

Mesures du champ de température par fibres optiques au sein d'un local expérimental industriel dédié à l'étude des phénomènes thermo-aérauliques

Rafik MOULOUEL^{1,2,3*}, Maxime HOUVIN¹, Pascal BOREL¹, Marc ABADIE^{2,3}, Patrick SALAGNAC^{2,3}

¹EDF R&D-PRISME

6, quai Watier – 78400 Chatou

²LaSIE (UMR CNRS 7356) – La Rochelle Université

³Laboratoire Commun 4evLab, CNRS - EDF R&D - LaSIE

*(auteur correspondant : rafik.moulouel@edf.fr)

Résumé - Cet article propose une description de l'instrumentation par fibres optiques d'un moyen d'essai d'EDF R&D dédié à l'étude des phénomènes thermo-aérauliques au sein de locaux abritant des matériels électriques thermosensibles. Cette mesure répartie sur la longueur d'une fibre optique se base sur la rétrodiffusion par effet Raman et permet, après traitement et recalage spatial des données, de cartographier les champs tridimensionnels des températures dans les murs de ce local expérimental. Cette mesure permet également le suivi temporel de l'évolution des champs de température dans les murs de ce moyen d'essai « Local Témoin CNPE ».

Nomenclature

l distance, m

k vecteur d'onde, m^{-1}

P puissance, W

t temps, s

T température, K

Symboles grecs

α atténuation, $dB.km^{-1}$

Indices et exposants

as anti-Stockes

s Stockes

1. Introduction

Afin de disposer de données de référence sur les phénomènes thermo-aérauliques dans les locaux abritant des matériels électriques thermosensibles, un local expérimental représentatif de locaux électriques ou de contrôle-commande de centrales nucléaires, a été défini dans le projet de laboratoire de ventilation ZEPHYR d'EDF-R&D. Ce local à l'échelle 1, fortement instrumenté, notamment pour la mesure des températures dans les murs et dans l'air, permet de réaliser des expériences dans des conditions maîtrisées afin de valider des modèles numériques.

La cartographie d'un champ de température peut être réalisée à l'aide d'une matrice de sondes ponctuelles, comme des thermocouples [1], difficiles à mettre œuvre, ou à l'aide de la thermographie infrarouge, permettant la cartographie des températures de surface, mais présente une incertitude non maîtrisée et n'est pas adaptée à des fins métrologiques [2]. Les capteurs à fibres optiques (CFO), permettent également la mesure de température dans des structures noyées. Cette mesure est répandue, notamment à EDF, afin de surveiller et d'ausculter ses infrastructures et bénéficie d'un retour d'expérience positif.

La mesure de température dans les murs en béton de ce local repose principalement sur des fibres optiques exploitant l'effet Raman. Cette technologie est simple d'utilisation, robuste et facile à mettre en œuvre. Cette mesure répartie permet de disposer de plusieurs points de mesure sur la même fibre avec une bonne incertitude.

Dans cet article, le moyen d'essai « Local Témoin CNPE » est présenté et une description de la chaîne de mesure est proposée. Ensuite, les schémas des fibres optiques dans les murs ainsi que la méthode de recalage géométrique des données sont détaillés. Enfin, différentes visualisations des données sont présentées afin d'illustrer leur exploitation.

2. Description du moyen d'essai

Le moyen d'essai « Local Témoin CNPE » est constitué d'un local d'essai avec des murs en béton de dimensions externes $12,07 \times 3,95 \times 2,86$ m (Figure 1). L'épaisseur des murs est de 20 cm. Le sol de ce local repose sur un faux plancher isolé. Ce local dispose d'une ventilation mécanique. Il intègre une bouche de soufflage et une bouche de reprise d'air.

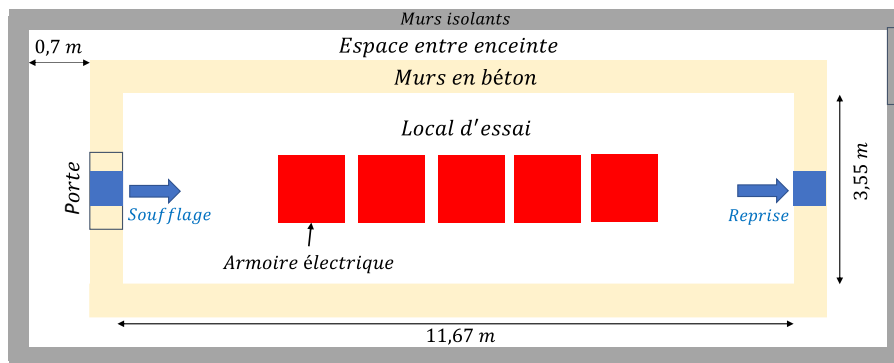


Figure 1 : Schéma du Local Témoin CNPE (vue de dessus).

