

VIADUC DE MILLAU - ÉTUDE DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU TABLIER PAR ANALYSE DES MESURES DE LA TEMPÉRATURE DANS LE CAISSON MÉTALLIQUE

ASSESSMENT OF THERMAL ACTIONS IN THE STEEL BOX GIRDER OF THE MILLAU VIADUCT

**Luc DEFAUCHEUX*, Hervé DESPRETS*, Ziad HAJAR*,
Claude SERVANT*, Michel VIRLOGEUX****

* Eiffage TP

** MV Consultant

1. INTRODUCTION

Lors de sa réalisation et en raison de son caractère exceptionnel, le viaduc de Millau a fait l'objet d'une instrumentation importante dont l'objectif est d'une part la surveillance et le suivi du comportement de l'ouvrage dans le temps, et d'autre part la validation des hypothèses de calcul (Vent, Température...) qui ont servi au dimensionnement de l'ouvrage.

Compte tenu de l'importance structurelle des effets thermiques, le caisson métallique du tablier a été équipé de

27 sondes de température dans une section située en travée P2-P3 afin de permettre des enregistrements en continu depuis la mise en service fin décembre 2004.

L'objet de cet article est de présenter les principaux résultats de l'étude menée par le bureau d'études d'Eiffage TP avec les conseils de Michel Virlogeux qui avait piloté une étude similaire pour le caisson métallique du pont de Normandie [1]. Les résultats de cette étude avaient permis par ailleurs de définir les hypothèses de calcul des actions thermiques retenues pour les études d'exécution du viaduc de Millau.

2. DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

Le viaduc de Millau est un ouvrage financé et réalisé par le groupe EIFFAGE dont la filiale, la Compagnie Eiffage du Viaduc de Millau (CEVM), est concessionnaire de l'ouvrage pour 75 ans.

Ce viaduc multi-haubané exceptionnel a une longueur de 2 460 mètres et une hauteur maximale de 343 mètres au sommet des pylônes (figure 1).

De telles caractéristiques confèrent à cet ouvrage le record du monde de longueur des ponts à haubans à travées multiples ainsi que celui de hauteur de piles (P2 : 245m et P3 : 221 m). Le tablier dont la largeur totale est de 27.75 mètres est également équipé de barrières lourdes et d'écrans de protection des usagers contre le vent latéral (figure 2).

Le tablier est un caisson métallique orthotrope de 4,20 m de hauteur dont le platelage supérieur est constitué de tôles de 12 à 14 mm d'épaisseur.

Le tablier repose sur toutes les piles par l'intermédiaire d'appareils d'appuis sphériques. Il est cloué sur les piles à l'aide de câbles de précontrainte.

Chaque travée est supportée par l'intermédiaire de onze paires de haubans disposés en semi-éventail dans l'axe du tablier et ancrés de part et d'autre des pylônes métalliques qui sont en forme de « Y » renversé.

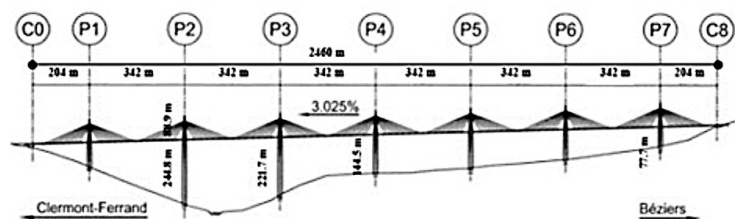


Figure 1 : Vue longitudinale du viaduc.

3. INSTRUMENTATION DE L'OUVRAGE

Lors des études d'exécution, il a été décidé d'équiper une section de l'ouvrage, située entre les piles P2 et P3, de 27 jauges assurant une acquisition de la température toutes les 30 minutes environ (figure 3).

