

Comportement thermique d'une paroi en béton isolée par l'intérieure sous actions climatiques réelles

Andrea Cavallari¹, Hugues Somja¹, Fekri Meftah¹, Piseth Heng¹ et Mohammad Abdallah¹

¹. Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique. 20 Avenue des Buttes de Coësmes, CS 70839, F-35708, Rennes, France

RESUME Dans une démarche d'instrumentation et modélisation d'un bâtiment réel équipé de rupteurs de pont thermique, un modèle thermique à faible complexité a été créé pour étudier l'effet des incertitudes sur les données matérielles et les coefficients d'échange sur la réponse thermique d'une paroi béton isolée par l'intérieur, sous actions climatiques réelles. La distribution de température sur l'épaisseur de la paroi a été décomposée en une composante constante, qui présente des variations saisonnières et journalières, une composante linéaire, au comportement court terme, et une composante résiduelle, qui s'avère être faible. La composante uniforme a été décomposée en tendance, oscillation moyenne journalière et une variation court terme. Une comparaison entre les résultats de la simulation, d'un calcul thermique selon l'Eurocode 1 et les variations de température donnée par la liste type ATeC du CSTB est proposée.

Mots-clefs Rupteurs de pont thermique, SLABE, Isolation par l'intérieur

I. INTRODUCTION

L'intérêt à améliorer les performances énergétiques du bâti et les exigences réglementaires ont amené les entreprises à développer des solutions de rupteurs de pont thermique. Il s'agit de systèmes composés d'éléments structurels porteurs, souvent en acier inoxydable, et de matériel isolant, qui ont pour rôle, dans le cas d'un bâtiment isolé par l'intérieur, de connecter le plancher à la façade et ainsi assurer la continuité de l'isolation au travers des planchers.

Créant un différentiel de température façade-plancher, les rupteurs sont soumis à des efforts cycliques, conséquence des déformations relatives des deux éléments. Ces efforts peuvent être conséquents et provoquer des désordres dans la structure, s'ils ne sont pas maîtrisés. Le sujet a peu été traité par le passé dans la littérature scientifique. Le Bloa (2014) et Nguyen (2012) ont caractérisé le comportement mécanique de deux rupteurs plancher-façade différents. Diler et al. (2015) et Keo et al. (2018) ont étudié le comportement de deux rupteurs de balcon en isolation par l'extérieur. Ces derniers ont étudié aussi la résistance à la fatigue sous action climatique. Meng et al. (2021) ont étudié numériquement le comportement d'un bâtiment type, isolé par l'intérieur et équipé de rupteurs de pont thermique. Ils ont montré que les actions climatiques pouvaient créer des sollicitations et des endommagements non négligeables des rupteurs thermiques et de leurs zones d'appui.

Les résultats de l'étude de Meng et al. doivent, cependant, être confrontés à la réalité pour être validés. Dès lors, un projet de recherche portant sur l'instrumentation d'un bâtiment réel équipé de rupteurs de pont thermique a été lancé, au travers de la chaire ANR FREEINBTP. Le bâtiment

choisi, dit HOMVA, se trouve dans la commune de Villejuif (France). Le gros œuvre du bâtiment a été réalisé entre décembre 2021 et janvier 2023. Le bâtiment est équipé de rupteurs de pont thermique SLABE Z6 de COHB Industrie. L'instrumentation installée est composée par des sondes de température dans la façade, des LVDT qui mesurent les déplacements relatifs entre la dalle et la façade, ainsi qu'une station météo en toiture.

L'étude présentée dans cet article est une première étape vers la construction d'un modèle thermique et mécanique complet du bâtiment. Le modèle utilisé, un mur infini, permet, grâce à son faible niveau de complexité, d'étudier l'effet de la variabilité des paramètres matériels et d'échange thermique sur l'évolution de la température dans une paroi en béton isolée par l'intérieur. Après une description du modèle, la réponse du modèle aux sollicitations thermiques sera étudiée en décomposant la température selon la logique adoptée par l'EC1 (EC1 : 1-5, 2004). La variation moyenne de température sera décomposée en une tendance harmonique, une oscillation moyenne journalière par rapport à cette dernière et une variation entre la moyenne journalière et la valeur calculée. Finalement les résultats obtenus seront comparés avec un calcul thermique selon l'EC1 et les valeurs données par la liste type des justifications demandées pour l'obtention d'un Avis Technique pour un procédé de rupteur de pont thermique (CSTB, 2021).

II. DESCRIPTION DU MODELE

A. Formulation du problème

Le problème unidimensionnel étudié est régi par l'équation classique de la chaleur (en l'absence de sources volumiques) et la loi de Fourier :

$$\rho C_p \dot{T} - k_{th} \frac{d^2 T(x,t)}{dx^2} = 0 \quad (1)$$

où ρ est la masse volumique, C_p la chaleur spécifique et k_{th} la conductivité thermique du milieu. Dorénavant ceux-ci seront appelés *paramètres thermiques des matériaux*.

Les conditions aux limites, de type Neumann, portent sur les flux de chaleur échangés par convection et radiation :

$$k_{th} \frac{dT}{dx} = q_{cv} + q_{rd} \quad (2)$$

Le flux de chaleur q_{cv} échangé par convection, entre la paroi de température T et le milieu environnant de température $\bar{T}_\infty$, est contrôlé par la loi de Newton :

$$q_{cv} = -h_{cv}(T - \bar{T}_\infty) \quad (3)$$

Le flux d'échange radiatif q_{rd} est formé par une composante q_{rd}^∞ d'échange entre la paroi et le milieu environnant (rayonnement réémis), contrôlé par la loi de Stefan-Boltzmann, ainsi que d'une composante d'apport solaire q_{rd}^{sun} , lorsque la paroi est exposée au soleil :

$$q_{rd} = q_{rd}^\infty + \alpha \cdot q_{sun} \quad ; \quad q_{rd}^\infty = -\varepsilon R_b (T^4 - \bar{T}_\infty^4) \quad (4)$$

Dans les équations ci-dessus, h_{cv} est le coefficient d'échange convectif, $\varepsilon \in [0,1]$ l'émissivité, $R_b = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ la constante de Stefan-Boltzmann et $\alpha \in [0,1]$ est le coefficient d'adsorption de la radiation solaire par la paroi. Ces paramètres, sauf R_b , seront dorénavant appelés paramètres d'échange thermique aux parois.