Afin de maîtriser les conditions de température aux limites des parois externes du local, une enceinte complémentaire isolée est mise en place. L'espace entre les deux enceintes est conditionné par convection forcée autour de 19°C via des gaines souples microperforées.

Le local est équipé d'armoires, fermées et ventilées naturellement, dissipant de la chaleur à l'aide de plusieurs résistances électriques, réparties selon la hauteur de l'armoire, afin d'obtenir une puissance surfacique représentative des cas d'usage des locaux électriques et de contrôle-commande d'un site nucléaire (puissance variable, comprise entre 0,3 kW et 1 kW par armoire). L'apport thermique maximal prévu pour l'armoire du local est de 1 kW, cette puissance peut être régulée de 0 à 100 %.

3. Description de la chaîne de mesure

3.1. Principe de fonctionnement

Cette mesure repose sur le principe de l'OTDR (Optical Time-Domain Reflectometer) : quand la lumière se propage dans une fibre optique, une partie du faisceau incident, de longueur d'onde λ_0 , est rétrodiffusée par les défauts situés à l'intérieur de la fibre. Cette lumière rétrodiffusée est impactée de manière spectrale par trois phénomènes de rétrodiffusion de la silice (Rayleigh, Raman et Brillouin). La diffusion Raman est une diffusion inélastique, sensible uniquement à la température.

Les interrogateurs à effet Raman envoient une impulsion laser monochromatique (1064 nm ou 1550 nm) et mesurent la puissance rétrodiffusée au sein de la fibre à deux fréquences appelées pics Stokes et anti-Stokes. L'instant de retour de l'impulsion permet de calculer l'abscisse de la zone mesurée. A tout instant t et en tout point d'abscisse l , le rapport entre l'énergie de ces deux pics est lié à la température de la fibre par la formule suivante [5] :

$$T(t, l) = T_{offset} + \frac{\gamma}{\ln\left(\frac{P_s(t, l)}{P_{as}(t, l)}\right) + C(t) - l \Delta\alpha} \quad (1)$$

Avec P_s et P_{as} les puissances optiques Stokes et anti-Stokes mesurées par les photodiodes de l'interrogateur, T_{offset} le coefficient de l'appareil pour corriger un biais constant, $\Delta\alpha$ est le coefficient d'atténuation différentielle ($\alpha_{as} - \alpha_s$) entre les signaux Stokes et anti-Stokes. γ et $C(t)$ sont des paramètres intrinsèques de l'instrument.

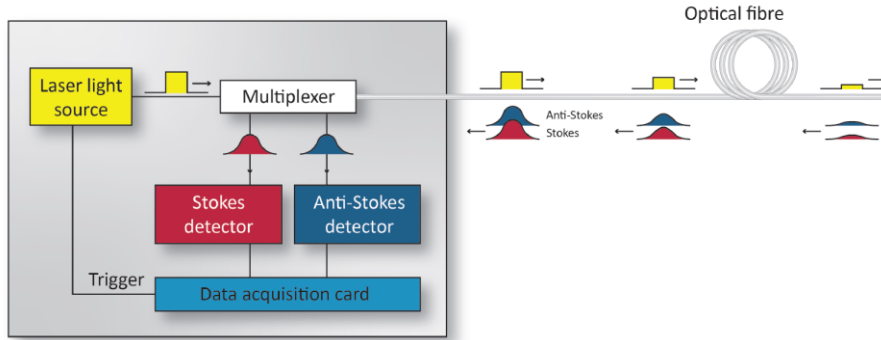


Figure 2 : Diagramme des principaux composants d'un interrogateur Raman [5].

