Interreg
EUROPEAN UNION
France (Channel Manche) England
CobBauge
European Regional Development Fund

Évaluation des données mesurées lors de la surveillance du prototype CobBauge de Plymouth

Université de Plymouth

Mai 2023

UNIVERSITY OF PLYMOUTH School of Art, Design and Architecture
ESITC CAEN École Supérieure d'Ingénieurs des Travaux de la Construction
Parc naturel régional des Marais du Cotentin et du Bessin
ebuki
UNICAEN UNIVERSITÉ CAEN NORMANDIE
HUDSONArchitects

Introduction

(De plus amples détails sur les informations contenues dans ce rapport peuvent être trouvés dans les documents à fournir appropriés).

Ce rapport résume les moyens utilisés pour recueillir des données sur les performances du prototype de Plymouth.

- La phase de construction, où ils ont été utilisés pour enregistrer la teneur en humidité des murs pendant qu'ils séchaient, et pour enregistrer tout mouvement associé dans les murs.
- La phase d'occupation, au cours de laquelle divers capteurs ont été utilisés pour enregistrer les effets de l'interaction humaine avec le bâtiment et la relation du bâtiment avec son propre environnement.

Les capteurs utilisés pendant la phase de construction étaient les suivants

- Les capteurs CS655 de Campbell Scientific pour mesurer l'humidité et la température à trois profondeurs à travers le mur.
- Les capteurs SoilVue 10 de Campbell Scientific qui mesurent également l'humidité et la température mais avec une résolution plus élevée que les capteurs CS655. Ils nous fournissent six séries de données à travers le mur.
- Un appareil de mesure laser Leica 3D Disto qui a été utilisé pour suivre avec précision le tassement et le retrait des murs CobBauge.

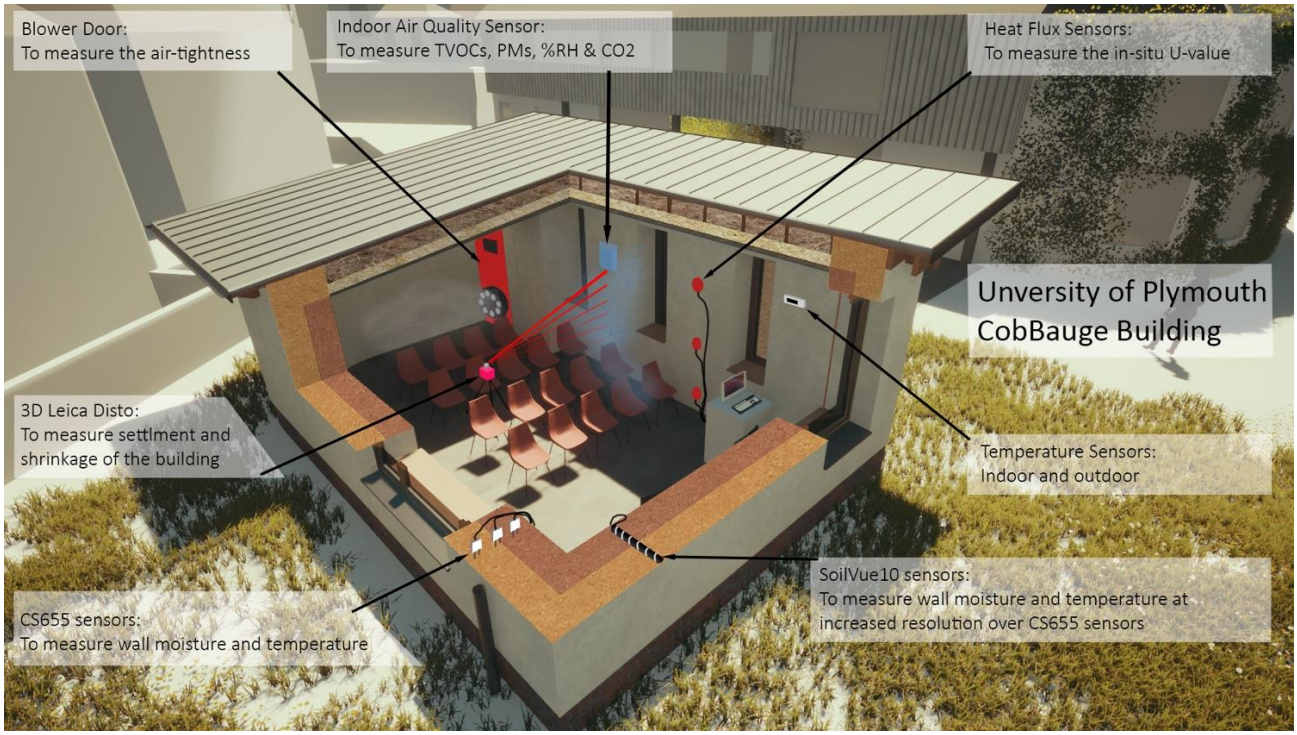
Les capteurs utilisés pour la phase d'occupation sont les suivants

- - Un appareil d'infiltrométrie pour mesurer la perméabilité du bâtiment.
- - Un capteur de qualité de l'air intérieur Synetica Enlink IAQ-C relié à un réseau LoRaWan et transmettant des données en direct à un tableau de bord sur le site Web de CobBauge.
- - Des capteurs de flux de chaleur pour donner une mesure en temps réel de la valeur U de l'isolation du bâtiment.
- - Une sélection de capteurs d'enregistrement de données pour mesurer la température (intérieure et extérieure), l'humidité relative, l'éclairement (niveaux de lumière) et la consommation d'énergie électrique..

Domaines couverts par ce rapport :

- Mesure de la teneur en humidité des murs et des taux de retrait associés
- L'utilisation de capteurs de flux de chaleur pour enregistrer les valeurs U en temps réel
- Les différents capteurs utilisés pour enregistrer la qualité de l'air intérieur (QAI)
- Qualité de l'air extérieur

- Test d'étanchéité à l'air à l'aide d'un dispositif d'infiltrométrie
- Utilisation de caméras thermiques pour évaluer la performance thermique
- Une méthode pour diffuser les données d'un capteur d'air intérieur à travers un réseau local, et le tableau de bord sur le site web CobBauge.
- Confort thermique
- L'éclairement et la qualité de l'éclairage
- Une évaluation du rôle de la capacité thermique spécifique des murs CobBauge.



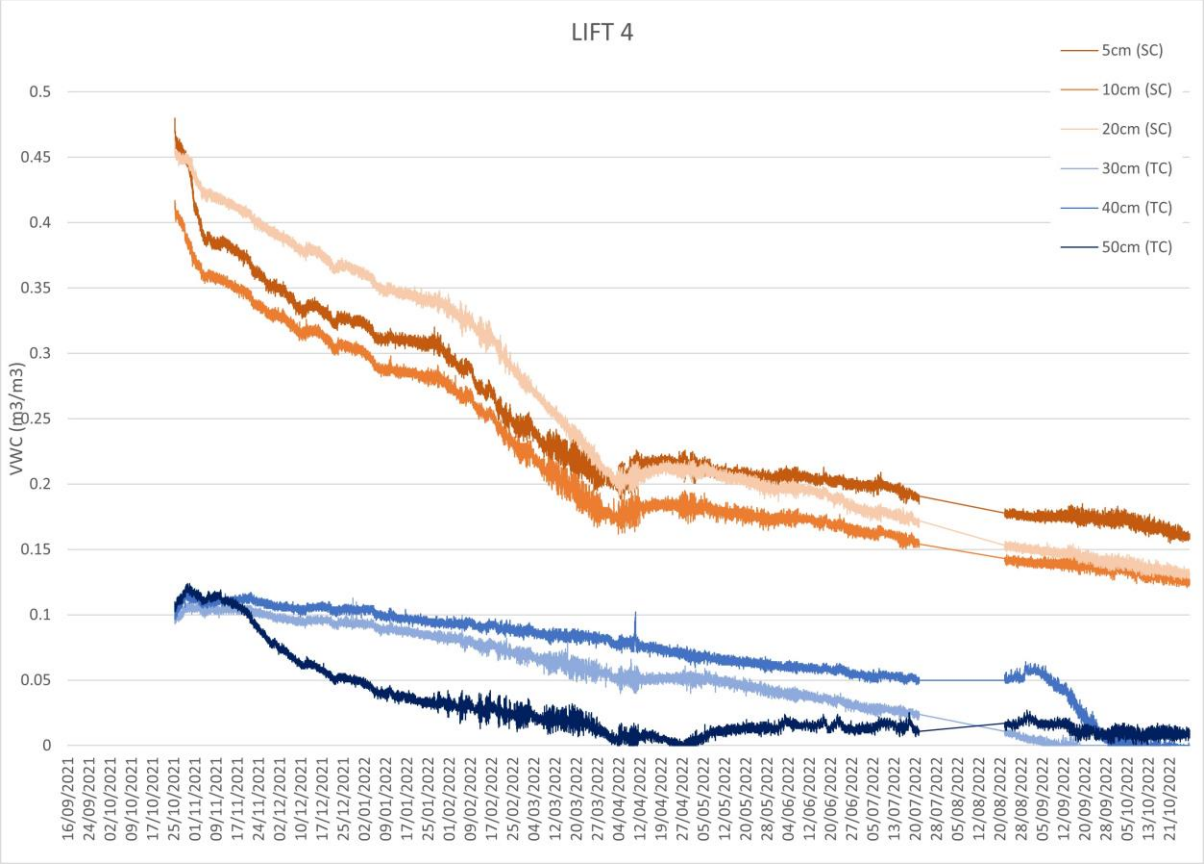
Dessin en coupe 3D du prototype de Plymouth montrant les capteurs utilisés et leur emplacement dans le bâtiment.

Mesure de l'humidité dans les murs

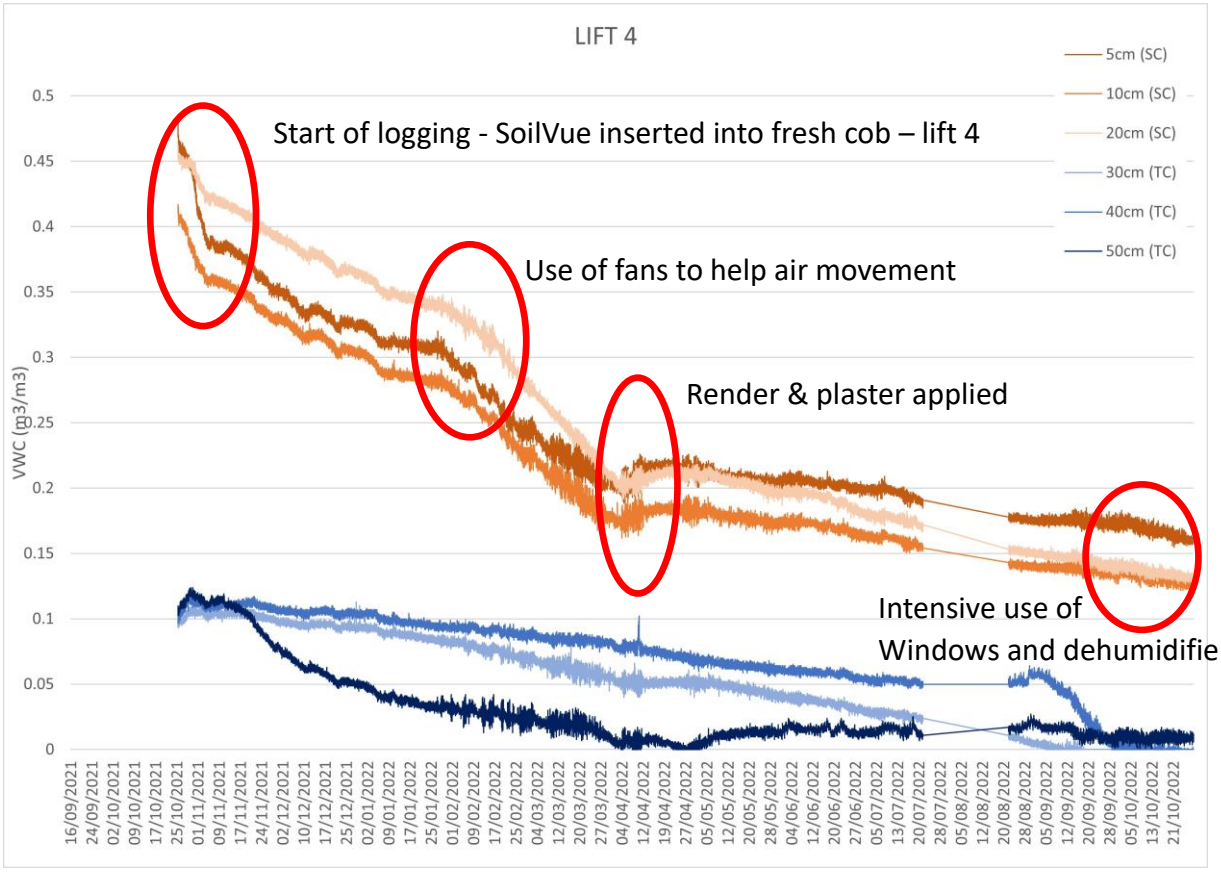
Méthodologie :

Nous avons 8 sondes d'humidité intégrées dans le mur CobBauge.
4 x Soilvue 10 et 4 x Campbell CS655. Ils sont connectés à un enregistreur de données CR1000X.
Ils surveillent la température et le taux d'humidité volumétrique (VMC).
Les résultats montrés ici proviennent du Campbell Soilvue 10 installé dans le dernier ascenseur à être construit, l'ascenseur n°4.