Un modèle aux éléments finis (EF) unidimensionnel a été développé et implémenté dans MatLab pour résoudre ce problème non linéaire de transfert thermique instationnaire. Ce modèle utilise la thêta-méthode (de paramètre $\bar{\alpha} \in [0,1]$) pour la discrétisation temporelle, ainsi qu'un algorithme itératif de type Newton-Raphson modifié pour la prise en compte de la non-linéarité. Le système d'équations résolu à chaque itération $j + 1$ d'un instant $t_{n+\bar{\alpha}} = t_n + \bar{\alpha}\Delta t$ (où Δt est le pas de temps), pour déterminer l'incrément des températures nodales $\Delta\theta$ à l'instant $t_{n+1} = t_n + \Delta t$, est donné par :

$$\left(\frac{\underline{\underline{C}}}{\Delta t} + \bar{\alpha}\underline{\underline{K}}^{(n)}\right)\Delta\theta^{(n+1,j+1)} = \underline{\underline{F}}^{(n+\bar{\alpha},j)} - \underline{\underline{K}}^{(n+\bar{\alpha},j)}\theta^{(n+\bar{\alpha},j)} + \bar{\alpha}\underline{\underline{K}}^{(n)}\Delta\theta^{(n+1,j)} \quad (5)$$

où θ est le vecteur des températures aux nœuds du maillage, $\underline{\underline{C}}$ est la matrice de capacité thermique, $\underline{\underline{K}}$ la matrice de conductivité thermique et $\underline{\underline{F}}$ le vecteur des flux nodaux équivalents, dont les composantes non nulles se calculent à partir des conditions d'échange sur les parois :

$$\underline{\underline{F}}^{(n+\bar{\alpha},j)} = \underline{\underline{F}}_{cv}^{(n+\bar{\alpha})} + \underline{\underline{F}}_{rd,\infty}^{(n+\bar{\alpha},j)} + \underline{\underline{F}}_{rd,sun}^{(n+\bar{\alpha})} \quad (6)$$

B. Cas d'étude

L'étude thermique est réalisée sur une paroi de grande largeur et hauteur, donnant lieu à un transfert thermique unidimensionnel selon l'épaisseur. Elle est composée d'un voile en béton blanc d'épaisseur $e_p = 20\text{cm}$, d'une couche d'isolant en polystyrène de 12cm et d'une plaque de plâtre d'épaisseur 13mm (FIGURE 1). Les matériaux considérés dans cette étude sont identiques à ceux de la façade du bâtiment instrumenté.

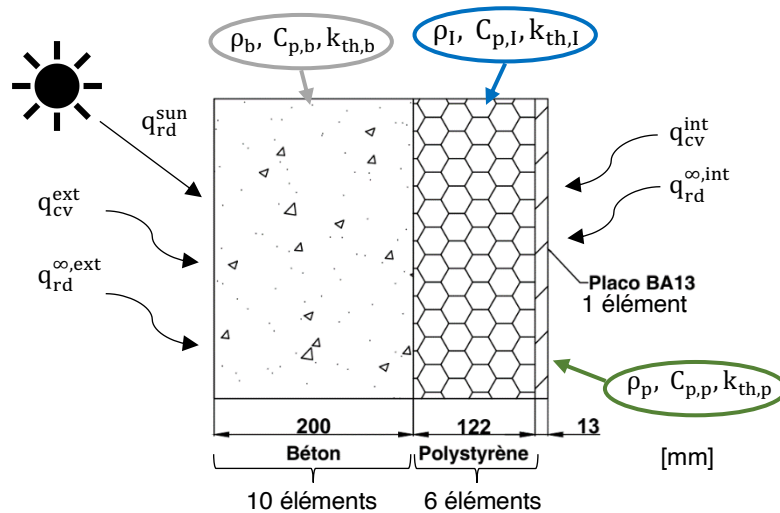


FIGURE 1. Géométrie du système, paramètres thermiques et conditions aux limites

Les plages des valeurs possibles des paramètres thermiques des matériaux (ρ, C_p, k_{th}) ainsi que celles portant sur les paramètres d'échange thermique (h_{cv}, ϵ, α) aux parois sont reportés en TABLEAU 1 et en TABLEAU 2 respectivement.

TABLEAU 1. Plages de valeurs des paramètres thermiques des matériaux

	Béton	Polystyrène	BA13
k_{th} [W/mK]	1,35-2	0,03-0,04	0,325
ρ [kg/m ³]	2300-2500	10-18	715
c_p [J/kgK]	850-950	1200-1450	1008
Source	(EC2 : 1-2, 2005)	(Placo, 2020)	(Bilan thermique, 2023)

TABLEAU 2. Plages de valeurs des paramètres d'échange thermique aux parois

Paramètre	h_{cv}	ε	α
Valeurs (externe/interne)	1-28 / 1	0,75-0,95 / 0,5	0,35-0,55
Source	(Montazeri and Blocken, 2017; Zheng et al., 2022)	(Synnefa et al., 2006)	(Sanjuán et al., 2021; Synnefa et al., 2006)

C. Conditions aux limites : définition des actions climatiques

L'action climatique est définie par la *température externe sous abri*, la *radiation solaire* et la *température d'ambiance interne*.

Le signal de température externe sous abri a été construit en utilisant les données de la station météorologique de Orly, la plus proche du site du bâtiment, mises à disposition par le European Climate Assessment & Database (Klein Tank et al., 2002). Le signal a été généré en utilisant le modèle WAVE (Bal et al., 2023), basé sur l'hypothèse que la température maximale journalière est à 14h, la minimale au lever du soleil et le raccordement de ces extrêmes est supposé harmonique. Ce signal est montré en FIGURE 2. Les températures extrêmes sont de 41,9°C et -13,3°C, et correspondent, selon EC1 : 1-5A2, à des probabilités annuelles de dépassement de 0.0085 et 0.16, donc à des périodes de retour de 117 et 6 ans respectivement.

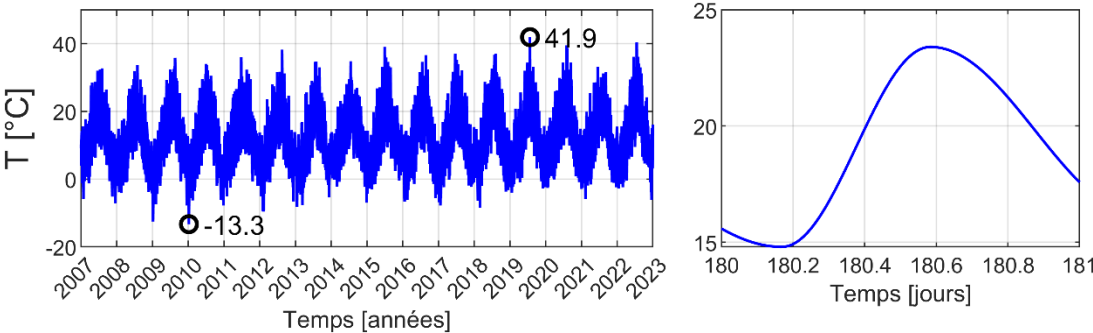


FIGURE 2. Signal de température externe sous abri

Le signal de radiation solaire est défini chaque jour en supposant une variation parabolique entre les heures de lever et coucher du soleil, avec un pic au midi solaire. Un exemple pour un jour d'hiver est donné en FIGURE 3. L'aire de cette parabole est égale à la radiation cumulée sur la journée prise de la base de donnée Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) (Qu et al.,

2017; Schroedter-Homscheidt et al., 2022) pour la commune de Villejuif, où le bâtiment se situe. La radiation est projetée sur la façade sud du bâtiment selon la position du soleil, qui a été calculée.