L'interrogateur utilisé (Silixa Ultima-S) peut gérer 8 voies de mesure en série et dispose d'une portée pouvant aller jusqu'à 5 km. Il a une résolution spatiale d'environ 30 cm, un pas d'échantillonnage de 12,6 cm avec une bonne incertitude de répétabilité de 0,1°C pour un temps d'intégration de l'ordre de la minute [5]. Il fournit des signaux de température en fonction de la longueur de la fibre interrogée, $T = f(l)$, avec un pas spatial de 12,6 cm. Pour localiser les points de mesure dans le volume instrumenté, un recalage géométrique de ces données dans l'espace réel, $T = f(x, y, z)$, est nécessaire afin d'en réaliser l'exploitation.

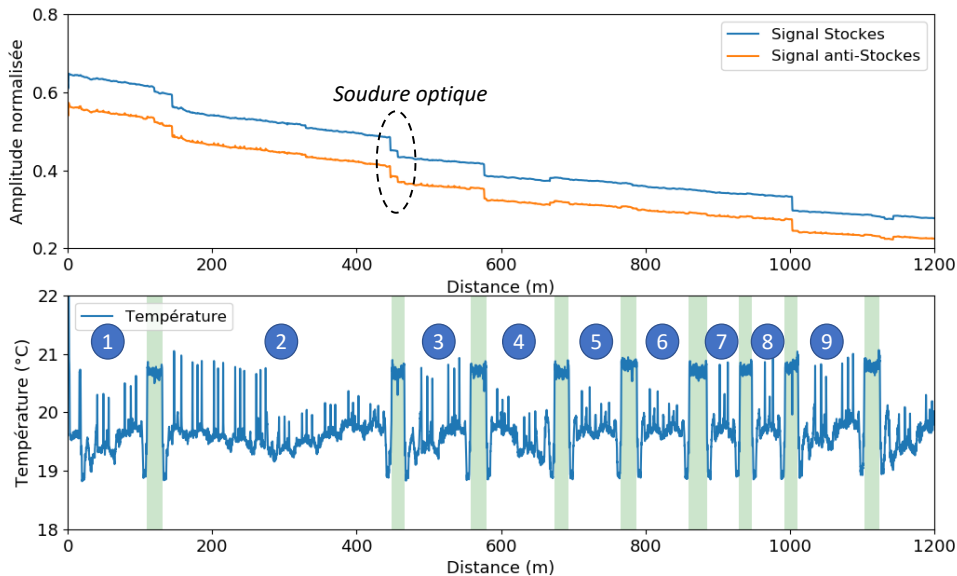


Figure 3 : Signaux bruts mesurés par l'interrogateur (haut) et signal de température calculé (bas).

A l'aide de sondes résistives de platine (Pt100), les deux paramètres de l'interrogateur (T_{offset} et $\Delta\alpha$) ont été correctement réglés, comme décrit dans [5] en plaçant des tronçons de fibres dans une enceinte thermostatée contenant une Pt100 de référence (correspondant aux

zones colorées en vert sur la Figure 3). Les chutes brusques en amplitude observées sur les signaux mesurés correspondent à des soudures optiques, qui introduisent des atténuations sur les signaux bruts, mais n'ont aucun impact sur le signal de température calculé.

3.2. Instrumentation des murs par fibres optiques

Afin de suivre le profil des températures dans les murs à différentes hauteurs, une longueur d'environ 1200 m de fibres optiques équivalant à 8000 points de mesure d'intérêt, est instrumentée dans les murs de ce moyen d'essai. Ces fibres sont soudées en série afin d'obtenir une seule ligne optique (cf. Figure 3). Cinq fibres optiques sont installées selon l'épaisseur à plusieurs hauteurs de chaque mur (cf. Figure 4) : une fibre centrale (1), deux intermédiaires dédoublées (3 & 4) et deux fibres en parois des murs (2). Les fibres centrales et intermédiaires sont tendues et accrochées sous les barres de fer avant le coulage du béton. Les fibres en parois ont été fixées à l'intérieur de saignées, rebouchées ensuite d'un enduit. Les fibres installées sous le ferrailage du plafond, correspondant aux fibres 5, 6 et 7 de la Figure 3, ont été posées après coulage du béton des murs verticaux du local.