Results:



Graphique de l'humidité dans les murs du bâtiment CobBauge du 16 sept. 2021 au 21 oct. Oct 2022



Le même graphique avec les principaux événements enregistrés et leur effet sur l'humidité dans les murs.

Les deux versions du graphique ci-dessus montrent le taux d'humidité des murs CobBauge mesuré en six endroits à travers les murs. Les trois tons de brun correspondent aux points du mélange structurel (torchis dense, 2,5 % de fibres) à 5 cm, 10 cm et 20 cm du mur. Les traces bleues correspondent aux trois points du mélange thermique léger (50% de fibres de chanvre) à 30, 40 et 50 cm.

Les événements qui ont eu le plus d'effet sur l'humidité dans les murs sont mis en évidence dans le deuxième graphique. Il s'agit de

- Une perte prononcée de liquide au cours des deux premières semaines au début de l'exploitation forestière. Ensuite, le taux de séchage se poursuit plus lentement jusqu'en janvier 2022, date à laquelle une période de froid semble ralentir le séchage.
- En raison des inquiétudes suscitées par la vitesse de séchage, trois grands ventilateurs ont été installés dans le bâtiment. Ils ont été disposés en cercle autour du bâtiment afin d'établir un mouvement d'air régulier. Après l'installation des ventilateurs, on peut constater une augmentation de la vitesse de séchage jusqu'à ce que l'enduit intérieur en terre cuite et l'enduit extérieur en chaux soient séchés.
- L'enduit intérieur à l'argile et l'enduit extérieur à la chaux sont appliqués. L'enduit intérieur à l'argile semble avoir un effet prononcé, les niveaux d'humidité augmentant dans les 300 mm de l'enduit structurel à l'intérieur du bâtiment.
- Bien que le bâtiment continue à s'assécher, les progrès sont lents et il est décidé de favoriser l'assèchement en laissant les fenêtres ouvertes et en utilisant un déshumidificateur dans l'espace.

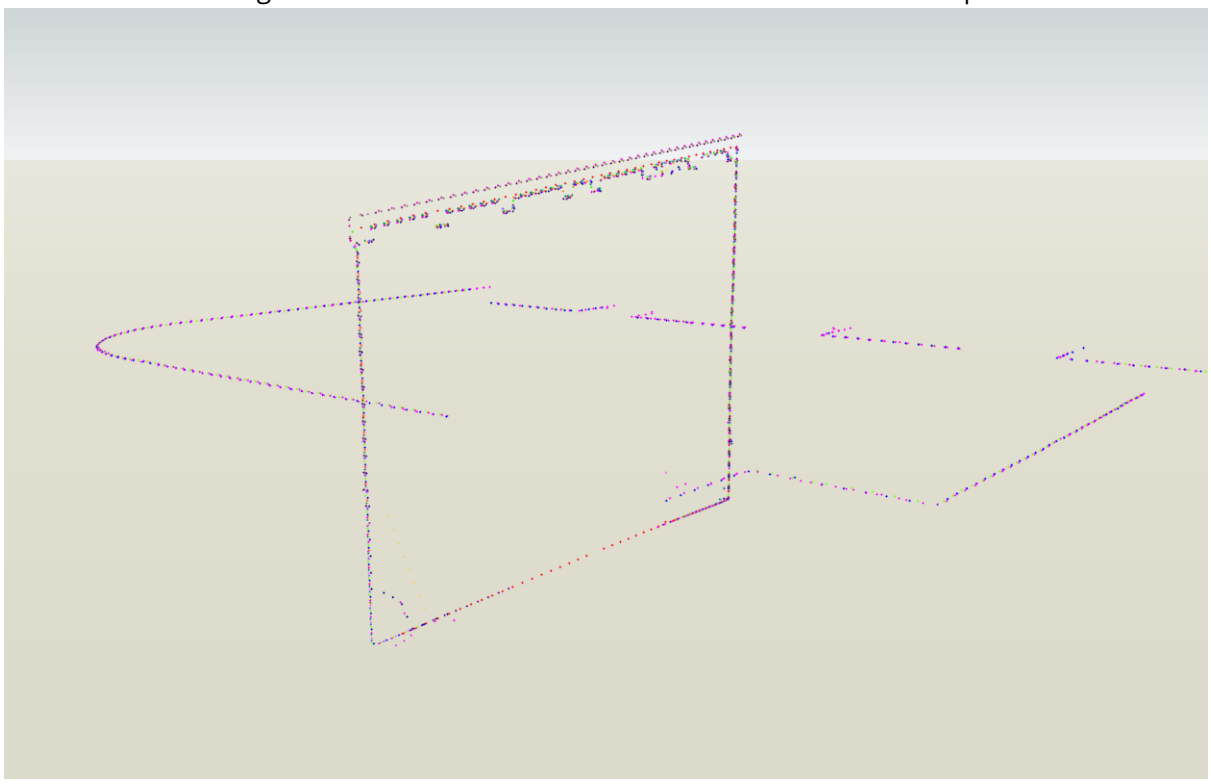
La principale observation à faire ici est qu'il a fallu peut-être un peu plus de temps que prévu pour que les murs s'assèchent, et qu'il faut faire attention au calendrier de l'enduit intérieur en raison de son effet sur l'assèchement des murs.

Mesure du retrait des murs

Mesure du retrait dans le bâtiment avec un Leica 3D Disto.

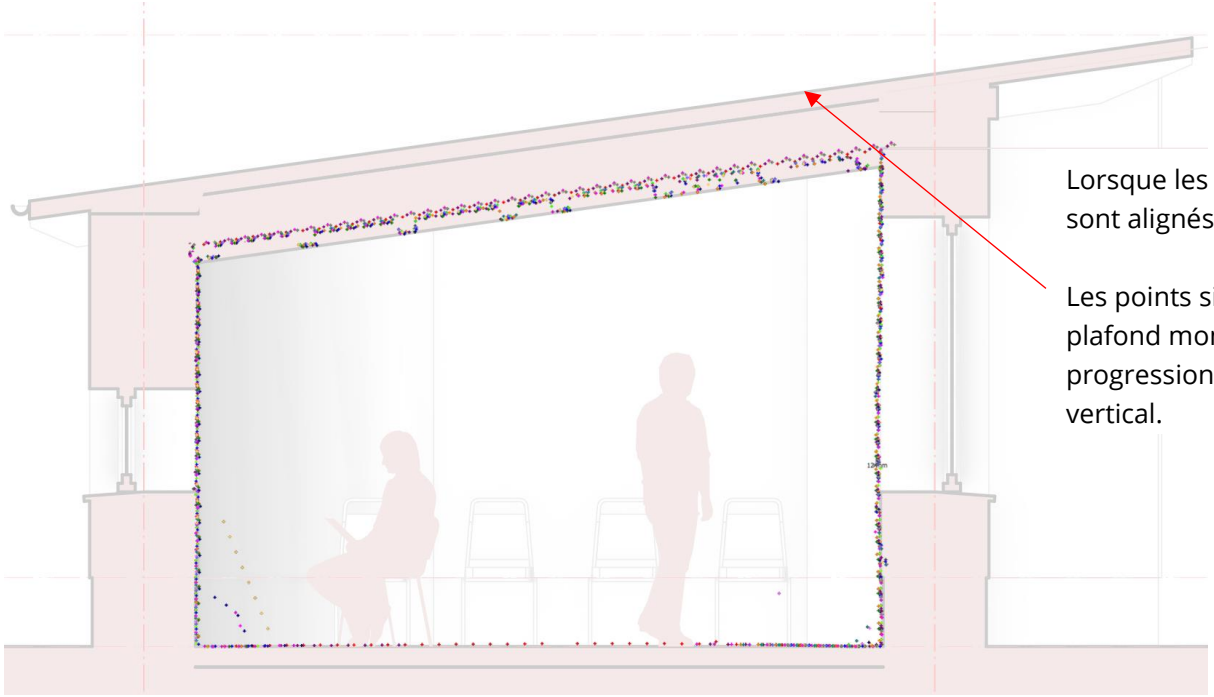
Méthodologie :

Un Leica 3D Disto a été installé au centre du bâtiment et programmé pour prendre des mesures laser à intervalles de 50 mm horizontalement et verticalement à l'intérieur du bâtiment.
Il en résulte un nuage de points en 3D, un plan et une section qui peuvent être importés dans un logiciel de dessin en 3D (SketchUp). Ce processus a été répété pendant la période de séchage du bâtiment afin d'enregistrer tout rétrécissement des murs au fur et à mesure qu'ils séchaient



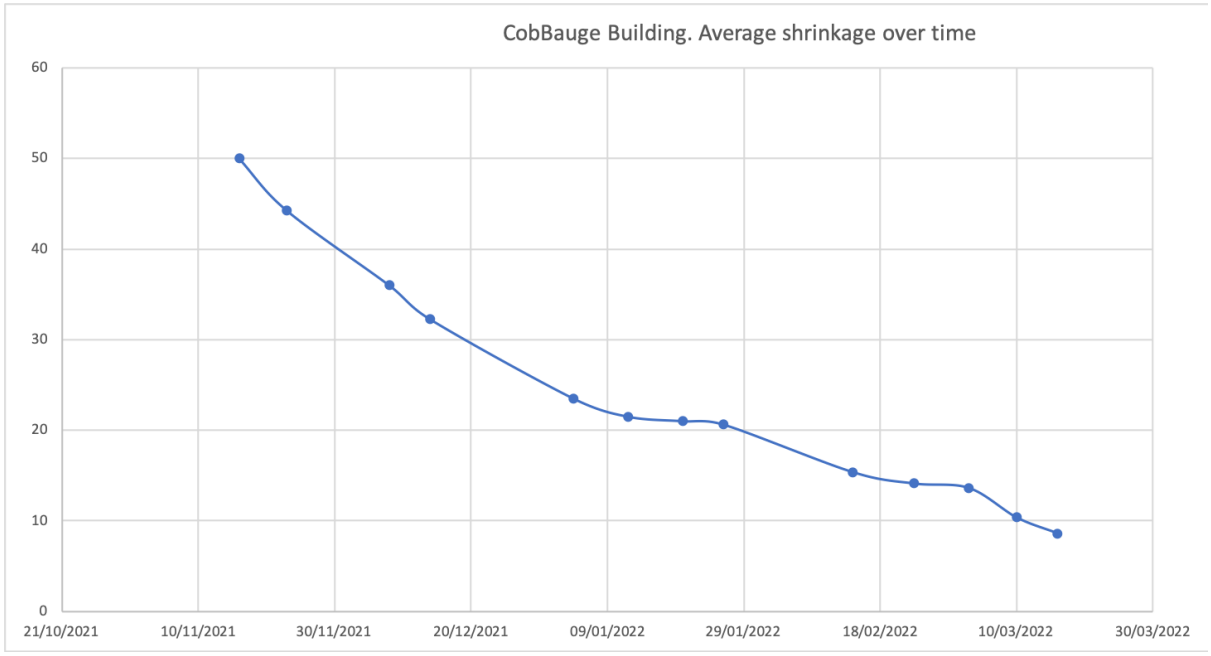
Importation de plusieurs plans et sections dans SketchUp

Les points de coupe pris au fil du temps dans la Disto 3D ont ensuite été superposés à un dessin en coupe du bâtiment fourni par l'architecte.