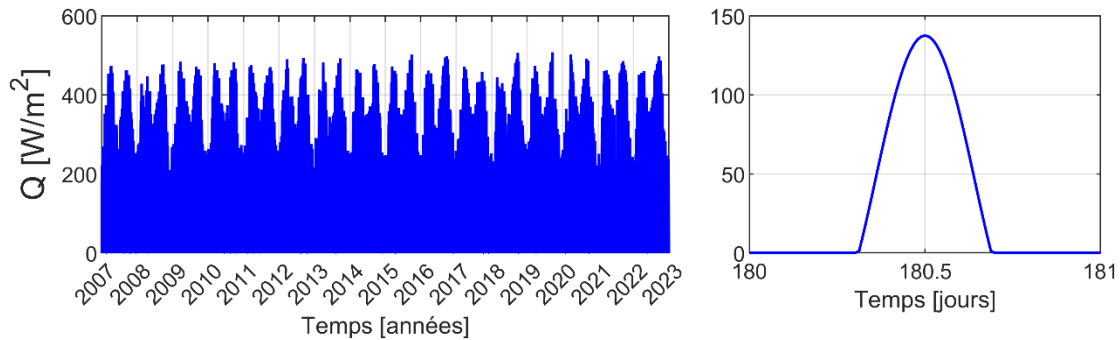


FIGURE 3. Signal de radiation solaire

Le signal de température interne est donné par la somme de deux composantes : une température de consigne T_{cons} , oscillant entre 17°C, durant les horaires supposés de fermeture du bâtiment, et 19°C, durant les horaires d'ouverture, et un apport solaire de +4°C, imposé les jours où le rapport entre la radiation solaire directe et globale est supérieur à 0,5, pour tenir compte des effets de la radiation solaire qui traverse les grandes fenêtres du bâtiment. Le signal est montré en FIGURE 4.

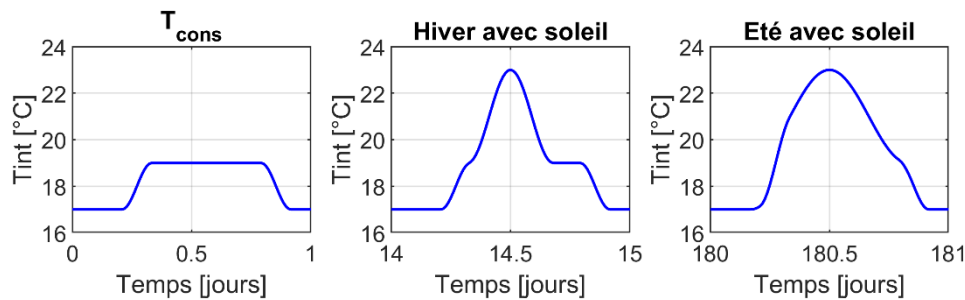


FIGURE 4. Signal de température ambiante interne

C. Décomposition de la température

Afin de mettre en évidence les possibles effets mécaniques dans le voile de béton, la distribution (issue du calcul EF) de la variation de la température du béton $T_b(x, t)$ par rapport à sa valeur de référence est décomposée dans la forme proposée par l'EC1 (EC1 : 1-5, 2004), montrée en FIGURE 5.

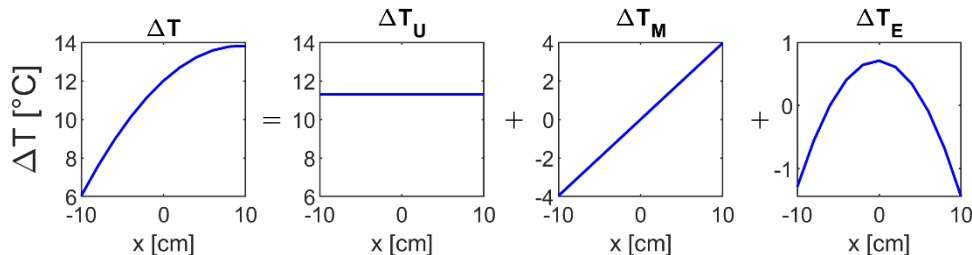


FIGURE 5. Exemple de décomposition de la température au sens de l'EC1 (EC1:1-5, 2004)

La composante ΔT_U correspond à un profil de température uniforme dans la section droite, se traduisant par une déformation axiale uniforme de celle-ci et pouvant être ramenée à l'action d'un

effort normal (fictif et à contrainte nulle) équivalent à l'action de cette composante thermique. Elle s'obtient par le calcul de la moyenne spatiale selon l'épaisseur du voile de béton :

$$\Delta T_U(t) = \frac{1}{ep} \int_0^{ep} T_b(x, t) dx - T_0 \quad (7)$$

T_0 est la température de référence du voile, qui est fixée à 18°C par convention.

La composante ΔT_M , correspond à un profil linéaire de la température entre les deux faces du voile, induisant une rotation uniforme de la section droite et pouvant être ramenée à l'action d'un moment de flexion (fictif et à contrainte nulle) équivalent à l'action de cette composante thermique. Elle s'obtient par le calcul du moment statique de la température du béton dans l'épaisseur du voile :

$$\Delta T_M(t) = \frac{12}{ep^2} \int_{-ep/2}^{ep/2} x^* \cdot T_b(x^*, t) dx^* \quad (8)$$

Pour ce calcul il est nécessaire d'adopter un repère barycentrique pour la section droite, d'où le changement de variable : $x^* = x - \frac{ep}{2}$.

On considère enfin la composante résiduelle ΔT_E de la température, donnée (au sens de l'EC1 : 1-5) par :

$$\Delta T_E(x^*, t) = T_b(x^*, t) - \Delta T_U(t) - \Delta T_M(t) \cdot x^* \quad (9)$$

Du fait de l'hypothèse cinématique de section plane adoptée en flexion, cette composante est à l'origine des auto-contraintes d'origine thermique dans la section droite. Ces contraintes étant autoéquilibrées, les efforts qu'elles induisent sont nuls. Néanmoins, elles peuvent avoir des effets significatifs sur le comportement local du matériau comme la fissuration (El-Tayeb et al., 2017).