4. CALCUL DES TEMPÉRATURES MOYENNES ET DES GRADIENTS THERMIQUES HORIZONTAUX ET VERTICAUX

Les hypothèses prises en compte ont permis de définir une carte des températures, avec 24 zones d'influence affectées chacune de la température T_k mesurée par la sonde numéro k. La délimitation des zones d'influence associées à chaque capteur est donnée sur le schéma ci-dessous (figure 4) :

La température moyenne d'une partie S_p (longueur curviligne L_p) de la section globale est calculée par intégration de la distribution thermique en utilisant l'hypothèse de température constante dans l'épaisseur des parois minces :

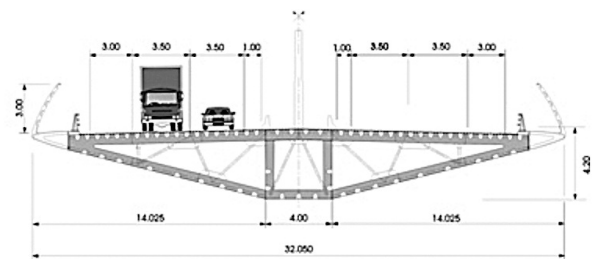


Figure 2 : Coupe transversale du viaduc.

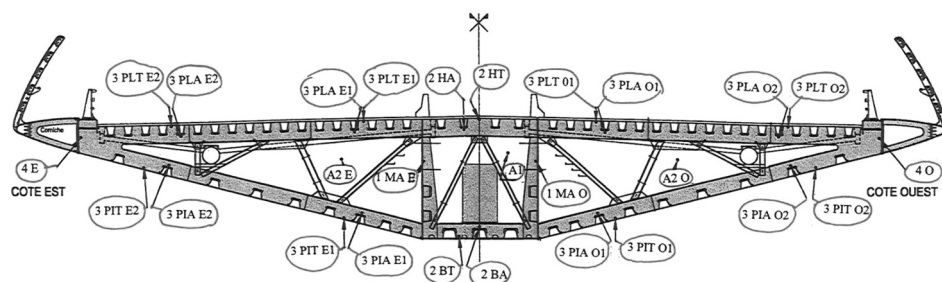


Figure 3 : Localisation des jauges de température sur coupe transversale.

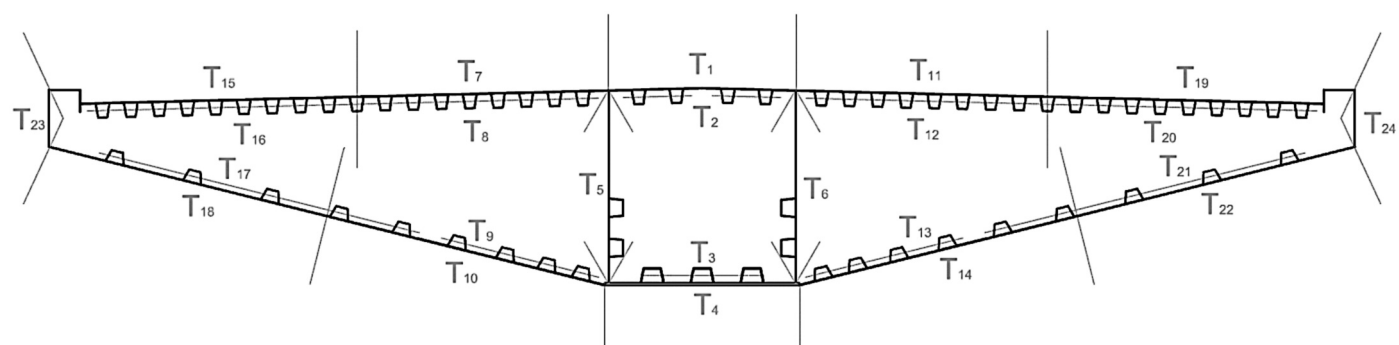


Figure 4 : Zones d'influence des capteurs.

$$T_{\text{moy } Sp} = \frac{1}{S_p} \iint T(y, z) dy dz = \frac{1}{S_p} \int_{L_p} T(s) e(s) ds$$

où $e(s)$ désigne l'épaisseur de la tôle à l'abscisse curviligne s .

De la même manière, il est possible de calculer pour la section globale (de hauteur h et de largeur b) :

– la température moyenne $T_{\text{moy}} = \frac{1}{S} \int_L T(s) e(s) ds$

– le gradient vertical équivalent $GT_z = \frac{h}{I_y} \int_L T(s) e(s) z(s) ds$

– et le gradient transversal équivalent $GT_y = \frac{b}{I_z} \int_L T(s) e(s) y(s) ds$

où I_y et I_z désignent respectivement les inerties de flexion d'axe horizontal et d'axe vertical calculées au centre de gravité de la section.