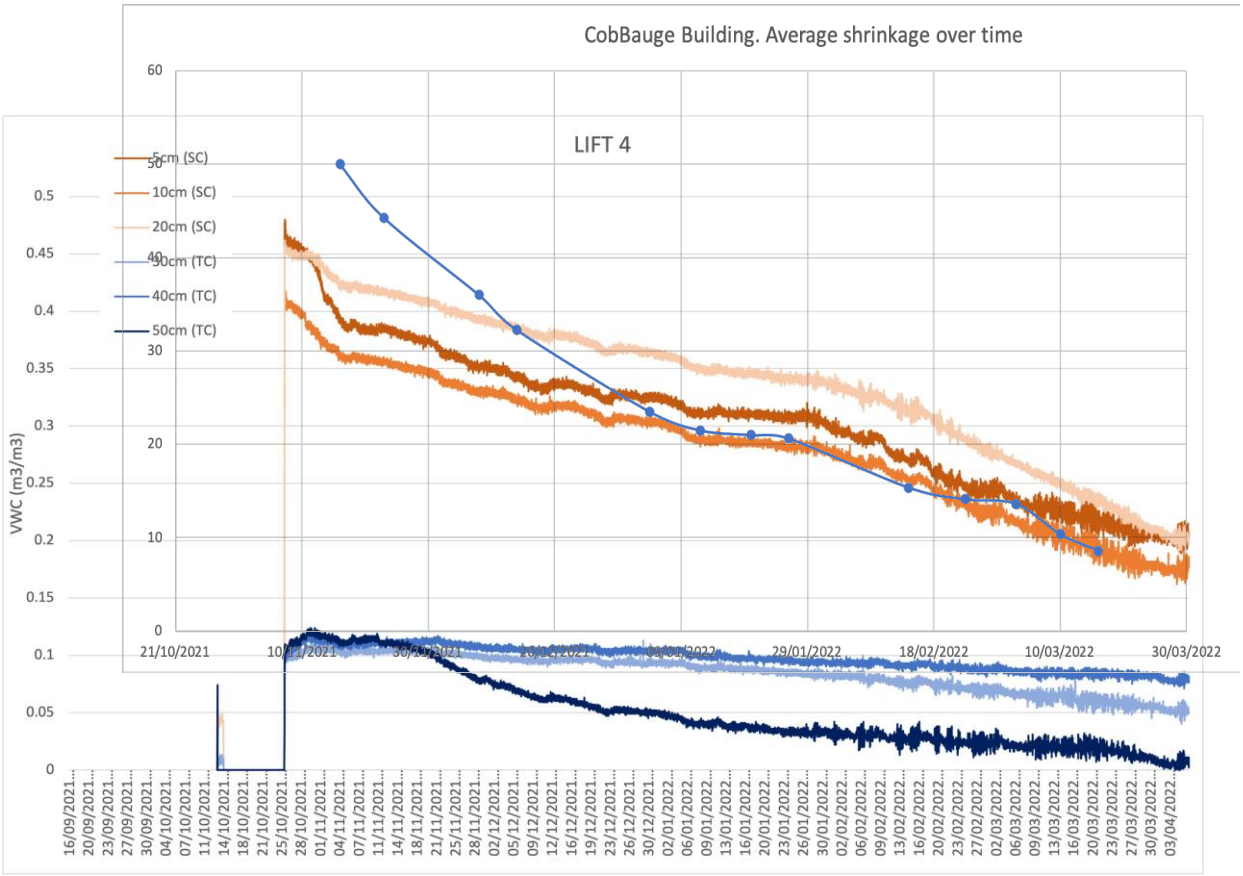


Results:

La distance entre les points pris au plafond indique un taux de rétrécissement vertical qui peut être tracé au fil du temps.

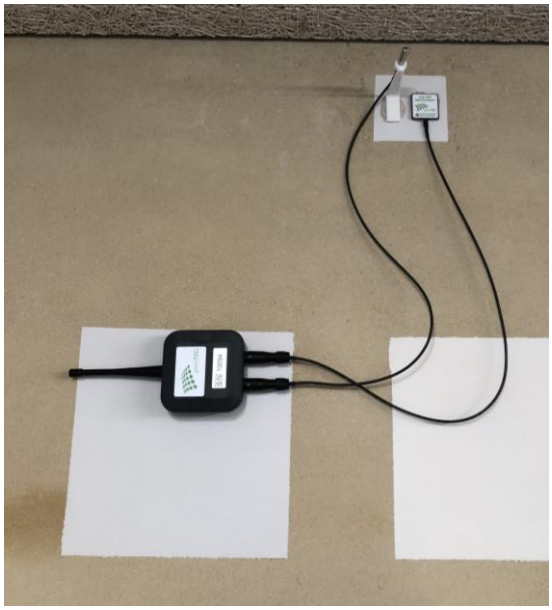


Si l'on revient au graphique de la teneur en eau et que l'on superpose les données relatives au retrait sur la même période, on constate une étroite corrélation, en particulier pendant la période de janvier 2022, lorsque la teneur en eau a atteint un plateau et que le retrait s'est ralenti en même temps.



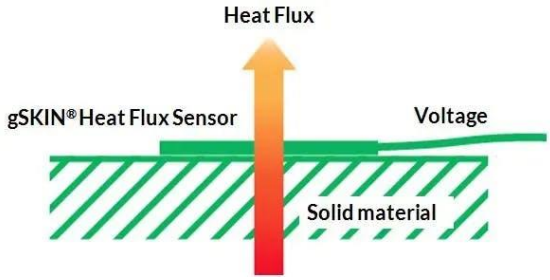
Rétrécissement au fil du temps à partir de la Disto 3D superposée à la teneur en eau des murs

Capteurs de flux thermique



Deux paires de capteurs de flux de chaleur Greenteg ont été fixées sur deux des murs du bâtiment CobBauge.

Les capteurs de flux de chaleur peuvent être utilisés pour mesurer la valeur U réelle d'un élément de construction.

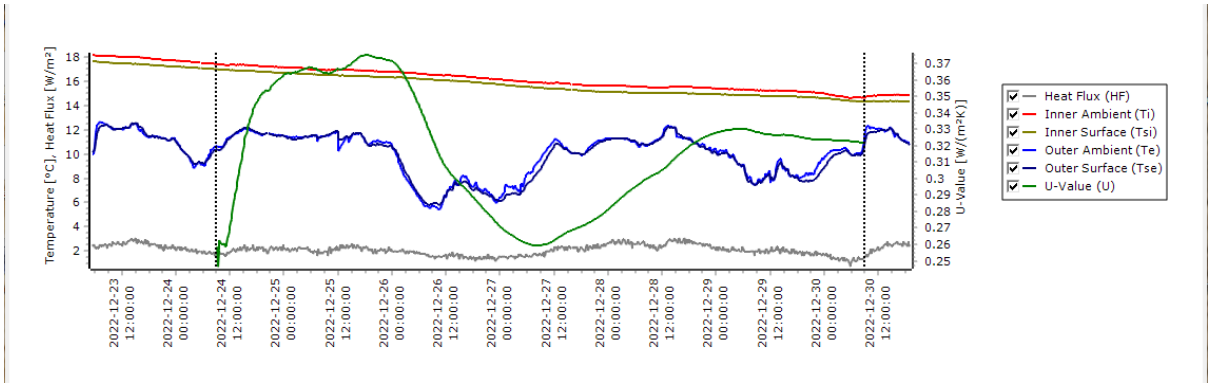


Le capteur de flux thermique génère un signal de tension proportionnel à la chaleur qui traverse l'élément du capteur. En utilisant la formule appropriée, ce signal peut être converti en une mesure de la chaleur qui traverse le mur, ce qui donne une indication en temps réel de l'efficacité thermique du mur et donc une valeur U réelle.

La valeur U d'un élément de construction est normalement calculée au cours du processus de conception, et c'est ce calcul qui est utilisé pour obtenir l'approbation de la réglementation en matière de construction

Plymouth + finishes				
	Density kg/m3	**Thickness m**	**Cond. W/m.K**	**Resistance m2 K/W**
Internal surface		n/a	n/a	0.12
Internal earthen plaster		0.03	0.44	0.07
Structural Crediton	1635	0.300	0.44	0.68
Ottery 50% Hemp shiv	340	0.300	0.13	2.31
Lime render		0.03	0.60	0.05
External Surface		n/a	n/a	0.06
Total Resistance				3.29
U-Value W/m2K				**0.30**

La valeur U calculée de ce mur CobBauge est de 0,30 watts par mètre carré Kelvin (Wm2K).
Ce qui est exactement le chiffre exigé par les règlements de construction du Royaume-Uni.



Les relevés effectués par les capteurs de flux de chaleur illustrés ci-dessus donnent une valeur U moyenne mesurée de 0,29 W/m2.K.
Cela démontre que le mur CobBauge dépasse les normes de construction établies pour ce bâtiment.

Qualité de l'air intérieur (QAI)

Les facteurs qui contribuent à la qualité de l'air intérieur d'un bâtiment sont les suivants :

- les produits chimiques organiques volatils (COV)
- le formaldéhyde
- Les particules mesurées en différentes tailles (PM1, PM2.5, PM5, PM10)
- l'humidité relative
- Niveaux de CO2
- Niveaux de temperature
-

La qualité de l'air intérieur du bâtiment Cobbauge est contrôlée de deux manières, par des appareils portables et des capteurs fixes d'enregistrement des données.

Les principaux appareils portables utilisés sont les suivants

Capteur de gaz Grey Wolf IAQ

Compteur de particules Grey Wolf

Mesures de la qualité de l'air extérieur

Mesures de la qualité de l'air extérieurPour pouvoir porter un jugement valable sur la qualité de l'air intérieur, il est essentiel d'enregistrer les principaux facteurs externes :

- l'humidité relative
- Niveaux de CO2
- Niveaux de température
- Conditions météorologiques générales

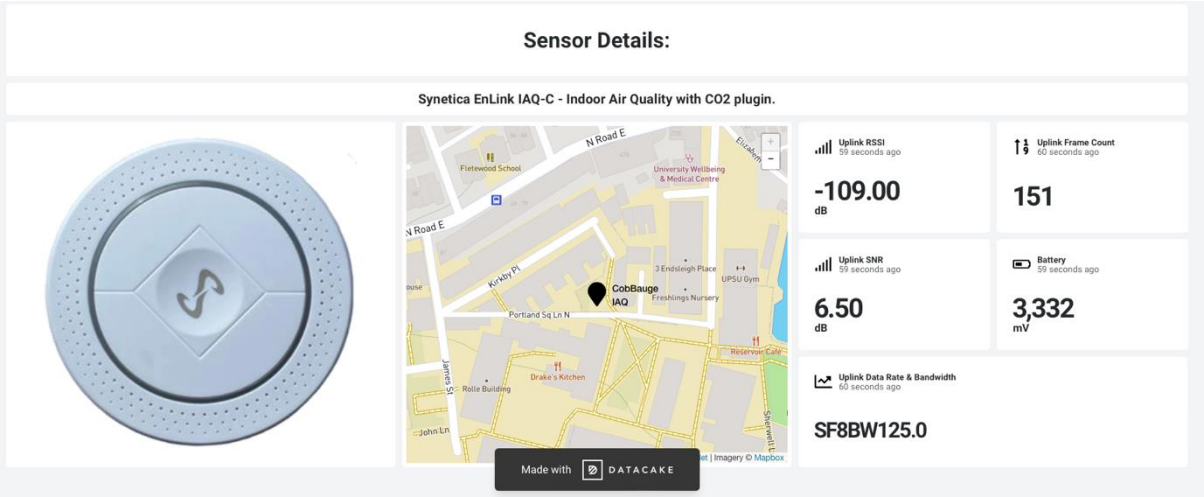
Les capteurs portables sont utiles pour faire des relevés sur place et pour faire des comparaisons avec d'autres bâtiments, mais l'image la plus détaillée de la qualité de l'air intérieur provient de l'utilisation d'un capteur d'enregistrement de données Synetica Enlink IAQ-C

Celui-ci est connecté à un réseau sans fil appelé 'LoRaWan' et peut être visualisé à partir de n'importe quel ordinateur, et est également disponible via un tableau de bord sur le site web de CobBauge.