III. ETUDE DE L'EVOLUTION DE LA TEMPERATURE

Pour étudier le comportement thermique de la paroi, un jeu de paramètres a été fixé (TABLEAU 3) et la simulation lancée de l'an 2007 à l'an 2022. Afin de maximiser les effets de l'apport radiatif solaire, la façade a été supposée de couleur noire, d'où la valeur 0,9 du coefficient α . Chaque jour commence à minuit.

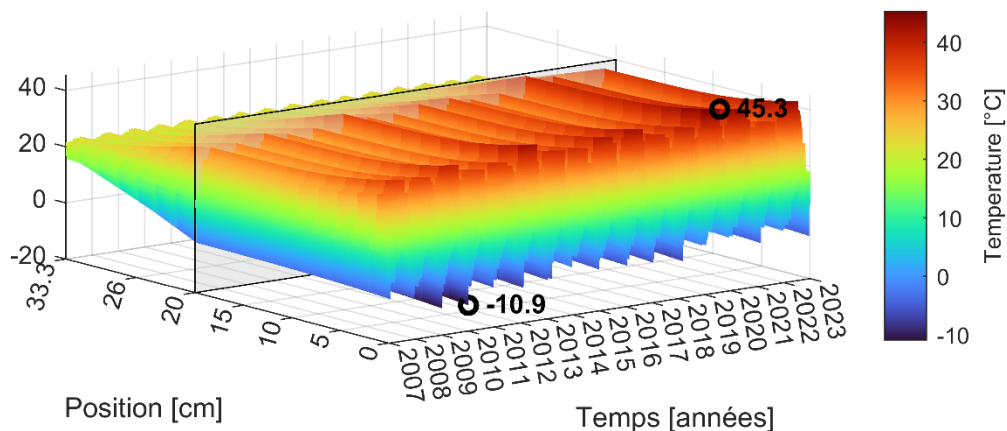


FIGURE 6. Evolution de la température simulée

La température simulée dans toute la paroi est montrée en FIGURE 6. Les valeurs extrêmes sont atteintes sur la surface externe : $-10,9$ et $45,3^{\circ}\text{C}$ pour toute la période simulée.

TABLEAU 3. Valeurs des paramètres pour l'étude d'évolution de la température

	k_{th} [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kgK]	h_{cv}	ε	α
Béton	1,75	2500	900	-	-	-
Poly.	0,039	18	1450	-	-	-
BA13	0,325	825	1008	-	-	-
Externe	-	-	-	23	0,9	0,9
Interne	-	-	-	0,5	0,5	-

La composante ΔT_U varie entre $-26,4$ et $21,9^{\circ}\text{C}$ durant la période étudiée, comme montré en FIGURE 7. Une tendance quasi-harmonique est visible sur toute la période simulée. Le détail (en période hivernale) montre une augmentation relative durant le jour, corrélée à la période d'ensoleillement, suivie par un refroidissement sur la période nocturne.

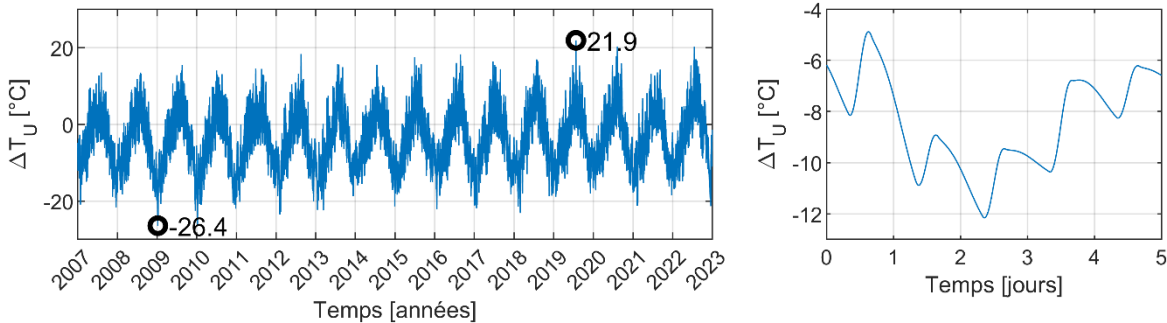


FIGURE 7. Evolution (annuelle) et détail (journalier/période hivernale) de $\Delta T_U(t)$

Pour reconstruire la structure de ΔT_U , la transformée discrète de Fourier (TDF) a été utilisée. Le spectre d'amplitude (FIGURE 8) montre les amplitudes des oscillations autour de la moyenne de ΔT_U sur la période étudiée.

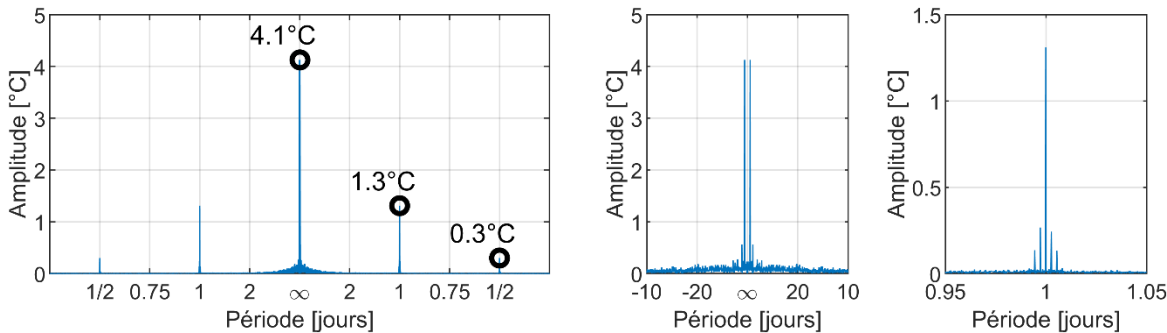


FIGURE 8. Spectre amplitude-fréquence de ΔT_U

Une composante principale de période annuelle est visible, ainsi que deux composantes mineures journalière et mi-journalière. Les pics ne sont pas isolés, comme pour les signaux somme de fonctions harmoniques, mais des pics mineurs sont présents autour de la composante journalière et une zone de bruit autour de la composante annuelle. Cette zone de bruit est très importante, car

les pics individuels par la transformée de Fourier n'arrivent pas à atteindre l'amplitude du signal original. Cela est dû à l'aléa dans la température ambiante et dans la radiation solaire.