En pratique, les calculs sont effectués par discrétisation sur les zones d'influence des sondes de température, de section A_k et de centre de gravité $G_k (y_k, z_k)$ par rapport au centre de gravité $G(0,0)$ de la section globale pour la sonde d'ordre k :

– la température moyenne $T_{\text{moy}} = \sum_k T_{\text{capt } k} \cdot \frac{A_k}{A}$

– le gradient vertical équivalent $GT_z = \sum_k T_{\text{capt } k} \cdot \frac{h}{I_y} \cdot z_k A_k$

– et le gradient horizontal équivalent $GT_y = \sum_k T_{\text{capt } k} \cdot \frac{b}{I_z} \cdot y_k A_k$

Les coefficients de pondération ainsi affectés à chaque capteur pour le calcul des températures caractéristiques sont appelés « coefficients d'influence ». Ils dépendent uniquement des dimensions de la section.

5. TRAITEMENT DES DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES

Les relevés de la température atmosphérique sont fournis par la station météo du Viaduc de Millau, située sur le tablier à mi-distance des piles P4 et P5. Les données recueillies contiennent des acquisitions de température à la fréquence d'une mesure toutes les deux minutes pour la période de 2005 à 2012.

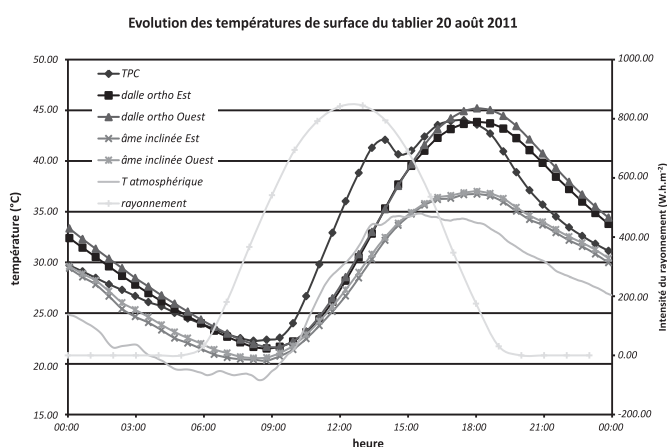


Figure 5 : Températures de surface en journée chaude (20/08/2011).

L'étude des effets de courte durée se base sur les relevés de température atmosphérique de quelques journées types dont les conditions météorologiques sont remarquables. Les courbes de température des graphes de l'étude ont été lissées en remplaçant chaque valeur par la moyenne sur 15 valeurs (30 min) pour atténuer les variations rapides.

L'étude des effets de longue durée se base sur les températures maximale et minimale pour chaque journée de la période d'étude.

Certaines données météorologiques ont été, en outre, récupérées auprès de la station de Météo France de Millau Soulobres, située à 2.5 kilomètres au Nord du Viaduc et à une altitude de 712 mètres. Les données de rayonnement global journalier (intégrale de l'énergie de rayonnement solaire sur une journée en Wattheure par mètre carré) de 2005 à 2012 sont ainsi disponibles.

6. ÉTUDE DES EFFETS THERMIQUES DE COURTE DURÉE

6.1. Comportement thermique du caisson en période estivale

6.1.1. Températures de surface (Terre-plein central, platelages Est et Ouest)

On appelle « températures de surface » les températures moyennes des ensembles constitués des tôles et des augets du pourtour du caisson. On définit par exemple la température moyenne de l'âme inclinée Est, T_{moy} (âme inclinée Est), comme la moyenne associée aux températures T_{13} , T_{14} , T_{21} et T_{22} , en se référant à la numérotation de la figure 4.

Les figures 5 et 6 représentent l'évolution de ces températures de surface du caisson, respectivement en journée chaude et en journée avec un fort gradient vertical :

- L'allure générale des courbes de températures de surface suit globalement les variations de la température atmosphérique.
- Les températures des faces supérieures du caisson (dalles orthotropes et terre-plein central) croissent beaucoup plus rapidement que les températures des faces inférieures.