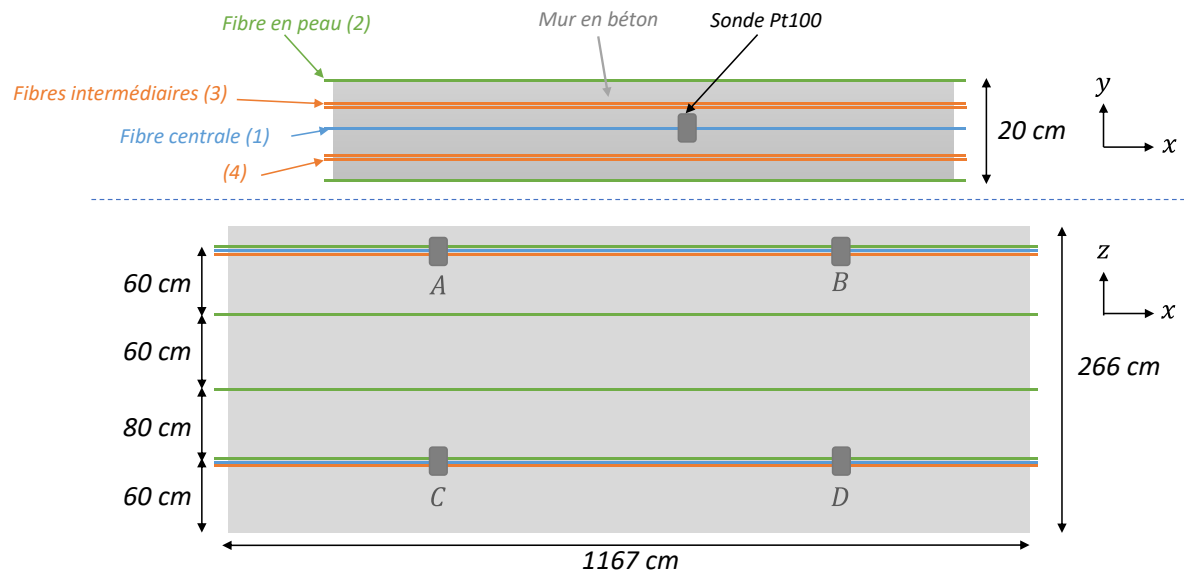


Figure 4 : Schémas des fibres optiques dans les murs.

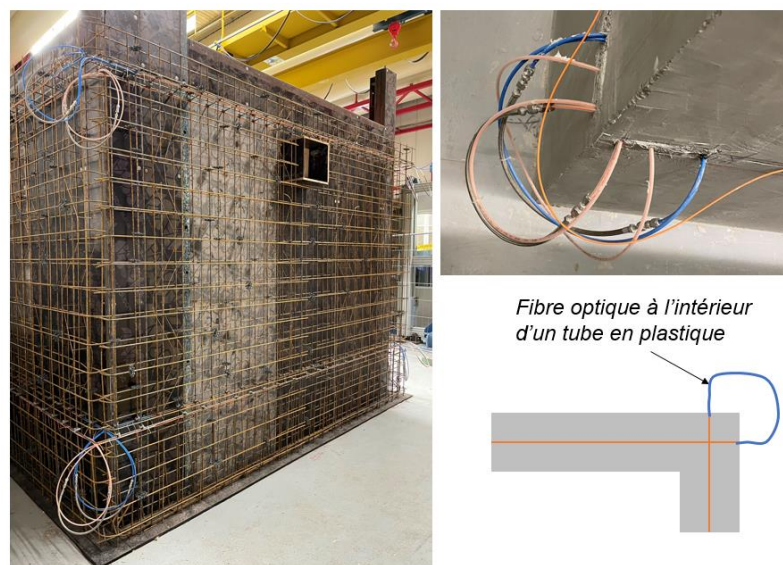


Figure 5 : Photographies et illustration des fibres optiques à leurs sorties des murs en béton.

Le repérage spatial des fibres s'effectue en stimulant thermiquement des parties de fibres qui sortent à chaque angle des murs comme illustré sur la Figure 5 (à l'aide d'un point froid). Ces parties de fibres hors du béton sont protégées dans des tubes circulaires en plastique ou en métal afin de prévenir toute cassure de la fibre à sa sortie du béton.

4. Méthodologie de mesure

Comme indiqué dans le paragraphe §3.1, l'interrogateur fournit des données de température en fonction de la position de la fibre. Afin de pouvoir exploiter ces données, un recalage spatial est nécessaire. Cela consiste à traduire les données brutes de l'interrogateur $T = f(l)$ en points spatiaux $T = f(x, y, z)$. Afin de connaître la position spatiale de la mesure de température, il faut déterminer la relation entre la position le long de la fibre et l'endroit dans l'espace réel. La technique utilisée pour déterminer cette relation est de coupler un relevé topographique à un repérage de points clés. Ce repérage est réalisé en créant des points froids à des positions spécifiques. Il a été décidé de repérer chaque début et fin des segments de fibre installée dans les murs du local témoin, comme illustré sur la Figure 6.