L'évolution et un détail de ΔT_M sont montrés en FIGURE 9. Les valeurs atteintes sont comprises entre $-15,4$ et $7,9^\circ\text{C}$. $\Delta T_M < 0$ signifie que la surface externe est plus chaude que l'interface avec l'isolant et vice-versa. ΔT_M a une structure plus journalière, comme montré par sa TDF en FIGURE 10. Les remarques sur le bruit et les pics secondaires faites pour ΔT_U sont valides dans ce cas aussi.

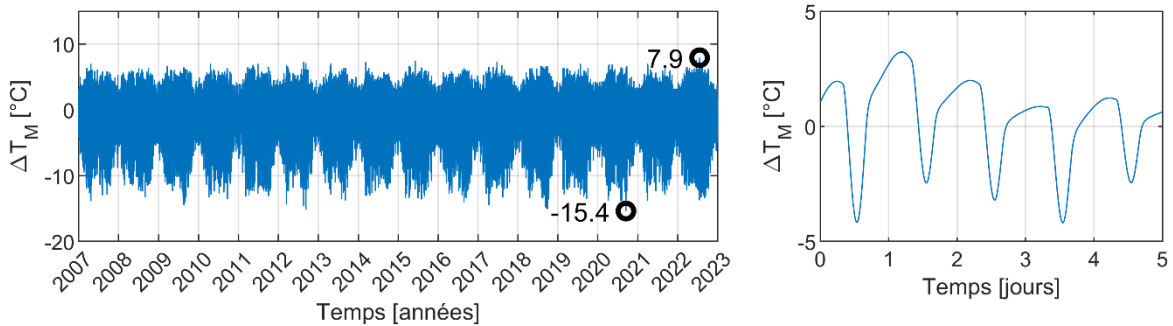


FIGURE 9. Evolution et détail de $\Delta T_M(t)$

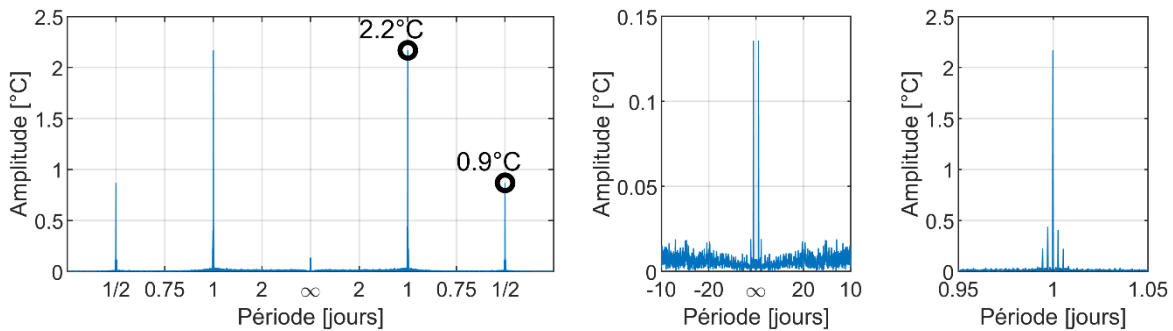


FIGURE 10. Spectre amplitude-fréquence de ΔT_M

La composante ΔT_E (FIGURE 11) est comprise entre $-1,5$ et $2,9^\circ\text{C}$, valeurs qui sont atteintes sur la surface externe. Son évolution suit le cycle journalier de réchauffement et refroidissement.

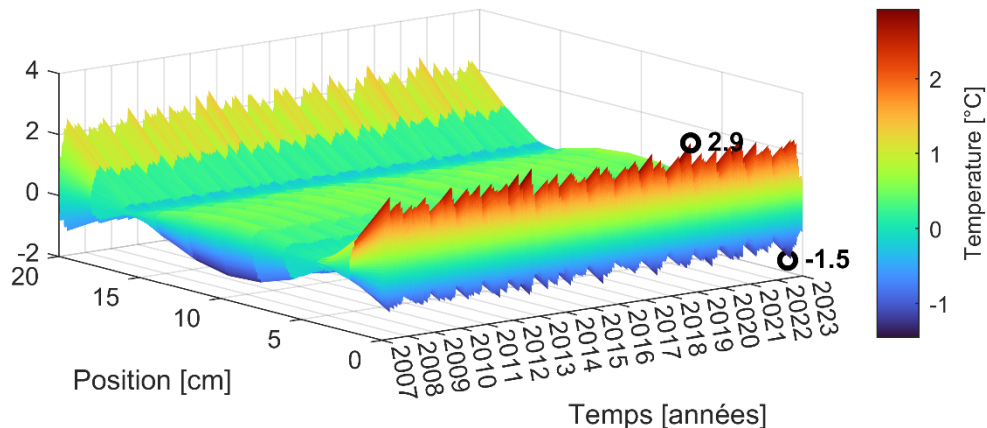


FIGURE 11. Evolution de $\Delta T_E(x, t)$

Il est intéressant de comparer ces résultats avec les recommandations de la norme EC1 : 1-5 et la liste type ATeC. L'EC1 : 1-5, pour les bâtiments, ne propose pas des valeurs à appliquer, mais

conseille une approche simplifiée basée sur un calcul en régime permanent et utilisant des valeurs de la température externe sous abri ayant une période de retour de 50 ans. Un calcul avec cette approche a été fait, en supposant une surface externe sombre et $R_{in} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$, et des valeurs de ΔT_U beaucoup plus importantes ($-36,8^\circ\text{C}$ et 31°C) ont été obtenues. Cela n'est pas étonnant car la période de retour est de beaucoup supérieure à la période simulée. Par contre cette approche donne des ΔT_M nettement inférieurs ($-1,6^\circ\text{C}$ et $1,3^\circ\text{C}$) et des ΔT_E nuls. Les valeurs de ΔT_M obtenues avec l'étude transitoire sont similaires à celles que la norme conseille pour les ponts (entre 6 et 18°C). L'approche de la norme sous-estime donc ΔT_M , qui induit une rotation de la section.

La liste type ATeC donne des valeurs de ΔT_U , en faisant la distinction entre une variation long terme (dite en régime permanent) $\Delta T_{U,LT} = \pm 24^\circ\text{C}$ et une variation court terme (dite journalière) $\Delta T_{U,CT} = \pm 6^\circ\text{C}$, mais aucune valeur de ΔT_M , ni de ΔT_E , n'est donnée. Une comparaison des valeurs de ΔT_U demande donc une approche plus sophistiquée, qui introduit la notion de variation long terme et court terme. La composante ΔT_U est donc répartie en 3 composantes selon l'équation (10).

$$\Delta T_U = \Delta T_U^{\text{tend}} + \Delta T_U^{\text{j,moy}} + \Delta T_U^{\text{j,res}} \quad (10)$$

La composante ΔT_U^{tend} , harmonique de période annuelle oscillante entre $-11,8^\circ\text{C}$ et $4,7^\circ\text{C}$, représente la tendance long terme, qui est donnée par la transformée inverse de la composante annuelle avec l'addition de la moyenne $\bar{\Delta T}_U$ sur la période analysée. $\Delta T_U^{\text{j,moy}}$ est la différence entre ΔT_U^{tend} et la moyenne de ΔT_U sur chaque jour. $\Delta T_U^{\text{j,res}}$ est la différence entre ΔT_U et la moyenne journalière. Les trois composantes, définies comme ci-dessus, sont montrées en FIGURE 12.