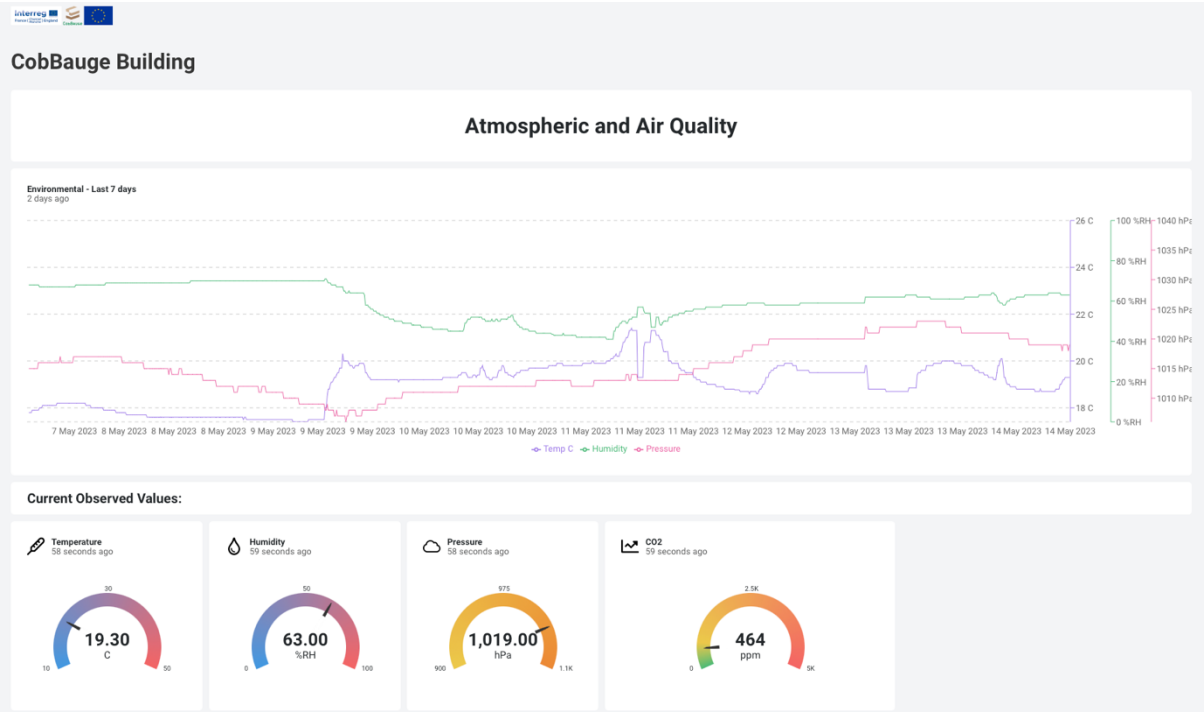
LoRaWAN est un protocole de réseau étendu à faible consommation d'énergie construit sur la base de la technique de modulation radio LoRa. Il connecte sans fil les appareils à l'internet et gère la communication entre les appareils des nœuds finaux et les passerelles de réseau.

Results.

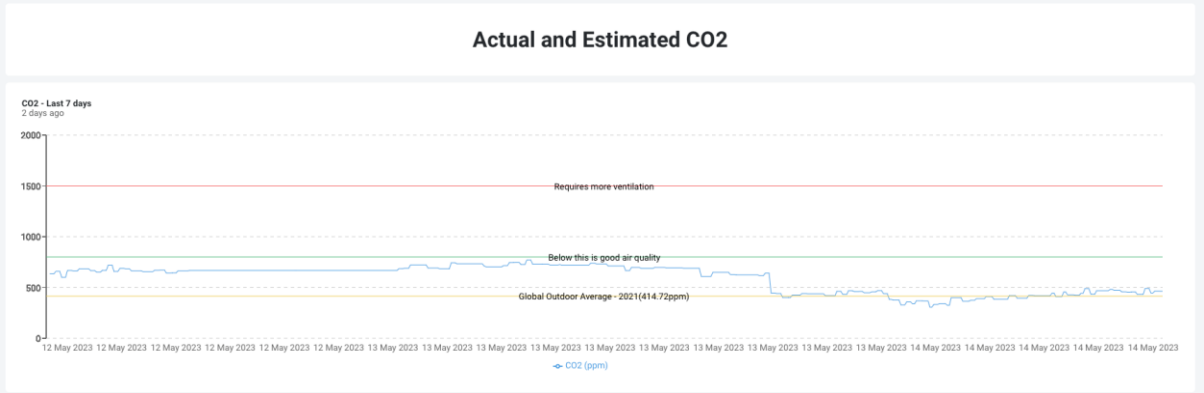
Les résultats de la surveillance de la QAI sont affichés sur un tableau de bord. Les résultats de la QAI en direct ressemblent à ceci :



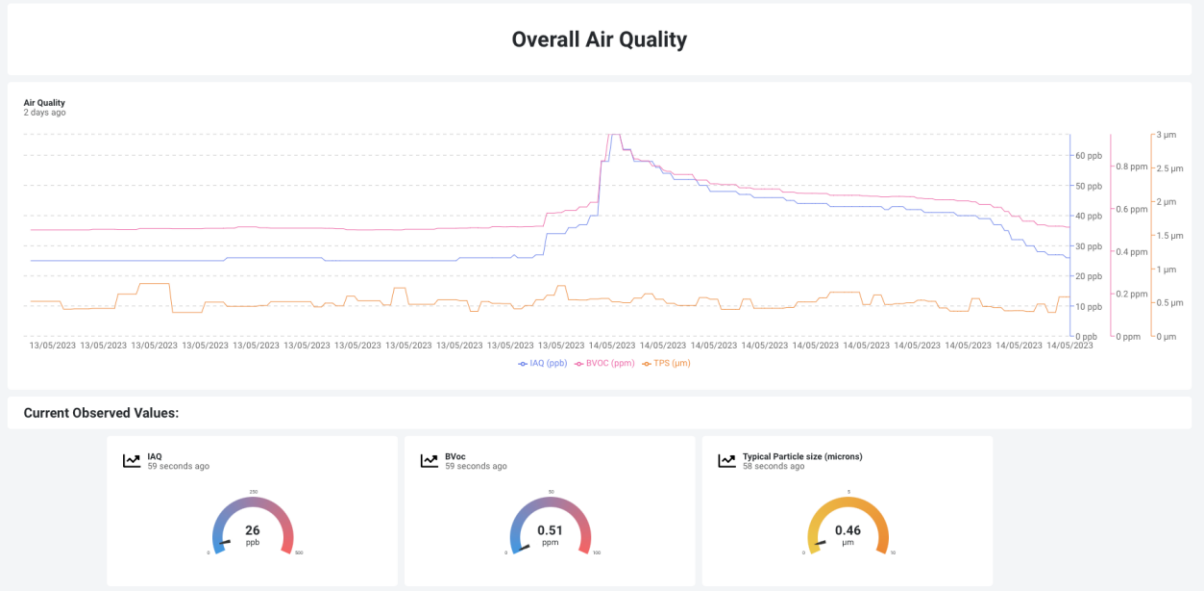
Détails du capteur et de son emplacement



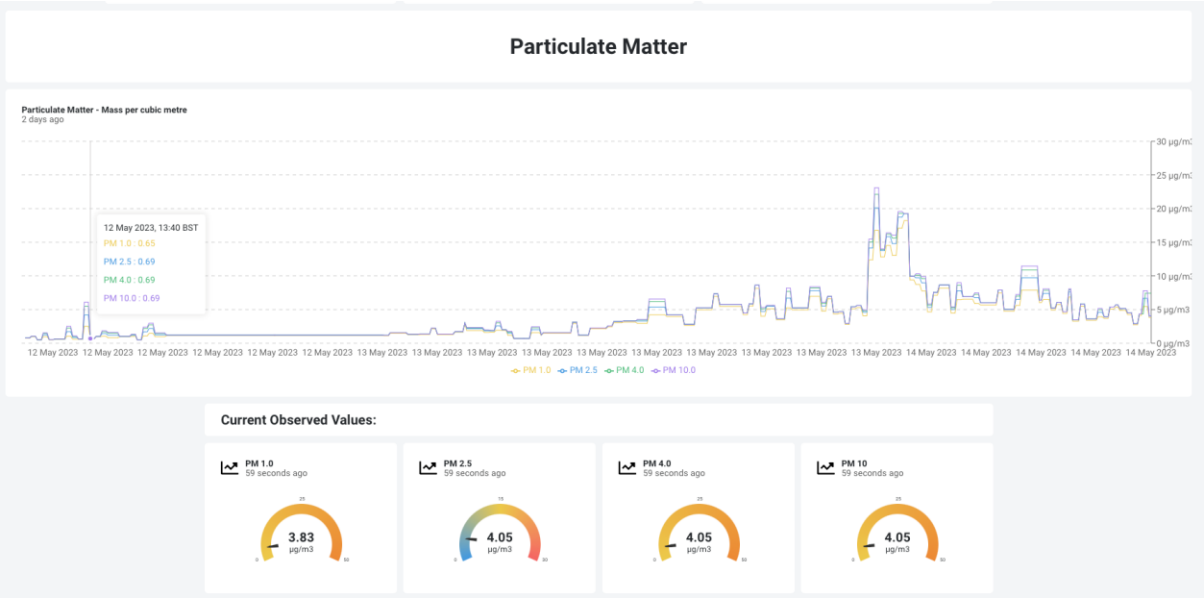
La première page indique la température, la pression et l'humidité relative de l'air intérieur.



La section suivante enregistre les niveaux de CO2 dans le bâtiment



Cette section couvre les produits chimiques organiques volatils.



Enfin, les différentes tailles de particules sont enregistrées.

Analyse.

Les résultats de la surveillance de la QAI présentés ci-dessus concernent une période située à la mi-mai 2023.

Parce que nous pouvons surveiller l'utilisation du bâtiment, nous pouvons tirer quelques conclusions sur l'environnement à l'intérieur de celui-ci.

Le principal facteur qui régit la QAI du bâtiment CobBauge est la population qui l'occupe. Dans les résultats présentés ci-dessus, il y a une période où le bâtiment est inoccupé, suivie d'une période d'occupation. Dans chaque section (à l'exception du CO2), ce sont les personnes présentes dans le bâtiment qui apportent des COV et des particules, et qui affectent la température et l'humidité relative.