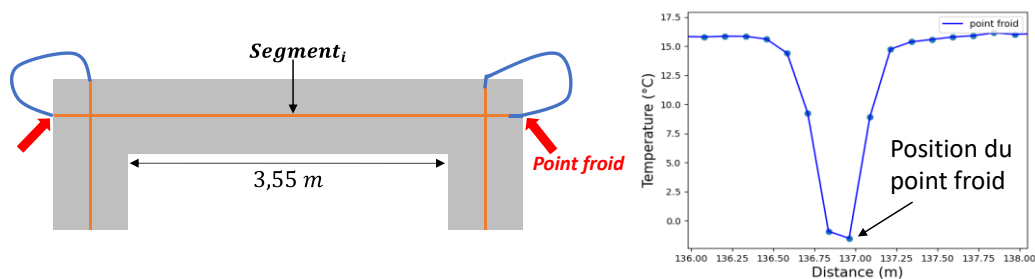


Figure 6 : Illustration du repérage des segments de fibres optiques par points froids.

Tous les segments correspondant à des lignes droites de fibres optiques dans le local témoin sont identifiés à l'aide de points froids. Ces relevés sont enregistrés et associés à un maillage de points (x, y, z) correspondant aux points de mesure par fibres optiques, comme illustré sur la Figure 7. L'affichage se fait via le logiciel *ParaView*.

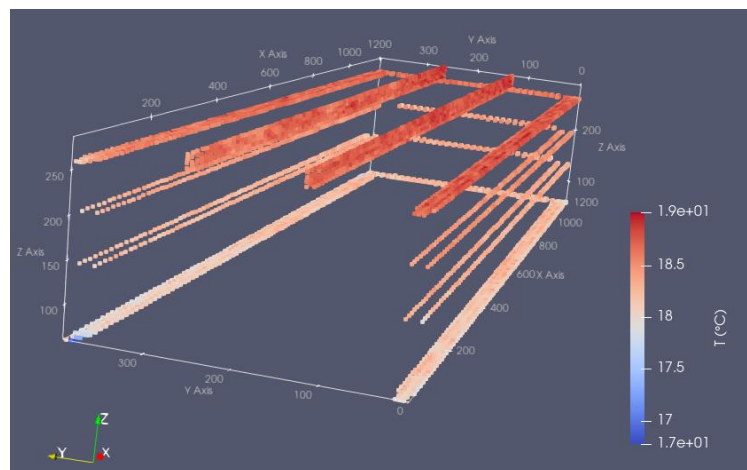


Figure 7 : Points de mesure de température associés au maillage.

Le recalage spatial montré dans la Figure 7 est fortement dépendant du repérage par points froids. Comme illustré sur la Figure 6, lorsqu'un point froid est localement généré sur la fibre sur quelques centimètres, un étalement du pic est observé sur une distance d'environ 75 cm, dû à la résolution spatiale de cette mesure. Le minimum de ce pic est alors considéré comme la position du point froid, ce qui peut être source d'incertitude sur le recalage géométrique

Afin de vérifier ce recalage géométrique, des points chauds maîtrisés à des positions connues sont générés à l'aide d'un câble chauffant (à environ 50°C) collé verticalement sur la paroi interne d'un mur (illustration sur la Figure 8). Sous l'hypothèse d'une diffusion isotrope de la chaleur au travers du mur, les maxima en température de toutes les fibres doivent se situer en face de ce cordon chauffant. Or, des décalages significatifs (jusqu'à 1 m), observables sur la Figure 8, apparaissent. Ils sont dus à un recalage trop grossier, lié à une sensibilité insuffisante de la méthode de repérage par point froid.