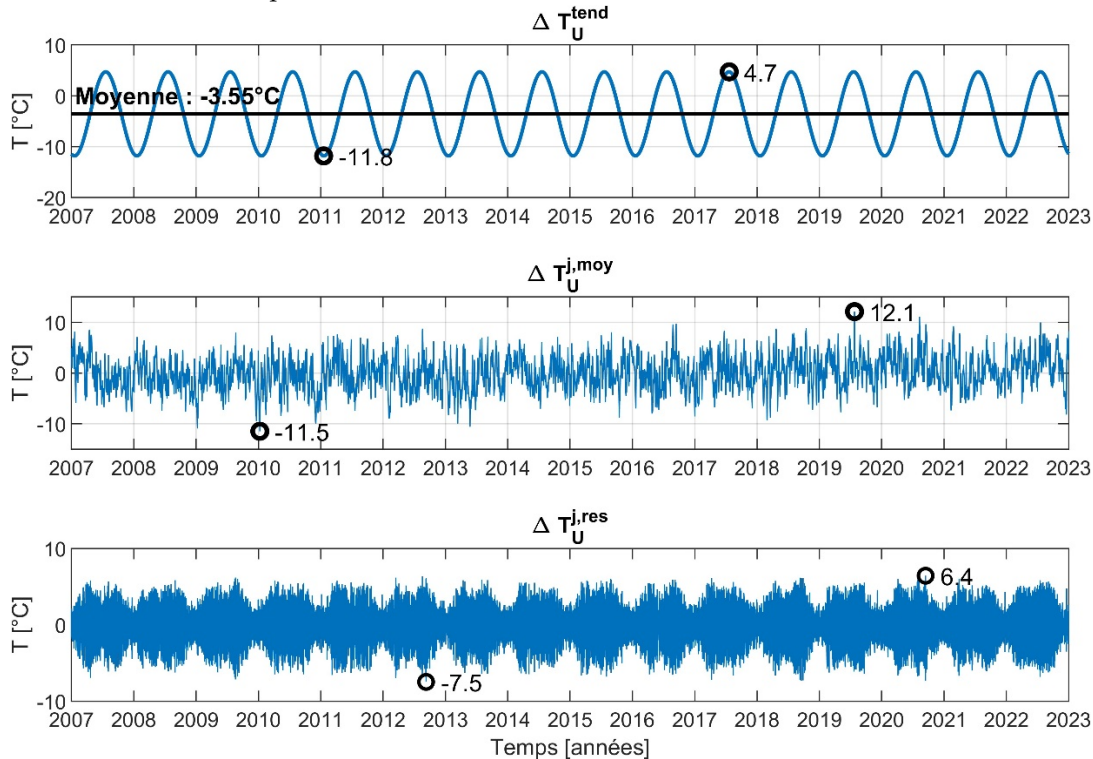


FIGURE 12. Composantes de $\Delta T_U(t)$

La somme $\Delta T_U^{\text{tend}} + \Delta T_U^{\text{j,moy}}$ varie entre $-23,2^\circ\text{C}$ et $16,8^\circ\text{C}$. Sa distribution de probabilité est bimodale, avec deux modes de $-7,6^\circ\text{C}$ et $0,8^\circ\text{C}$ et des valeurs caractéristiques, correspondant aux

fractiles 5% et 95%, de $-14,8^{\circ}\text{C}$ et $-7,3^{\circ}\text{C}$. La composante $\Delta T_U^{j,moy}$ seule varie entre $-11,5^{\circ}\text{C}$ et $12,1^{\circ}\text{C}$ et sa distribution de probabilité est normale avec une moyenne nulle. Les valeurs caractéristiques sont $\pm 5,5^{\circ}\text{C}$. Les distributions de probabilité de ces deux composantes sont montrées en FIGURE 13.

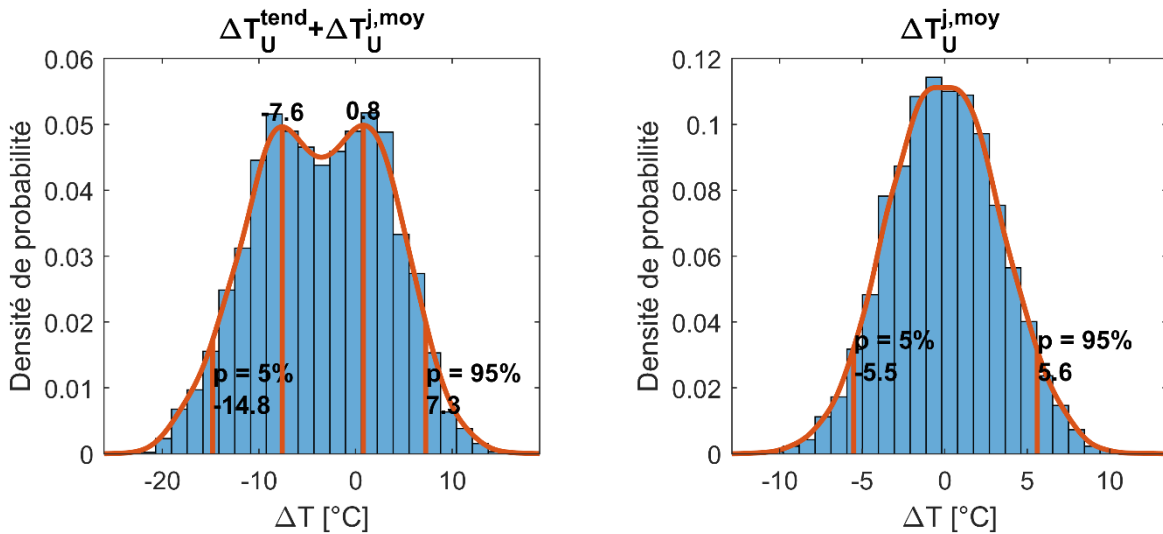


FIGURE 13. Distributions de probabilité de $\Delta T_U^{tend} + \Delta T_U^{j,moy}$ et $\Delta T_U^{j,moy}$

La composante $\Delta T_U^{j,res}$ varie entre $-7,5^{\circ}\text{C}$ et $6,4^{\circ}\text{C}$. Afin d'étudier statistiquement cette composante il est pertinent de séparer les valeurs positives des valeurs négatives, car sa variation suit un cycle journalier. La distribution des $\Delta T_U^{j,res} < 0$ a pour valeur extrême $-7,5^{\circ}\text{C}$, pour moyenne $-3,1^{\circ}\text{C}$ et pour fractiles 5% et 95% $-5,6^{\circ}\text{C}$ et -1°C respectivement. La distribution des $\Delta T_U^{j,res} > 0$ a pour valeur extrême $6,4^{\circ}\text{C}$, pour moyenne $2,8^{\circ}\text{C}$ et pour fractiles 5% et 95% 1°C et 5°C respectivement. Les deux distributions sont montrées en FIGURE 14.