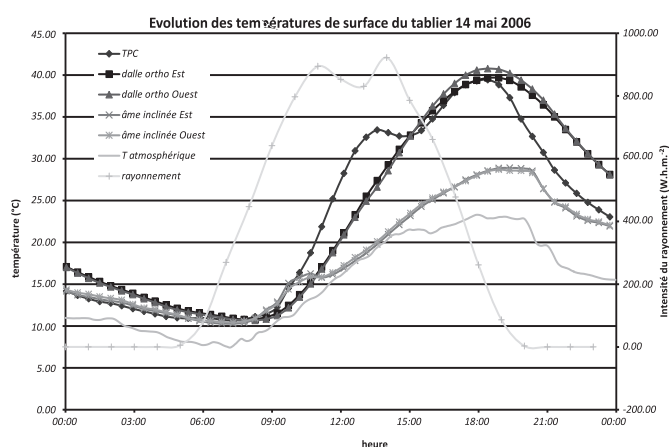


Figure 6 : Températures de surface avec un fort gradient vertical (14/05/2006).

rieures du caisson. Au pic de chaleur dans le tablier, l'écart de température entre les faces supérieures du caisson et les âmes inférieures est maximal ; il est de l'ordre de 10°C (cf. figure 5 et figure 6). Cet écart peut atteindre 12-13°C au cours des journées de fort rayonnement solaire. En revanche, il peut devenir inférieur à 1°C et même négatif lors des journées de faible rayonnement solaire.

L'amplitude thermique est forte au niveau des surfaces supérieures, tandis que celle des surfaces inférieures est faible. Cet écart peut être directement relié au rayonnement solaire, qui affecte particulièrement les surfaces supérieures.

- Les variations thermiques sont plus rapides au niveau du terre-plein central que sur les parties latérales du platelage supérieur. Ce phénomène s'explique par une différence des enrobés entre les chaussées et le terre-plein central.
- Aucune différence sensible n'est observée entre les températures de surface à l'Est et à l'Ouest. L'orientation du tablier semble avoir peu d'influence sur son exposition au soleil.
- Pour les âmes inclinées et les platelages orthotropes, la différence de température entre un platelage situé à l'est et son symétrique situé à l'ouest ne dépasse pas 1.5°C.
- Il y a un décalage entre le pic de rayonnement solaire et le pic de température dans le tablier. Généralement, la

température maximale dans les platelages orthotropes se produit 5 à 6 heures après le pic de rayonnement solaire (cf. figures 6 et 7). Après 10 heures, les effets se combinent ; il est alors difficile d'évaluer les parts d'influence respectives de la température atmosphérique et du rayonnement solaire pour les variations des températures du tablier.

Le 11 avril 2011 (cf. figure 7) est une journée froide avec un rayonnement solaire élevé. L'influence de ce paramètre en est d'autant plus visible. La différence de température entre les âmes inclinées et le terre-plein central atteint 9.5°C.

La figure 8 illustre l'écart de température constaté entre les relevés de deux capteurs situés dans une même zone du tablier, l'un sur le platelage, l'autre au bas de l'auget. Ce saut de température peut atteindre 7 à 8°C au pic de température par une journée de fort rayonnement.

6.1.2. Températures au niveau du caisson central

L'évolution des températures du caisson central suit la logique des deux phases que sont une phase de refroidissement et une phase de réchauffement. Le décalage temporel dans les variations de températures des parties supérieures et inférieures du tablier est observable sur la figure 9.

La comparaison avec les résultats obtenus pour le pont de Normandie montre que (figure 10) :

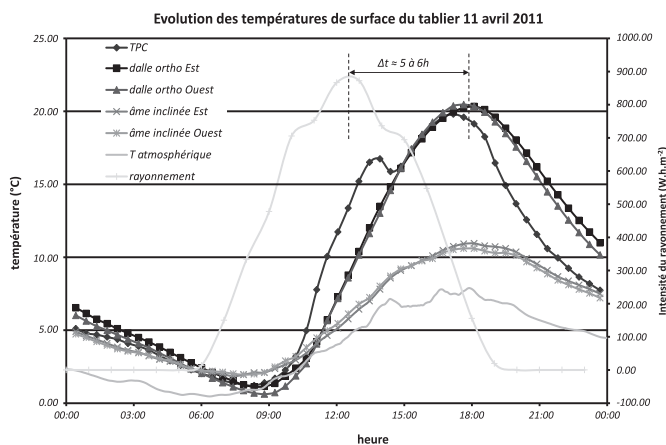


Figure 7 : Températures de surface en journée froide (11/04/2011).