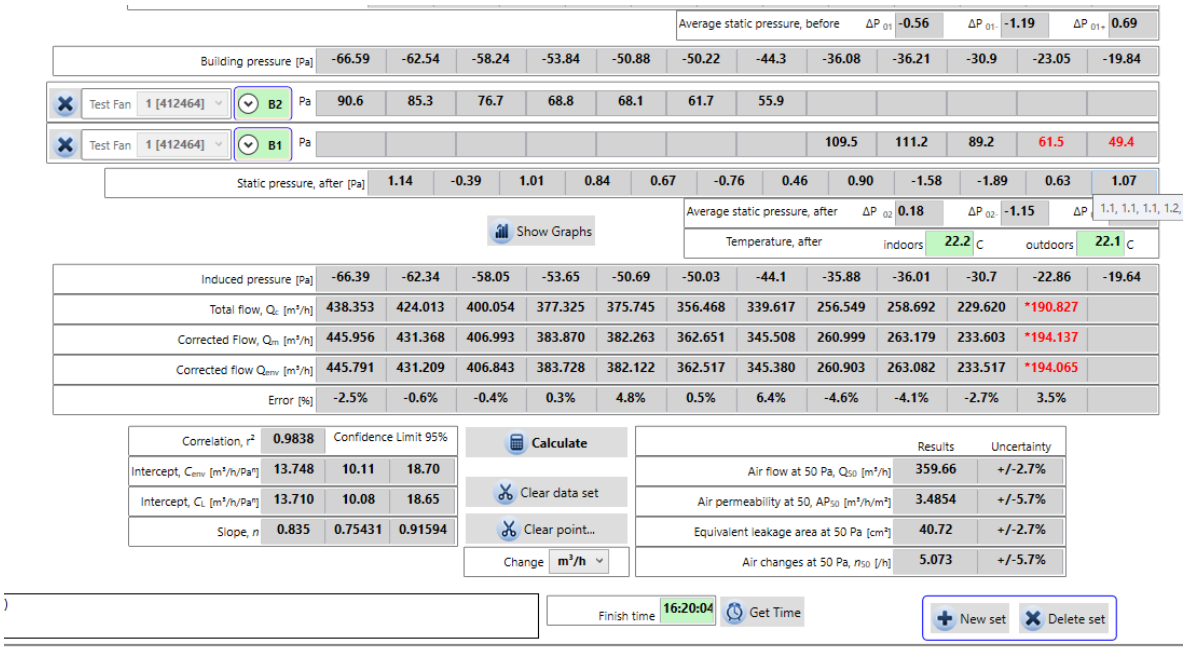
Test d'étanchéité à l'air.

Tous les bâtiments au Royaume-Uni doivent atteindre un certain niveau d'étanchéité à l'air ou de perméabilité. Cette exigence est judicieuse car l'énergie thermique peut être perdue à cause d'une ventilation non identifiée. Le principe est le suivant : "Construire de manière étanche et ventiler correctement".

La méthode standard pour tester la perméabilité est le test de la porte soufflante. Après avoir fermé toutes les sources de ventilation connues (fenêtres, bouches d'aération, etc.), la porte est scellée à l'aide d'un appareil spécial contenant un grand ventilateur. Ce ventilateur est ensuite utilisé pour mettre le bâtiment sous pression afin de mesurer le niveau de perméabilité.

Un système de porte soufflante a été installé à Plymouth.

L'infiltromètre est contrôlé par un ordinateur portable qui fournit une série de résultats détaillés (ci-dessous).



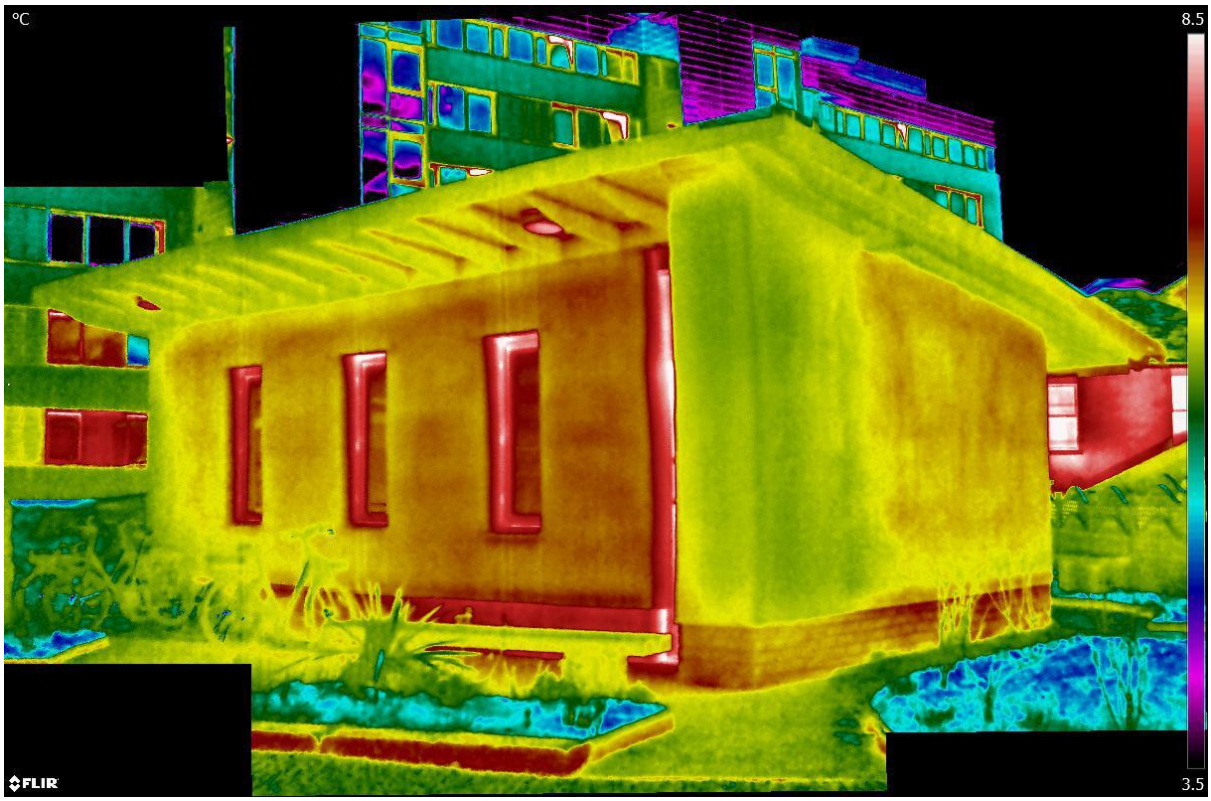
	Results	Uncertainty
Air flow at 50 Pa, Q_{50} [m³/h]	359.66	+/-2.7%
Air permeability at 50, AP_{50} [m³/h/m²]	3.4854	+/-5.7%
Equivalent leakage area at 50 Pa [cm²]	40.72	+/-2.7%
Air changes at 50 Pa, n_{50} [/h]	5.073	+/-5.7%

Les résultats sont les suivants:

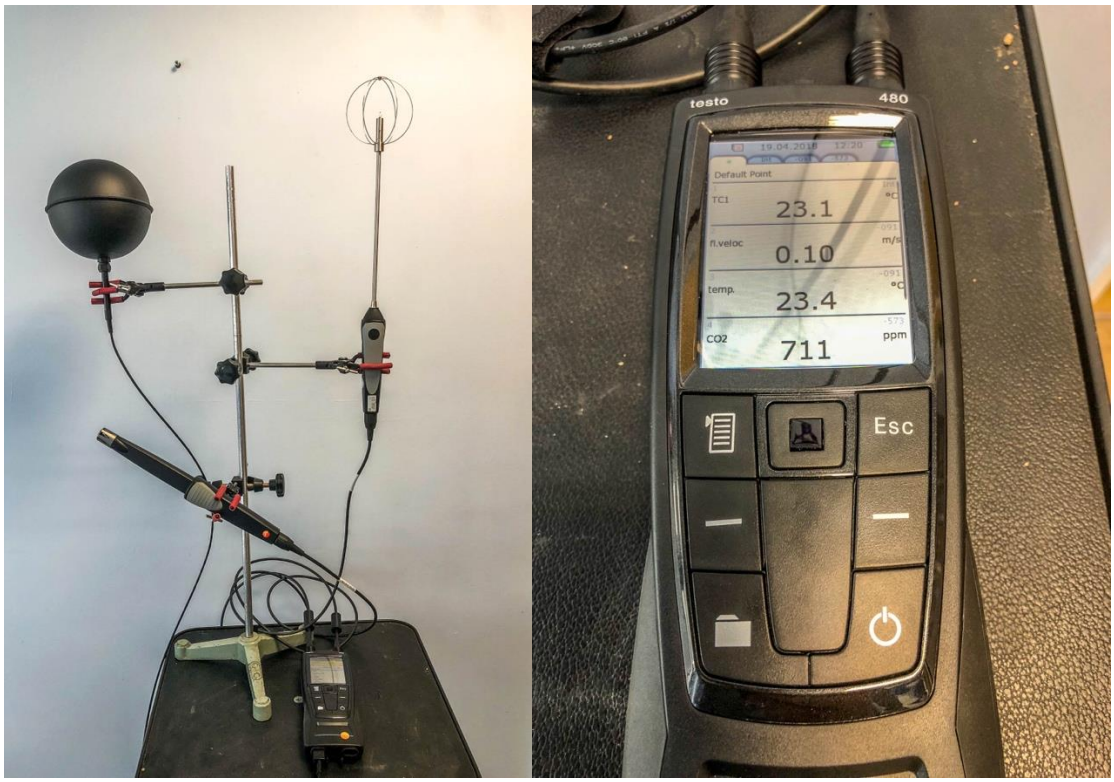
- Perméabilité à 50Pa :
  3,48 - 4,05 m3/h/m2 après deux mesures
- La réglementation anglaise actuelle en matière de construction exige que les nouvelles habitations présentent des fuites d'air d'environ 5 m3/h/m2 ou moins.
- Ce bâtiment dépasse largement les normes de construction.

Thermographie

L'utilisation de caméras thermographiques a été pionnière à Plymouth.
L'image ci-dessous montre une bonne performance constante pour le bâtiment CobBauge, avec la plupart des pertes de chaleur se produisant autour des fenêtres et de la porte, ce qui est cohérent avec les bâtiments bien isolés.
La section du mur la plus proche de la caméra est plus froide. Cela s'explique par le fait qu'elle se trouve à l'extérieur de l'enveloppe thermique du bâtiment.



Confort thermique



Compteur de confort Testo 480 avec capteurs associés.

Un appareil de mesure du confort thermique Testo 480 a été utilisé pour calculer le vote moyen prédit (PMV) pour les occupants théoriques du bâtiment. Le résultat se situe dans la marge de +/- 5% qui est acceptable pour plus de 90% des habitants (ci-dessous).

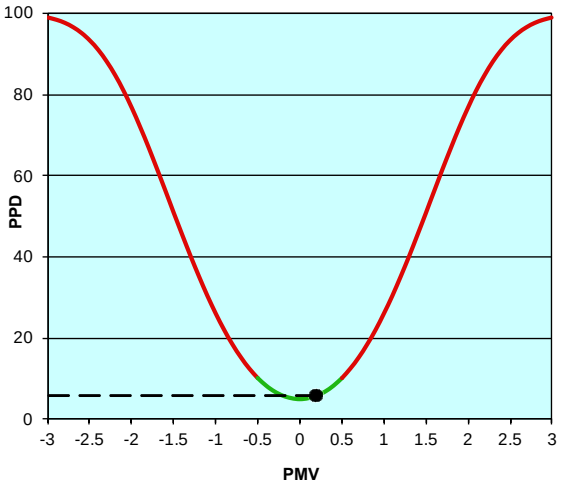
Parameter	Input	
Clothing (clo)	1.40	[0 to 2clo]
Air temp. (°C)	22.5	[10 to 30°C]
Mean radiant temp. (°C)	22.5	[10 to 40°C]
Activity (met)	1.0	[0.8 to 4met]
Air speed (m/s)	0.10	[0 to 1m/s]
Relative humidity (%)	29.7	[30 to 70%]