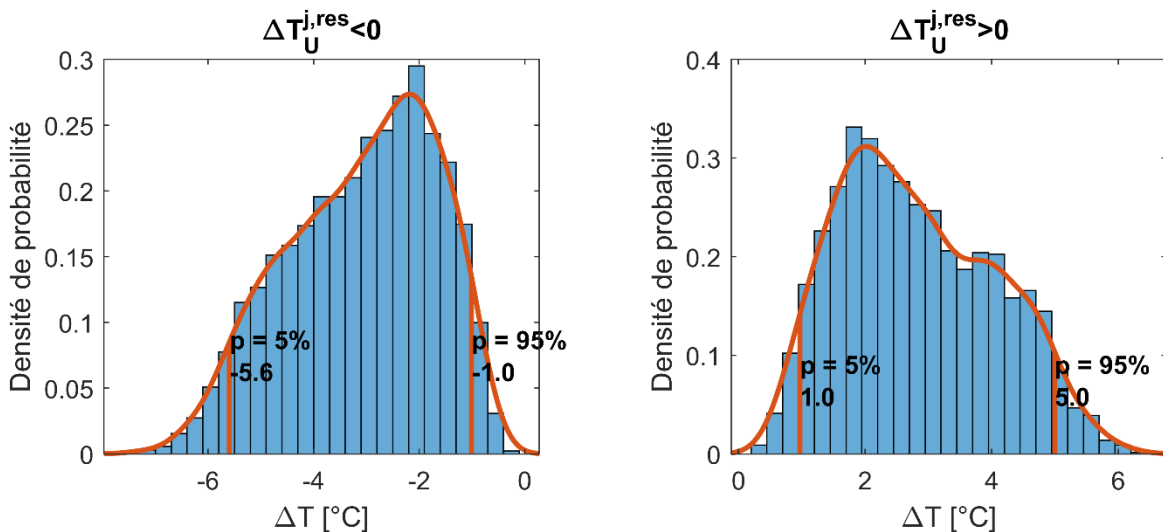


FIGURE 14. Distributions de $\Delta T_U^{j,res}$

Une comparaison entre la simulation transitoire, les valeurs de la liste type ATeC et le calcul EC1 : 1-5 des valeurs extrêmes de ΔT_U et de ses composantes est proposée en TABLEAU 4. Les

valeurs de ΔT_U extrêmes simulées se rapprochent de la liste type ATeC : l'écart est de 3,6°C en négatif et 8,1°C en positif. Les valeurs extrêmes de $\Delta T_U^{\text{tend}} + \Delta T_U^{\text{j,moy}}$, interprétées comme variation long terme, ont un écart de 0,8°C en négatif et un écart de 7,2°C en positif par rapport à la liste type ATeC. La composante $\Delta T_U^{\text{j,res}}$, interprétée comme variation court terme, est plus importante dans la simulation que dans la liste type ATeC, l'écart étant de 0,4°C en positif et de 1,5°C en négatif. Le calcul EC1 : 1-5 obtient des valeurs plus importantes de la variation totale, les écarts étant, par rapport à la simulation, de 9,7°C pour la variation positive et 10,2°C pour la négative. Les valeurs étant basées sur un calcul stationnaire, les notions de variation long terme et court terme ne sont pas présentes dans la norme. Il faut remarquer que le choix, par nature arbitraire, de fixer la température initiale à $T_0 = 18^\circ\text{C}$, influence la dissymétrie des valeurs positives et négatives. Il est aussi important de noter que la simulation, avec un choix unique des paramètres thermiques des matériaux et des coefficients d'échange thermique, ne prend pas en compte tous les situations possibles. Il n'est donc pas à ce stade possible de critiquer les valeurs et méthodes simplifiées proposées dans les Eurocodes et la liste type.

TABLEAU 4. Comparaison de valeurs maximales simulées avec calcul selon EC1 : 1-5 et liste type ATeC

Composante de ΔT_U	Simulation	EC1 : 1-5	Liste type ATeC
Totale	21,9/-26,4	31/-36,8	± 30
Long terme	16,8/-23,2	-	± 24
Court terme	6,4/-7,5	-	± 6

IV. CONCLUSIONS

Dans cette étude le comportement thermique d'un mur béton isolé par l'intérieur a été analysé avec un cas d'étude basé sur une paroi réelle. L'évolution de la température a été décomposée comme proposé par l'EC1 :1-5. La variation de la température moyenne ΔT_U a une tendance long terme ΔT_U^{tend} harmonique et des oscillations positives et négatives. Les oscillations de ΔT_U ont été décomposées en une moyenne journalière $\Delta T_U^{\text{j,moy}}$ et un écart $\Delta T_U^{\text{j,res}}$ du signal total avec la somme de la tendance et de la variation moyenne journalière. L'oscillation moyenne journalière présente une distribution normale à moyenne nulle. L'oscillation $\Delta T_U^{\text{j,res}}$ a été traitée séparément dans le cas où elle est positive et dans les cas où elle négative. Les résultats ont été comparés avec les valeurs données par la liste type ATeC et les résultats d'un calcul thermique en régime permanent selon l'EC1 : 1-5. Les valeurs extrêmes de $\Delta T_U^{\text{j,res}}$ sont du même ordre de grandeur que la variation journalière donnée par la liste ATeC ; la somme $\Delta T_U^{\text{tend}} + \Delta T_U^{\text{j,moy}}$ atteint des valeurs similaires en négatif et plus faibles en positif. La variation totale donnée par la liste type ATeC et les valeurs de ΔT_U simulées sont inférieures aux résultats du calcul selon l'EC1 : 1-5. L'interprétation de ces résultats doit tenir compte des choix arbitraires de la température initiale (fixée à $T_0 = 18^\circ\text{C}$) ainsi que du jeu de paramètres thermiques considérés, qui ne permettent pas de couvrir toutes les situations possibles.