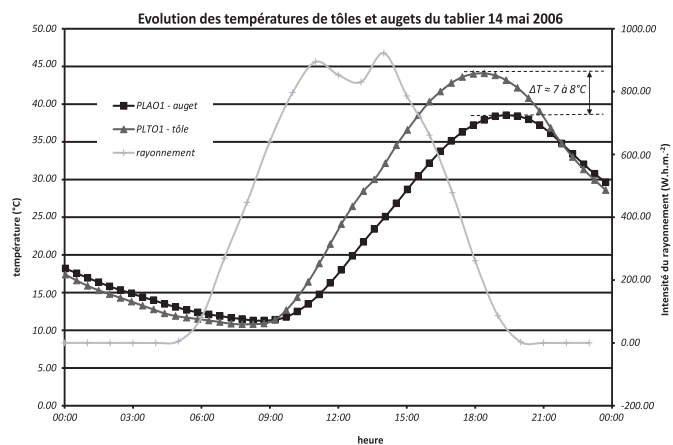


Figure 8 : Zoom sur les températures de tôle / températures des augets (14/05/2006).

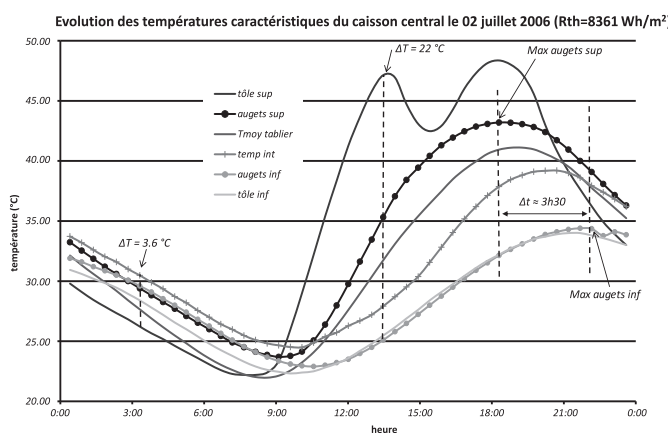


Figure 9 : Températures du caisson central en journée chaude (02/07/06).

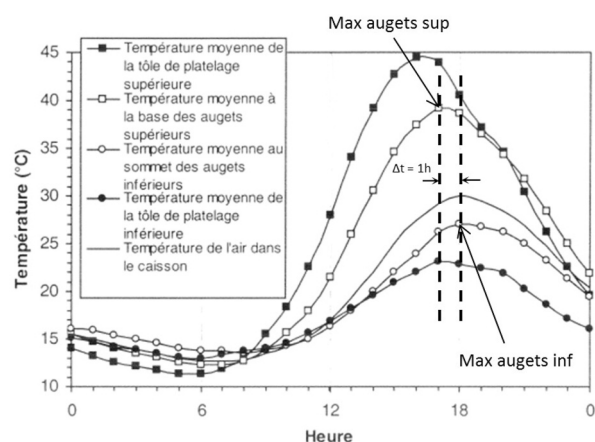


Figure 10 : Comparaison avec le pont de Normandie (04/06/98).

– l'allure générale des courbes est identique pour les deux ouvrages.

Le décalage temporel dans le cas du pont de Normandie est moins marqué.

6.1.3. Température moyenne

La température moyenne du caisson dépend de la température atmosphérique et du rayonnement solaire. Le caisson est à une température moyenne toujours plus élevée que l'air ambiant. Le rayonnement agit en particulier sur la différence entre le maximum de la température atmosphérique et le maximum de la température moyenne du caisson (figure 11).

6.1.4. Gradients thermiques

Le gradient thermique vertical est fortement lié au rayonnement solaire. Le maximum du gradient vertical apparaît 3 à 5 heures après le pic de rayonnement solaire (figure 13) :

La journée du 28 juin 2011 permet d'observer l'apparition d'un gradient horizontal sensible qui coïncide avec un fort rayonnement solaire. Cependant, ce gradient reste faible et négligeable devant les amplitudes de variations des températures du tablier et de l'air ambiant.