Calculate PMV

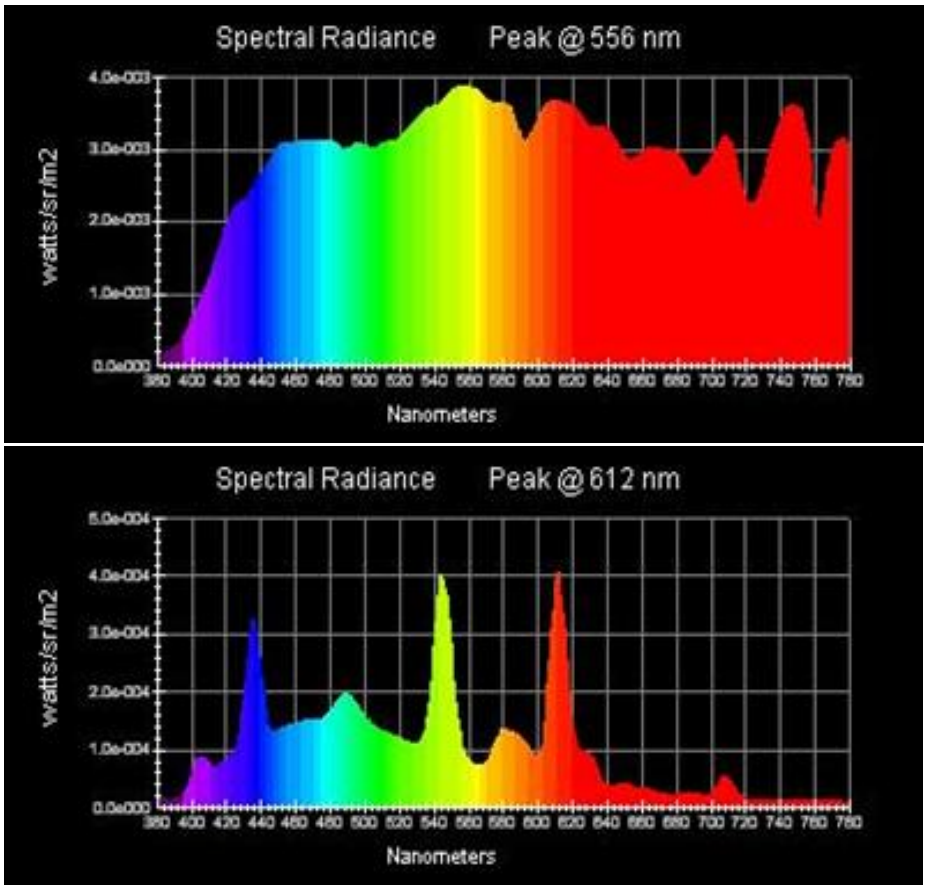
Parameter	Results
Operative temp. (°C)	22.5
PMV	0.2
PPD	5.8

Number of iterations: 6

Modified by Håkan Nilsson
Department of Technology and Built Environment
Laboratory of Ventilation and Air Quality
University of Gävle

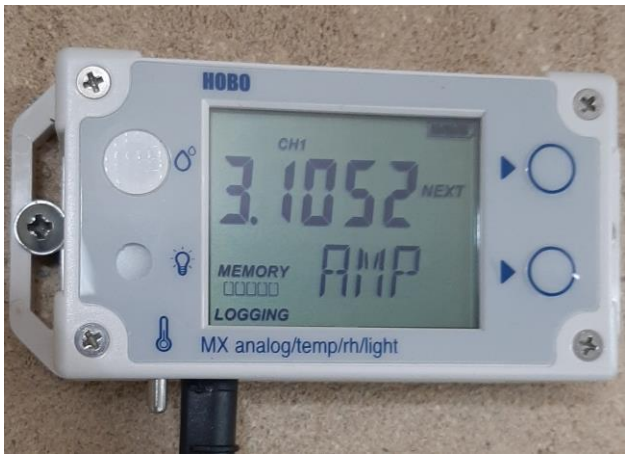


Température de la lumière

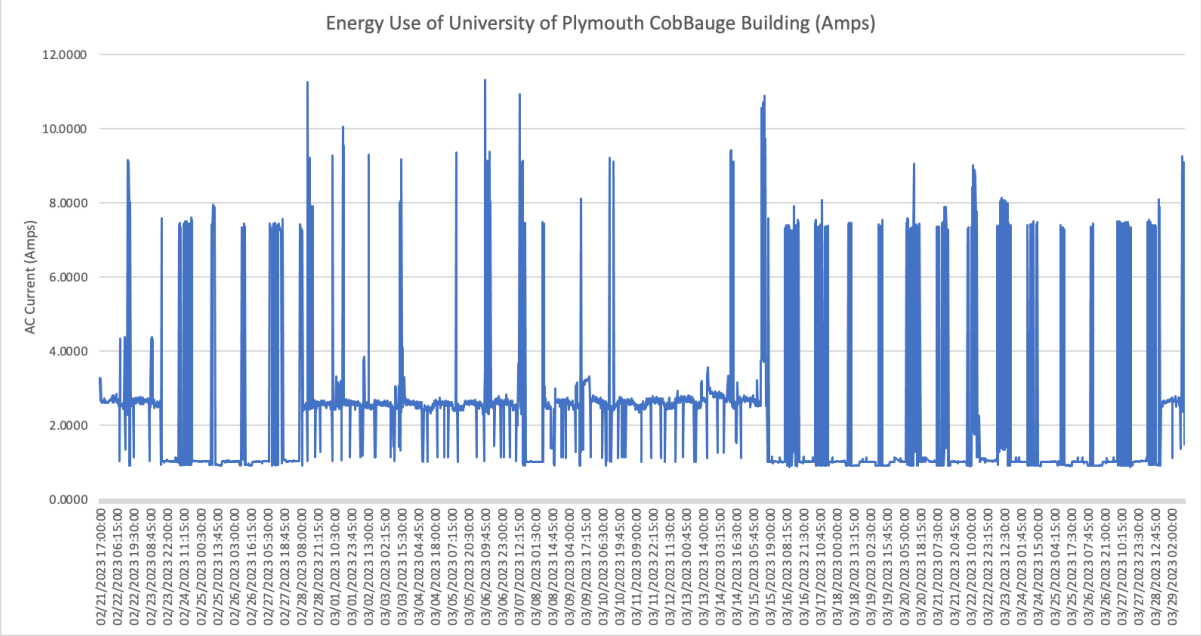


Résultats de la radiance spectrale pour la lumière du jour (en haut) et l'éclairage artificiel (en bas) pour le bâtiment CobBauge. Le résultat sous éclairage artificiel montre une plus grande dispersion de la radiance avec trois pics distincts. C'est mieux que l'éclairage normal à faible consommation d'énergie qui n'a normalement qu'un seul pic et une dispersion plus faible.

Consommation d'énergie



Compteur d'énergie électrique Hobo à enregistrement de données



Résultats de la consommation d'énergie électrique entre le 21 février et le 29 mars 2023

A partir des résultats ci-dessus, nous pouvons calculer l'énergie électrique réelle utilisée pour le chauffage des locaux dans le bâtiment CobBauge et la comparer aux différentes normes utilisées au Royaume-Uni.

Consommation d'énergie pour le chauffage des locaux :

Réglementation en matière de construction 74,5 kWh/m2/an
Norme AECB 48 kWh/m2/an
PassivHaus 15 kWh/m2/an

CobBauge 44 kWh/m2/an

On peut constater que le bâtiment CobBuage dépasse à la fois les exigences des règlements de construction et la norme AECB. Le bâtiment n'a pas été conçu pour être conforme à la norme PassivHaus.

Capacité thermique spécifique

'La maison reste fraîche en été et chaude en hiver".
La masse thermique est souvent abordée sous l'angle du rôle que les matériaux utilisés dans la construction peuvent jouer dans le contrôle passif des environnements internes.
La propriété d'un matériau à fournir une "masse thermique" est appelée "capacité thermique spécifique" ou "capacité thermique volumétrique" et peut être mesurée.

Le débitmètre de chaleur Netzsch HFM446 et une section de CobBauge montrant le mélange dense de torchis qui se trouve à l'intérieur du mur et qui a donc un effet direct sur l'environnement interne.

En utilisant notre compteur de chaleur, nous avons mesuré la capacité thermique d'une gamme de mélanges CobBauge.
Voici le résultat d'un mélange structurel typique (2,5% de fibres, densité 1635kg/m3)
Cela donne une valeur Cp - capacité thermique spécifique avec une valeur moyenne de 879 J/kg.K sur trois températures.

2.5% fibre	Middle Temp.	N-Factor (HFT)	Q-Total (correction)	Q-Total (test)	Cp-Value (calculated)
	°C		mV·s	mV·s	J/(kg·K)
1	20.0	0.00609	3816	86915	864.706
2	25.0	0.00609	3620	87399	871.785
3	30.0	0.00609	3678	90343	901.810

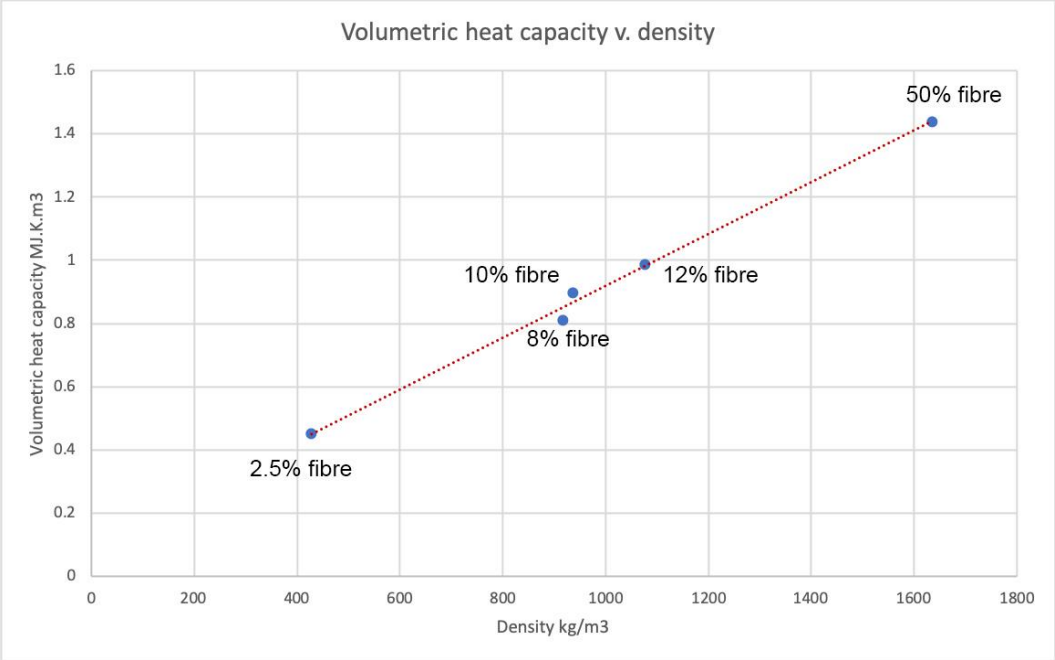
Pour simplifier les résultats, nous pouvons prendre une moyenne de chacune des valeurs de chaleur spécifique et les représenter en fonction de la densité des échantillons.

Échantillon Densité (kg/m3) Capacité thermique spécifique (J/kg.K)
Fibre 2,5% 1635 879

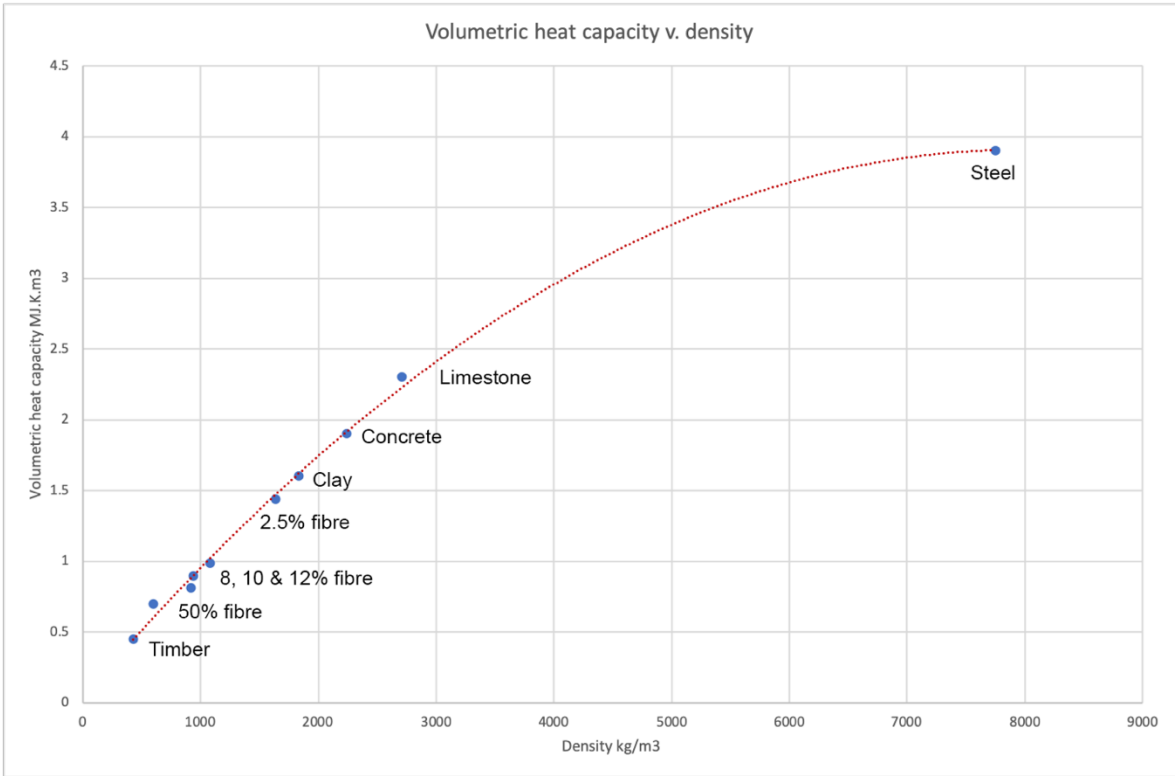
Des mesures antérieures effectuées à Plymouth à l'aide d'une méthode plus traditionnelle avaient permis d'établir un chiffre de 891J/kg.K pour le torchis (Goodhew et al., 1995), qui correspond à ces chiffres plus récents.