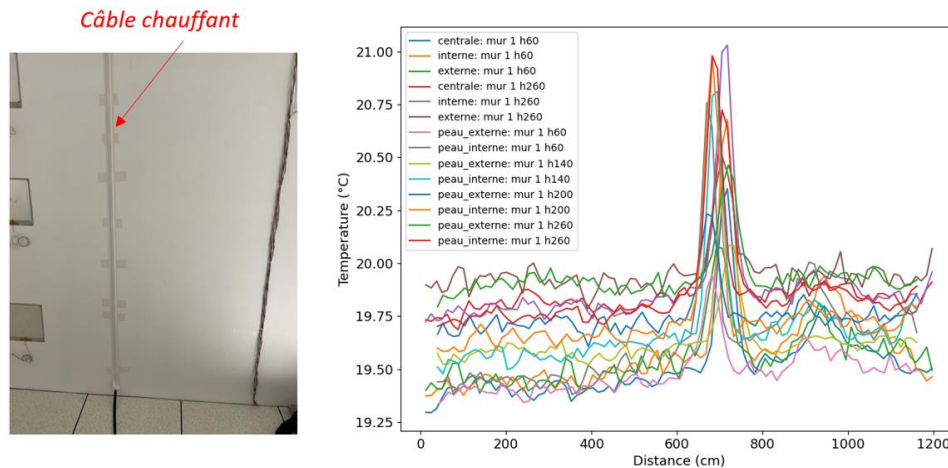


Figure 8 : Photographie d'un câble chauffant collé sur le mur 1 et affichage des signaux de température $T = f(l)$ correspondant à toutes les fibres présentes dans ce mur.

Pour améliorer et affiner ce recalage, un suréchantillonnage spatial d'un facteur 4 par méthode « Zero Padding FFT » est réalisé (Figure 9). Les positions des maxima de tous les signaux $T = f(l)$ sont ajustés sur le même $x_{réel}$, correspondant à la position du câble chauffant au sein du local témoin. Le suréchantillonnage spatial permet une meilleure définition des maxima avec une meilleure résolution de l'ordre de 3 cm. Les positions des maxima pour tous les segments d'un même mur sont ajustées, ces décalages sont enregistrés et appliqués pour les futures acquisitions.

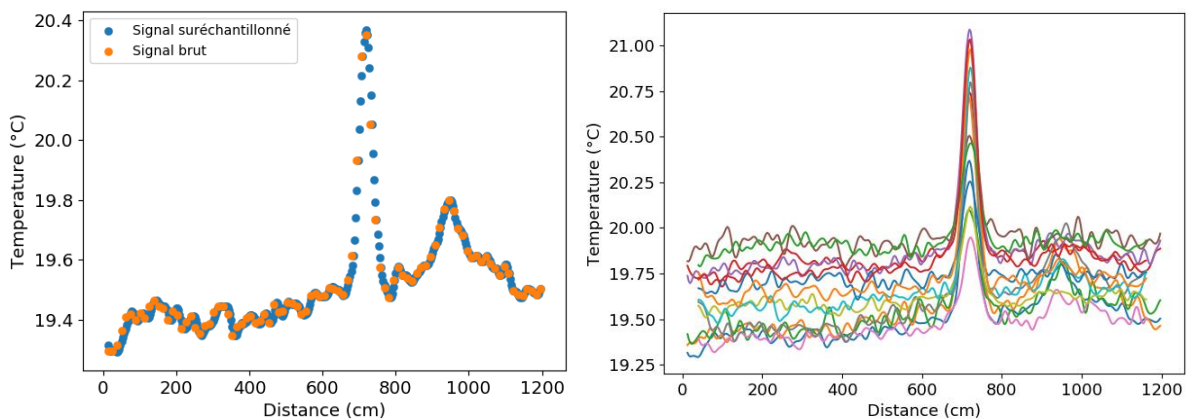


Figure 9 : Illustration d'un signal suréchantillonné (à gauche) et des signaux de températures redécalés et ajustés sur le même maxima correspondant à la position du câble chauffant (à droite).

Afin de permettre une meilleure représentation des données, des interpolations linéaires tridimensionnelles sont réalisées à l'aide des « triangulations de Delaunay ». La Figure 10 montre les températures de surface reconstruites par interpolation des points de mesure. Sur cette cartographie, la ligne chaude verticale correspondant au câble chauffant a été parfaitement reconstruite. Le profil de température selon l'épaisseur du mur montre également une diffusion

de la température plus rapide en partie haute du mur qu'en partie basse, ceci est physiquement cohérent, le sol en béton étant plus froid. Les résultats de cette interpolation paraissent pertinents.