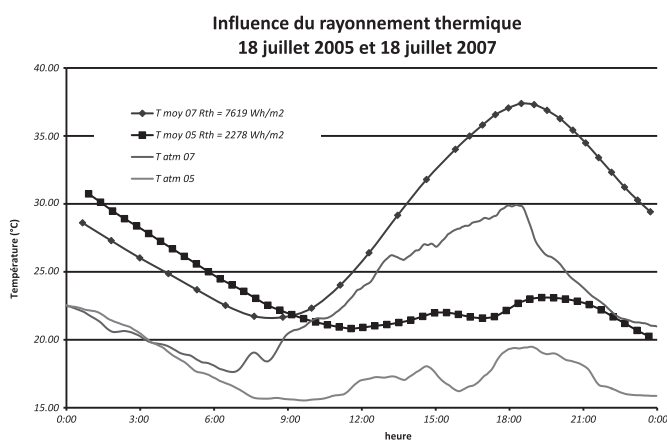


Figure 11 : Comparaison de l'évolution de la température moyenne du caisson sous différents rayonnements solaires.

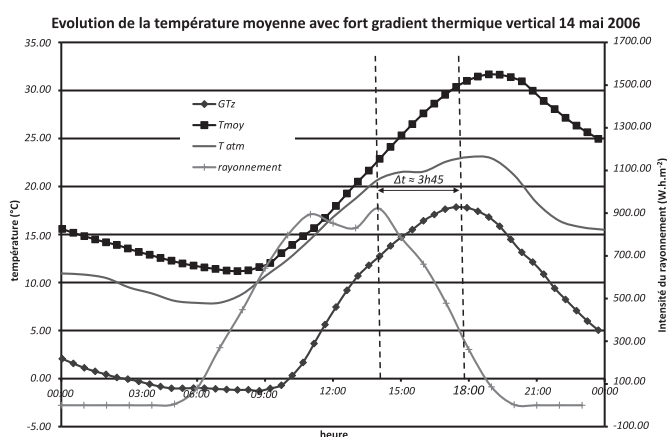


Figure 13 : Évolution du gradient thermique vertical équivalent (14/05/2006).

6.2. Comportement thermique du caisson en période hivernale

6.2.1. Températures de surface

En période hivernale, les variations de températures de surface du caisson suivent également l'allure des variations de la température de l'air ambiant.

Tout comme en été, les surfaces supérieures de tablier, sous l'effet du rayonnement solaire, répercutent plus rapidement et avec plus d'intensité les élévations de température de mi-journée. Ce constat est valable pour les journées froides et les journées chaudes.

6.2.2. Températures au niveau du caisson central

Les phénomènes observés (figure 17) sont proches de ceux relevés en période chaude, à savoir :

- un écart de température maximal entre le terre-plein central et le fond de caisson d'environ 17°C,
- un retard du pic de température en fond de caisson de l'ordre de 3 heures par rapport au pic de température sur le terre-plein central,
- une variation homogène des températures dans une fourchette de 4°C pendant la nuit.

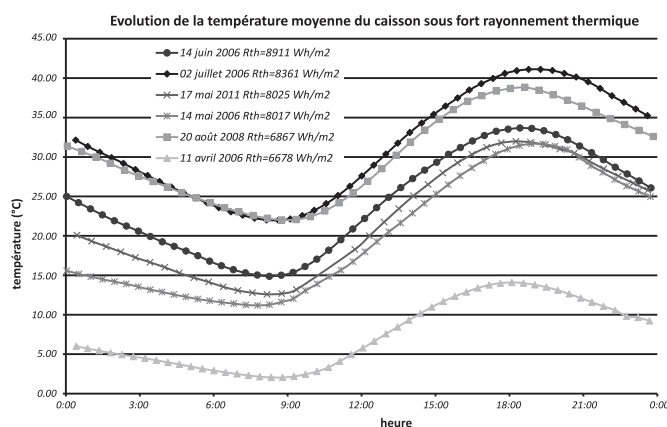


Figure 12 : Évolution de la température moyenne du caisson sous fort rayonnement solaire.