La composante linéaire ΔT_M présente une structure de variation journalière et atteint des valeurs de $-15,4^\circ\text{C}$ et $7,9^\circ\text{C}$, qui peuvent avoir des effets mécaniques non négligeables. La liste type ATeC ne donne aucune valeur de ΔT_M ; les valeurs calculées selon EC1 : 1-5 sont inférieures.

La liste type ATeC ne fournit aucune valeur de la composante ΔT_E , et le calcul selon EC1 : 1-5 trouve des valeurs nulles ; à contrario la simulation transitoire trouve des valeurs comprises entre $-1,5^\circ\text{C}$ et $2,9^\circ\text{C}$.

REMERCIEMENTS

Les auteurs voudraient remercier Maxime Henry de Planchat Ingénierie, maître d'œuvre du chantier HOMVA, pour le temps qu'il a dédié au projet d'instrumentation, Christian Garand de l'INSA de Rennes, pour le suivi du projet, Daniele Sportillo de Mathworks, pour l'assistance fournie dans l'usage de Matlab, et Sébastien Ducoin de l'INSA de Rennes, pour l'assistance fournie dans l'usage du cluster de calcul. Les auteurs remercient également l'Agence Nationale de la Recherche (ANR, Paris) et COHB Industrie pour le soutien à travers la chaire ANR FREEINBTP (ANR-21-CHIN-0003).

REFERENCES

- Bal, S.K., Pramod, V.P., Sandeep, V.M., Manikandan, N., Sarath Chandran, M.A., Subba Rao, A.V.M., Vijaya Kumar, P., Vanaja, M., Singh, V.K., 2023. Identifying appropriate prediction models for estimating hourly temperature over diverse agro-ecological regions of India. *Sci Rep* 13, 7789. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34194-9>
- Bilan thermique, 2023. Bilan Thermique -Economie d'énergie. URL <http://www.bilan-thermique-28.fr/index.html> (accessed 12.29.23).
- CSTB, 2021. Liste minimale des éléments habituellement demandés par le Groupe Spécialisé.
- Diler, S., Weber, A., Bocciarelli, M., Poggi, C., Bernabé, P., 2015. Thermal break elements with applications in seismic zones.
- EC1:1-5, 2004. Eurocode 1 : Actions sur les structures - Partie 1-5 : Actions générales - Actions thermiques.
- EC2:1-2, 2005. Eurocode 2 : Calcul des structures en béton - Partie 1-2 : Règles générales - calcul du comportement au feu.
- Gaël Le Bloa, 2014. Caractérisation du comportement sismique d'une connexion hybride plancher-voile utilisée comme rupteur de ponts thermiques. INSA Rennes.
- Keo, P., Le Gac, B., Somja, H., Palas, F., 2018. Low-cycle fatigue life of a thermal break system under climatic actions. *Engineering Structures* 168, 525–543. <https://doi.org/10.1016/j.eng-struct.2018.04.063>
- Klein Tank, A.M.G., Wijngaard, J.B., Können, G.P., Böhm, R., Demarée, G., Gocheva, A., Miletta, M., Pashiardis, S., Hejkrlik, L., Kern-Hansen, C., Heino, R., Bessemoulin, P., Müller-Westermeier, G., Tzanakou, M., Szalai, S., Pálsdóttir, T., Fitzgerald, D., Rubin, S., Capaldo, M., Maugeri, M., Leitass, A., Bukantis, A., Aberfeld, R., Van Engelen, A.F.V., Forland, E., Miletus, M., Coelho, F., Mares, C., Razuvaev, V., Nieplova, E., Cegnar, T., Antonio López, J., Dahlström, B., Moberg, A., Kirchhofer, W., Ceylan, A., Pachaliuk, O., Alexander, L.V., Petrovic, P., 2002. Daily dataset of 20th-

century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment: EUROPEAN TEMPERATURE AND PRECIPITATION SERIES. *Int. J. Climatol.* 22, 1441–1453. <https://doi.org/10.1002/joc.773>

Meng, T., Somja, H., Meftah, F., Heng, P., 2021. Effect of Climatic Actions On Buildings with Internal Insulation and Thermal Breaks: Multi-Scale Approach and Thermo-Hydro-Mechanical Modeling, in: 14th WCCM-ECCOMAS Congress. Presented at the 14th WCCM-ECCOMAS Congress, CIMNE. <https://doi.org/10.23967/wccm-eccomas.2020.125>

Montazeri, H., Blocken, B., 2017. New generalized expressions for forced convective heat transfer coefficients at building facades and roofs. *Building and Environment* 119, 153–168. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.04.012>

Montazeri, H., Blocken, B., Derome, D., Carmeliet, J., Hensen, J.L.M., 2015. CFD analysis of forced convective heat transfer coefficients at windward building facades: Influence of building geometry. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 146, 102–116. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.07.007>

Nguyen, T.T.H., 2012. Analyses du comportement de rupteurs thermiques sous sollicitations sismiques.

Placo, 2020. Fiche produit Doublissimo® Performance 4.10 13+120.

Qu, Z., Oumbe, A., Blanc, P., Espinar, B., Gesell, G., Gschwind, B., Klüser, L., Lefèvre, M., Saboret, L., Schroedter-Homscheidt, M., Wald, L., 2017. Fast radiative transfer parameterisation for assessing the surface solar irradiance: The Heliosat-4 method. *metz* 26, 33–57. <https://doi.org/10.1127/metz/2016/0781>

Sanjuán, M.Á., Morales, Á., Zaragoza, A., 2021. Effect of Precast Concrete Pavement Albedo on the Climate Change Mitigation in Spain. *Sustainability* 13, 11448. <https://doi.org/10.3390/su132011448>

Schroedter-Homscheidt, M., Azam, F., Betcke, J., Hanrieder, N., Lefèvre, M., Saboret, L., Saint-Drenan, Y. -M., 2022. Surface solar irradiation retrieval from MSG/SEVIRI based on APOLLO Next Generation and HELIOSAT-4 methods. *metz* 31, 455–476. <https://doi.org/10.1127/metz/2022/1132>

Synnefa, A., Santamouris, M., Korres, D., 2006. Investigation of the Solar and Thermal Properties of Materials Used in Outdoor Urban Spaces and Buildings. 27th AIVC and 4th Epic Conference “Technologies & sustainable policies for a radical decrease of the energy consumption in buildings.”

Zheng, S., Wang, Y., Feng, F., Xue, Y., Wang, Z., Duanmu, L., 2022. Analysis on convective heat transfer coefficients of external surfaces for typical building arrays. *Journal of Building Engineering* 62, 105381. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105381>