La capacité thermique volumétrique est plus utile pour les professionnels de la construction, car elle donne une valeur pour un volume donné de matériau (mètre cube).

Échantillon	Densité (kg/m3)	Capacité thermique volumétrique (MJ.K.m3)
Fibre 2,5%	1635	1,438
Fibre 8%	1077	0.988
Fibre 10%	936	0.898
Fibre 12%	916	0.810
Fibre 50%	428	0.451



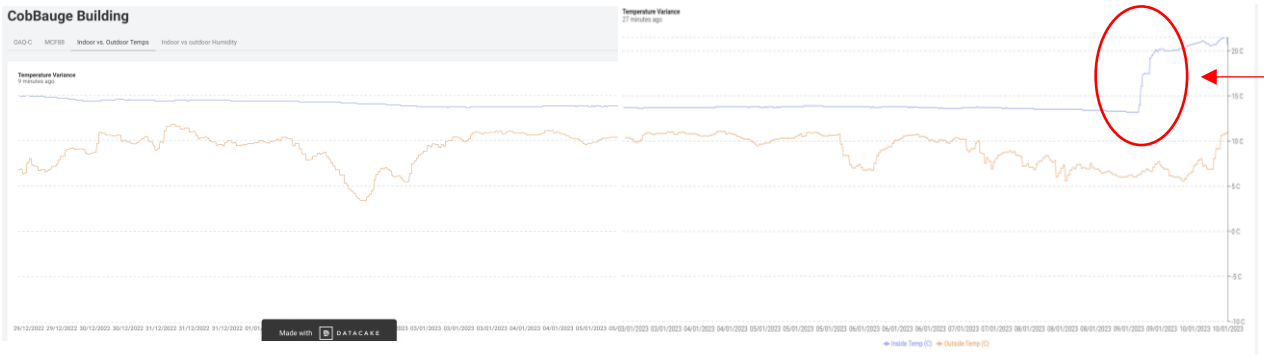
Les résultats pour une gamme de cinq mélanges CobBauge différents montrent un résultat cohérent pour la capacité thermique volumétrique des échantillons de torchis.



Graphique montrant les cinq mélanges CobBauge par rapport à une gamme d'autres matériaux de construction.

Le graphique ci-dessus montre que les résultats des cinq mélanges CobBauge sont cohérents par rapport aux chiffres d'une gamme plus large de matériaux utilisés dans la construction.

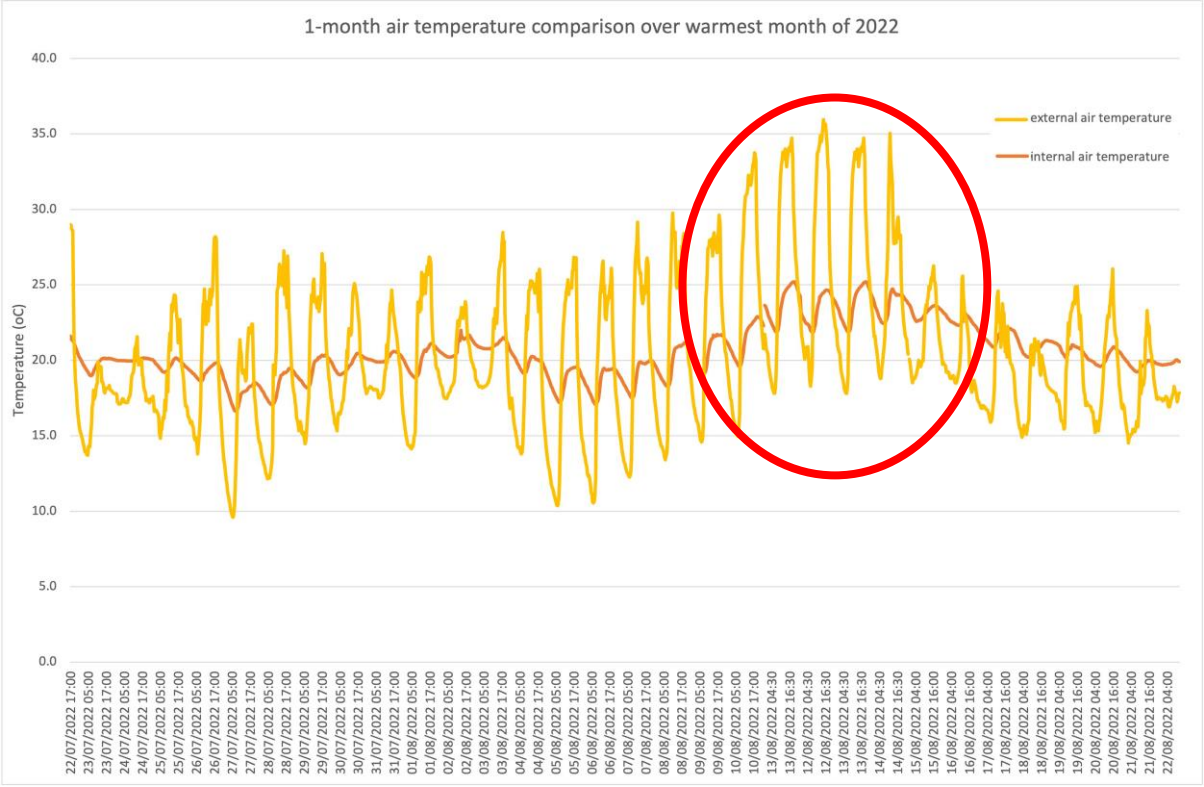
Stocker l'énergie thermique en hiver



Les qualités de l'augmentation de la masse thermique dans le bâtiment peuvent être démontrées par ce graphique qui montre la température interne diminuant très progressivement pendant les vacances de Noël (avec le chauffage éteint). La perte totale a été inférieure à 2o C sur une période de deux semaines.

Les effets de la masse thermique pourraient laisser supposer qu'il y aurait un décalage dans le chauffage du bâtiment après la pause, mais nous voyons ici la température de l'air remonter rapidement à la température de fonctionnement.

Refroidissement estival



Températures intérieures et extérieures pendant la canicule, en particulier du 10 au 14 août 2022

Pendant les quatre jours où les températures externes ont atteint 36,5oC, la température interne est restée stable sans dépasser 25oC. Si l'on considère les jours précédents, la température interne reste à peu près à équidistance des pics et des creux des variations diurnes externes, comme on pouvait s'y attendre. Lorsque les températures externes augmentent, la température interne présente deux comportements intéressants : la température interne moyenne ne représente plus que 30 % des niveaux externes et la température interne ne semble pas augmenter.

Comportement des deux composites qui constituent le mur

La littérature nous apprend que la masse (capacité thermique volumétrique) permet d'amortir les variations diurnes de temperature

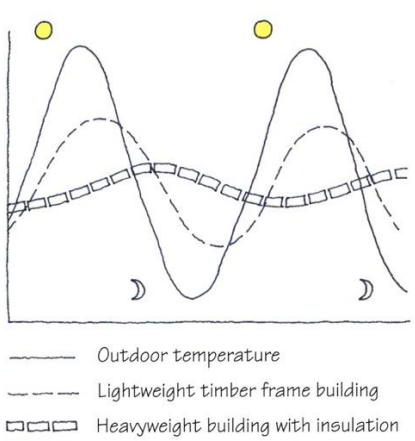
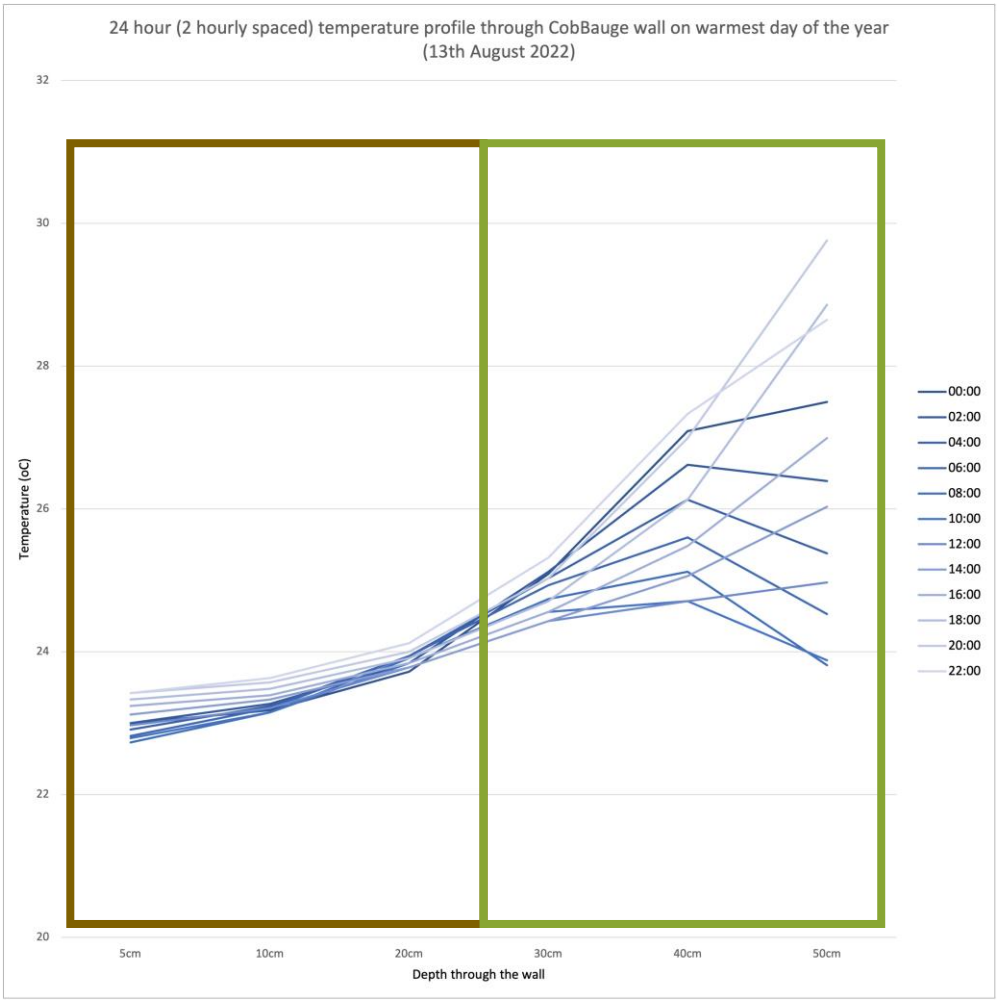