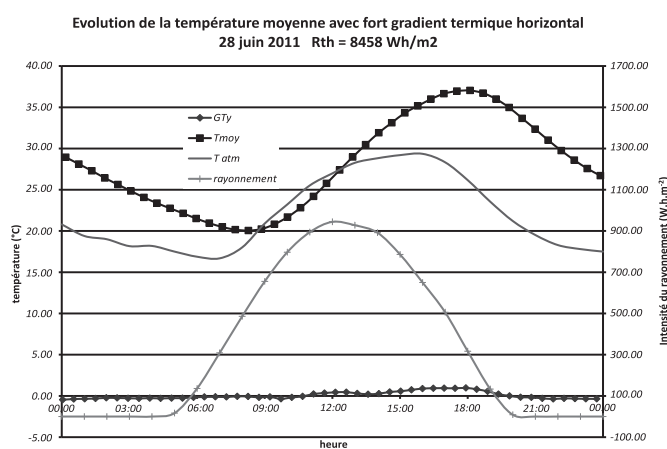


Figure 14 : Évolution du gradient thermique horizontal équivalent (28/06/2011).

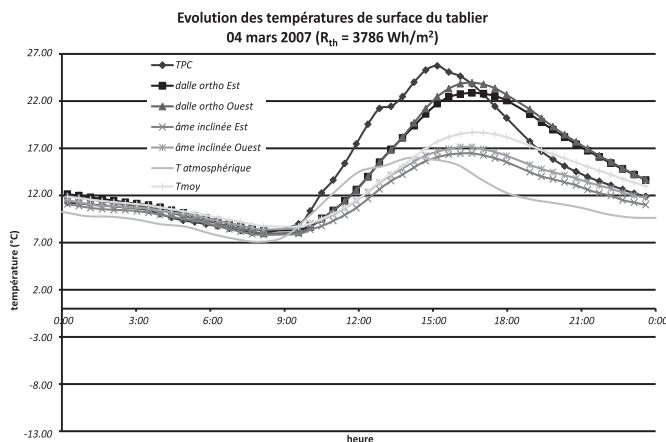


Figure 15 : Températures de surface en journée chaude (04/03/2007).

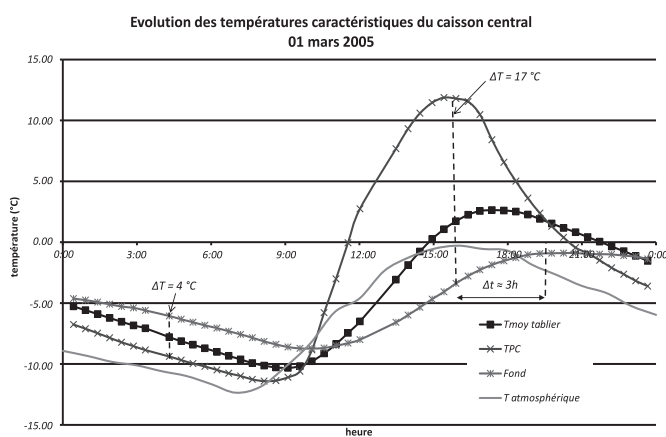


Figure 17 : Températures du caisson central en journée froide (01/03/05).

6.2.3. Température moyenne

L'hiver, et par temps froid, le rayonnement solaire joue un rôle majeur sur les variations de température du tablier, comme le montrent les figures 18 et 19 représentant les courbes d'évolution de la température moyenne du tablier pour des journées froides à faible rayonnement ($R_{th} = 715 \text{ Wh/m}^2$ le 09/01/06) et à fort rayonnement ($R_{th} = 4642 \text{ Wh/m}^2$ le 01/03/05).

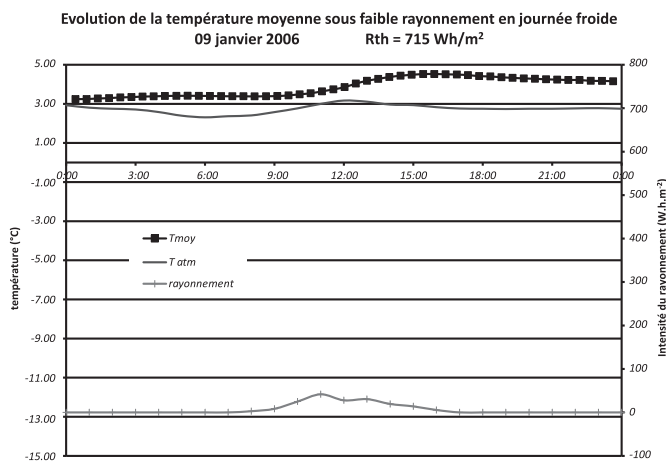


Figure 18 : Température moyenne sous faible rayonnement solaire (09/01/06).