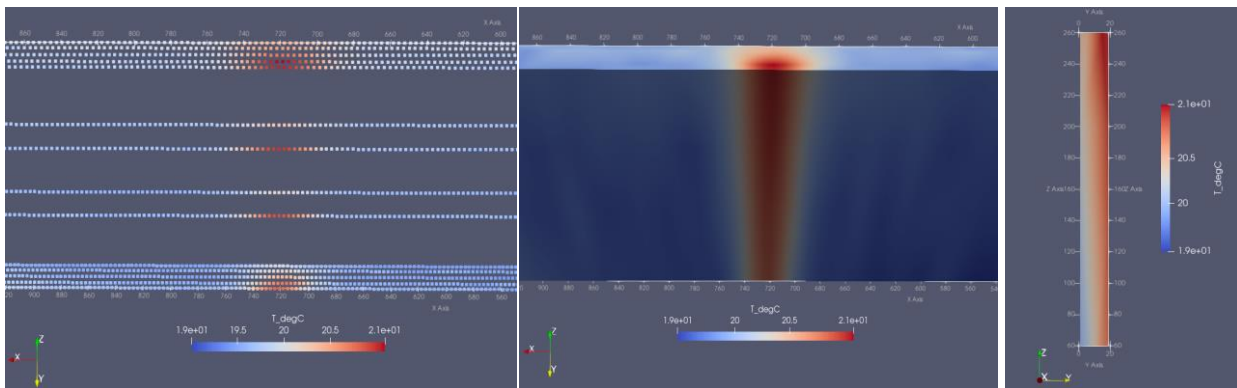


Figure 10 : Visualisation des points de mesure (à gauche), de l'interpolation des températures de surface (au centre) et d'une coupe verticale au niveau du centre de la ligne chaude (à droite).

Des comparaisons entre les mesures par fibres optiques (FO) et des sondes Pt100 autoétalonnables (sondes intégrant deux matériaux dont les températures de changement de phase sont connues, d'incertitude inférieure à 0,2 °C) noyées dans les voiles en béton du local ont également été effectuées afin de valider les mesures et de surveiller d'éventuelles dérives des mesures par fibres optiques. La Figure 11 montre une cohérence des deux types de mesures sur l'intervalle considéré (2 jours). L'écart maximal en température est inférieur à 0,1 °C. Ceci constitue une validation de la mesure de température par fibres optiques dans les murs en béton du local.

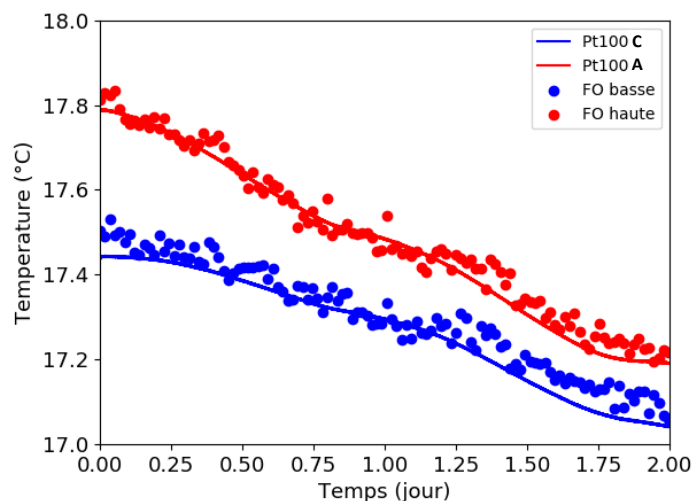


Figure 11 : Comparaison de mesures ponctuelles par fibres optiques et Pt100 dans les voiles.

5. Evolution temporelle des champs de température

Une source de chaleur de 3 kW (Figure 12) a été positionnée à environ 80 cm d'un mur à l'intérieur du local témoin. L'évolution des températures de surface ainsi que du profil de température selon l'épaisseur est présentée. Les résultats sont cohérents : la température est plus importante en surface et se diffuse avec le temps à l'intérieur du béton.