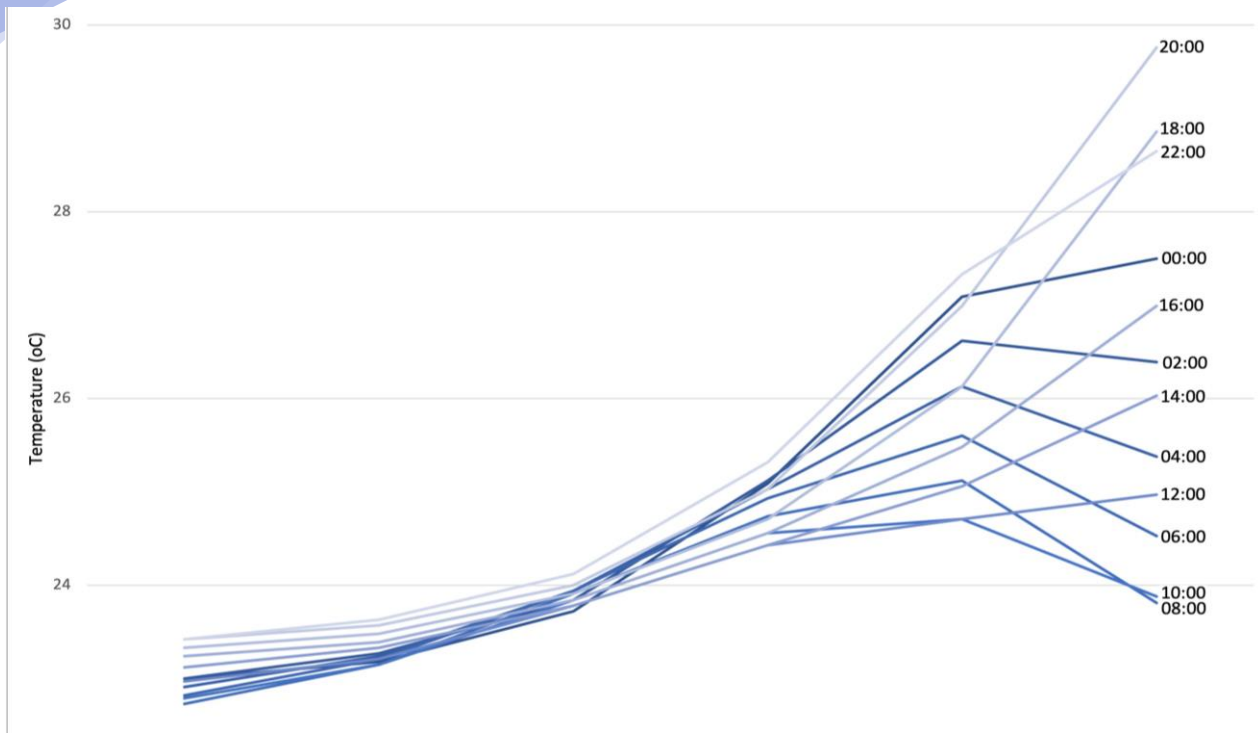
Illustration de Huw Heywood

Par rapport à la température d'une structure légère, le stockage de l'énergie dans une structure lourde se traduit par un amortissement et un décalage plus importants de la température.

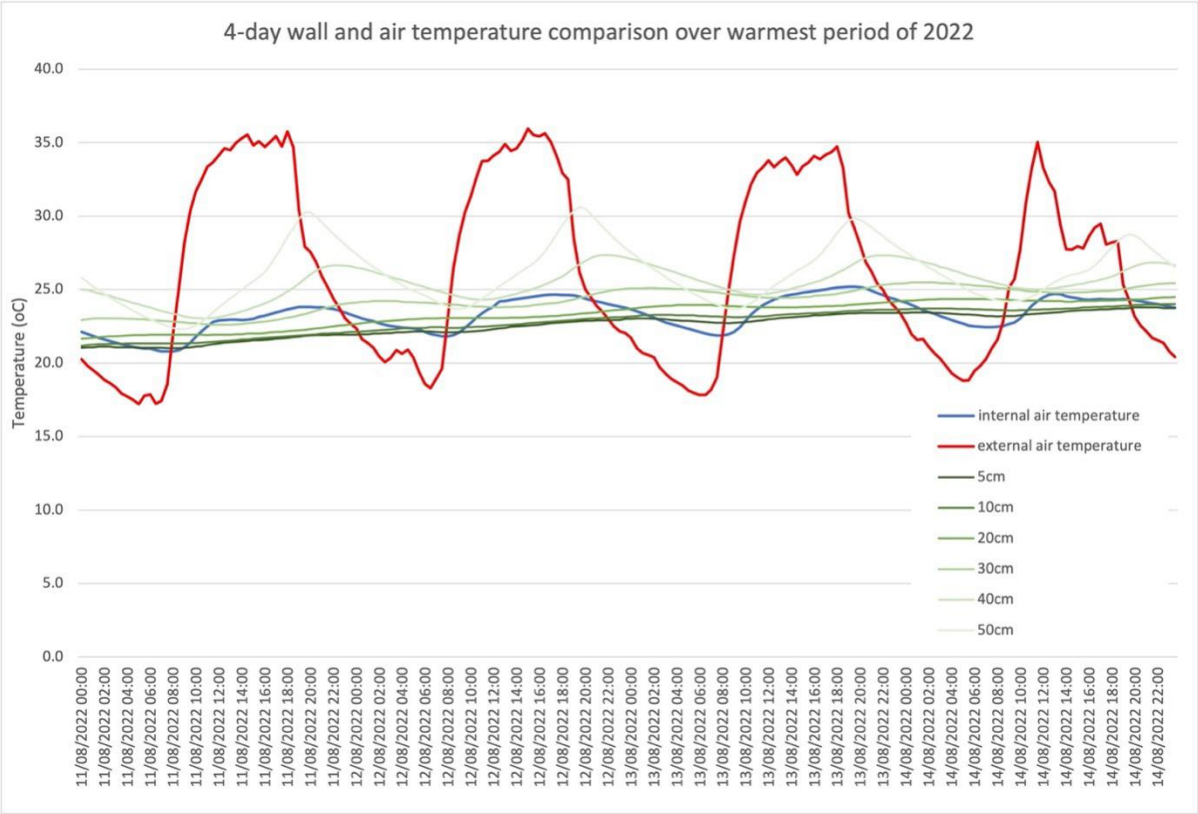
Th Pour s'en convaincre, il suffit d'examiner de plus près l'évolution de la température à travers les deux couches de la paroi de la CobBauge.



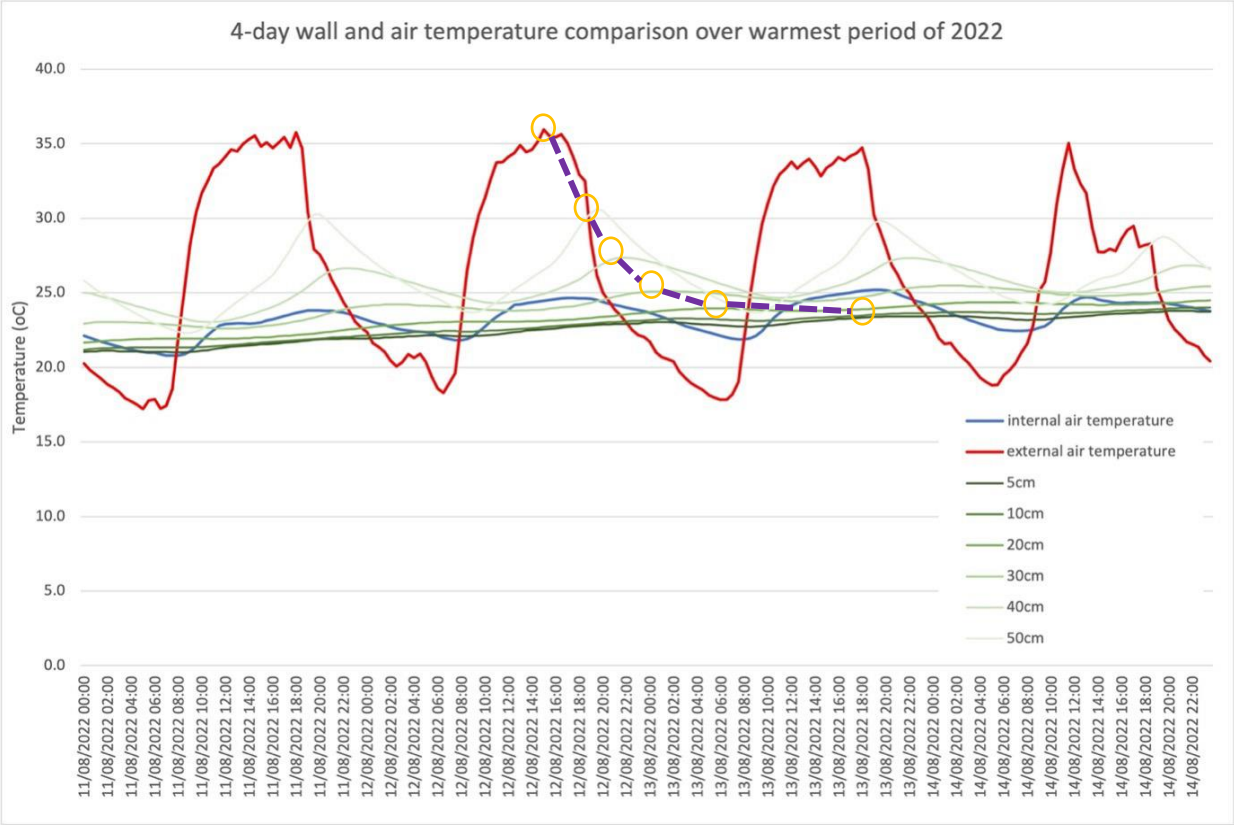
Ce graphique montre l'évolution de la température à travers la profondeur du mur à deux heures d'intervalle lors de la journée la plus chaude, avec une superposition montrant le mélange dense (à gauche, marron) et le mélange thermique (à droite, vert).



En y regardant de plus près, avec les heures attachées à chaque trace.
À partir de 00h00, la température baisse régulièrement jusqu'à 08h00, heure à laquelle la température est tombée à 23,8°C. À partir de 10h00, la température augmente jusqu'à atteindre 29,7°C à 20h00. C'est la température la plus élevée à l'intérieur du mélange thermique, il y a donc déjà un décalage significatif par rapport à la température de l'air extérieur.
Au centre de l'enrobé thermique léger, nous atteignons le point où les variations de température ont un décalage d'environ 12 heures.
Au début du mélange structurel dense, les températures se sont rapprochées - et vers l'intérieur du bâtiment, elles se maintiennent à un degré près sur une période de 24 heures.



Graphique montrant les changements de température à travers le mur pendant la période de la canicule. Distances à partir de l'intérieur, les traces les plus pâles sont donc vers l'extérieur du mélange thermique.



Le même graphique avec des cercles jaunes mettant en évidence les pics de température au fur et à mesure qu'ils se déplacent dans le temps.

En superposant les pics de température dans le temps à partir du pic de la température extérieure à 16h00, nous pouvons voir un schéma clair à mesure que le retard de température se propage à travers le mur. Le décalage thermique dans ce mur est d'environ 24 heures. Au fur et à mesure que l'on s'enfonce dans la structure, les pics sont plus difficiles à tracer, à tel point que le tracé situé à 5 cm de l'intérieur ne montre qu'une augmentation très progressive de la température d'environ 2°C au cours des quatre jours de la vague de chaleur.

Conclusion.

Le prototype CobBauge de Plymouth a été contrôlé et évalué dans les domaines suivants :

- Mesure de la teneur en humidité des murs et des taux de retrait associés
- L'utilisation de capteurs de flux de chaleur pour enregistrer les valeurs U en temps réel
- Les différents capteurs utilisés pour enregistrer la qualité de l'air intérieur (QAI)
- Qualité de l'air extérieur
- Test d'étanchéité à l'air à l'aide d'un dispositif d'infiltrométrie
- Utilisation de caméras thermiques pour évaluer la performance thermique
- Une méthode pour diffuser les données d'un capteur d'air intérieur à travers un réseau local, et le tableau de bord sur le site web CobBauge.
- Confort thermique
- L'éclairement et la qualité de l'éclairage
- Une évaluation du rôle de la capacité thermique spécifique des murs CobBauge.

Tous les domaines testés ont donné des résultats encourageants, aucun des contrôles n'ayant produit de données indiquant autre chose qu'une performance supérieure à la spécification conçue et dépassant les attentes du projet dans son ensemble.