intérieur de la paroi.

		Moyenne	Maximum	Minimum	Ecart-type
Température (°C)					
Ambiance	Froide	0,31	2,12	<0,001	0,29
	Chaude	0,23	1,13	0,16	0,08
Surface	Froide	0,23	2,37	<0,001	0,24
	Chaude	0,20	1,09	<0,001	0,16
Intérieur	À 5cm	0,22	0,74	<0,001	0,21
	À 12,5cm	0,94	1,87	0,14	0,46
	À 20cm	0,23	0,79	<0,001	0,21
Humidité relative (%)					
Ambiance	Froide	0,88	5,95	<0,001	1,12
	Chaude	2,82	3,60	2,00	0,28
Surface	Froide	0,90	4,91	<0,001	0,61
	Chaude	0,73	2,07	<0,001	0,43
Intérieur	À 5cm	0,58	1,23	<0,001	0,27
	À 12,5cm	0,79	2,78	<0,001	0,54
	À 20cm	2,69	4,75	0,04	1,14

Tableau 1 : *Les écarts observés entre les mesures des capteurs.*

## 5. Conclusion et perspectives

Les premiers résultats de suivi de température et d'humidité relative réalisés sur une paroi expérimentale en béton cellulaire soumise à des sollicitations climatiques variables contrôlées en laboratoire ont permis d'identifier les points forts et faibles de l'instrumentation mise en œuvre.

La séquence présentée met en évidence une faible différence entre les valeurs données par les différents capteurs dans l'ambiance et sur les surfaces de la paroi. Les mesures relativement proches des capteurs de surface montrent une cohérence de l'instrumentation mise en œuvre, ce qui a été confirmé par les résultats complémentaires obtenus l'aide d'une caméra thermique. De légères différences sont toutefois observées lors du changement de consigne.

Le suivi des capteurs de température et d'humidité relative positionnés au milieu de la paroi démontre un mauvais positionnement de ces capteurs et a permis de souligner l'impact de l'incertitude liée à la position des capteurs sur les mesures. Un travail de repositionnement a été effectué et une séquence de mesure de vérification est en cours en laboratoire.

Dans le cadre de futurs travaux, nous nous intéresserons aux mesures aux surface et aux ambiances, qui seront complétées par des mesures fluxmétriques. Des nouvelles séquences de mesure seront réalisées et utilisées comme données d'entrée pour déterminer les propriétés hygrothermiques du béton cellulaire par résolution du problème inverse des transferts d'humidité et de chaleur. Les résultats obtenus seront confrontés aux résultats expérimentaux de caractérisation déterminés à partir de méthodes destructives standards de laboratoire.

### Références

- [1] Bilan énergétique de la France pour 2015. Ministère de l'Environnement de l'Energie et de la Mer.
- [2] H. Jin et al., Experimental determination and fractal modeling of the effective thermal conductivity of autoclaved aerated concrete: Effects of moisture content. *Int. J. Heat Mass Transf.* (92) (2016), pp. 589-602.
- [3] C. Boutin, Thermal conductivity of autoclaved aerated concrete: modelling by the self-consistent method, *Mater Struct* (29) (1996), pp. 609–15.
- [4] Y. Wang et al., Experimental study on hygrothermal characteristics of coral sand aggregate concrete and aerated concrete under different humidity and temperature conditions. *Constr Build Mater.* (230) (2020).
- [5] M. Jerman et al., Hygric, thermal and durability properties of autoclaved aerated concrete *Construction and Building Materials* (41) (2013), pp. 352-359.
- [6] D. Samri, Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction: approche expérimentale et modélisation numérique – Thèse de doctorat - Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat - Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (2008).
- [7] F. Collet, S. Pretot. Experimental highlight of hygrothermal phenomena in hemp concrete wall. *Building and Environment* (82) (2014), pp. 459-466.

### Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur reconnaissance à la Région Bourgogne Franche-Comté pour son soutien dans le cadre du projet CHOB et sa gratitude au technicien Vincent HUBERT pour son aide à la préparation des capteurs.