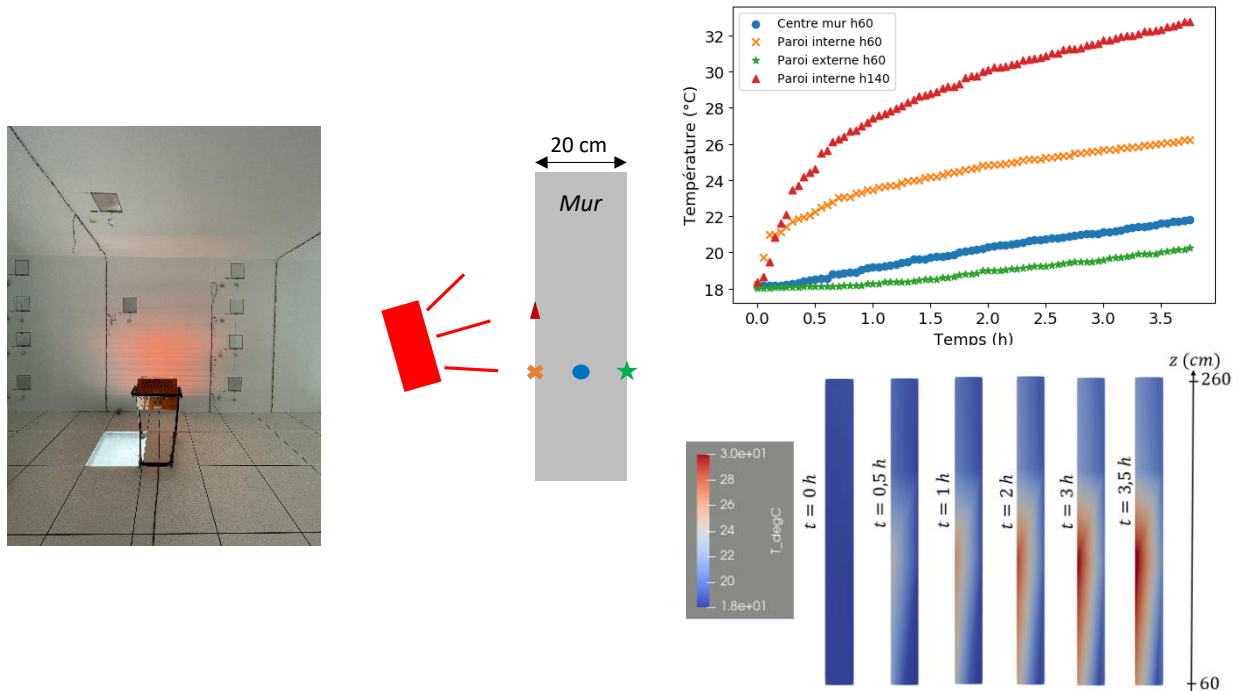


Figure 12 : Photographie d'une source radiante de 3 kW (à gauche) et évolution des températures de points dans les murs se situant sur le même axe en face de la source (en haut à droite) et coupe dans le mur montrant les températures interpolées selon l'épaisseur du mur.

6. Conclusions

L'instrumentation des murs du moyen d'essai « Local Témoin CNPE » par fibres optiques permet de cartographier les champs de température des murs et du plafond, et de mesurer les profils de température selon l'épaisseur et la hauteur pour chaque mur du local. Cette mesure, validée à l'aide de sondes Pt100, permet également un suivi temporel de l'évolution des températures avec une fréquence de l'ordre de la minute. L'objectif de ces mesures est de disposer de données de références à l'échelle 1 afin de caractériser des phénomènes thermo-aérodynamiques et d'augmenter la robustesse des codes de calcul (0D et 3D).

En complément de ces travaux, des mesures de températures de l'air dans ce local expérimental seront réalisées et confrontées aux résultats de simulations numériques.

Références

- [1] J. Blaise, Influence de la géométrie d'une source thermique sur le développement du panache, Mémoire de thèse, Université de Nancy (2008).
- [2] Gade, R., & Moeslund, T. B, Thermal Cameras and Applications: A Survey, Machine Vision & Applications, 25(1), 245-262 (2014).
- [3] P. Lecomte, Mesure haute température en environnement irradié par fibre optique utilisant l'effet Raman, Mémoire de thèse, Université de Perpignan (2017).
- [4] G. Failleau, O. Beaumont, R. Razouk, S. Delepine-Lesoille, M. Landolt, B. Courthial, J. Hénault, F. Martinot, J. Bertrand, B. Hay, A metrological comparison of Raman-distributed temperature sensors, Measurement 116 18–24 (2018).
- [5] Silixa, Principles of Distributed Temperature Sensing, <https://silixa.com>, (2022).