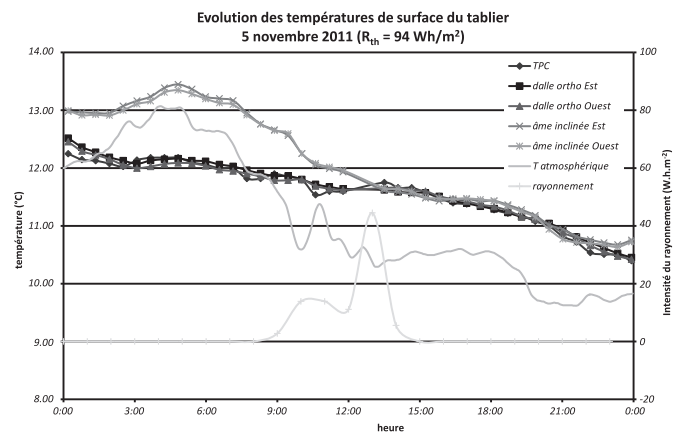


Figure 16 : Températures de surface sous faible rayonnement solaire (05/11/2011).

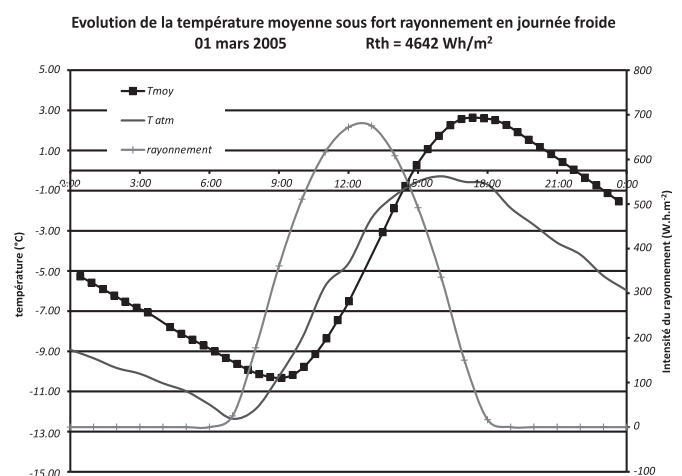


Figure 19 : Température moyenne sous fort rayonnement solaire (01/03/05).

6.2.4. Gradients thermiques

En l'absence de rayonnement solaire, le gradient vertical est légèrement négatif, ce qui peut probablement s'expliquer par l'influence du vent. Ce paramètre est toutefois négligeable devant le rayonnement solaire, dès que ce dernier cesse d'être négligeable.

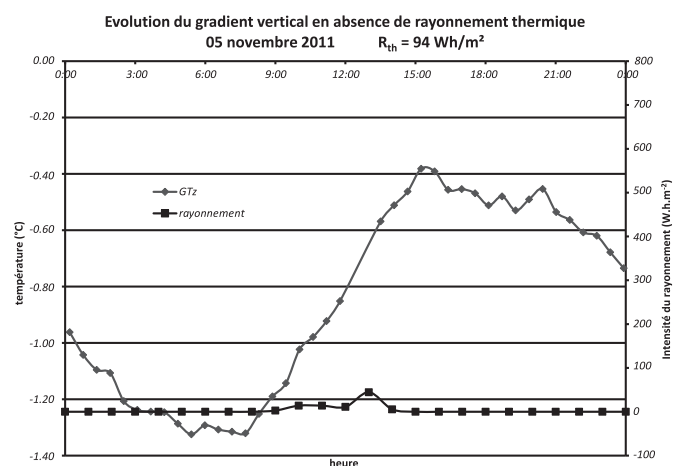


Figure 20 : Exemple de gradient thermique négatif sous faible rayonnement (05/11/11).

7. ÉTUDE DES EFFETS THERMIQUES DE LONGUE DURÉE

7.1. Température moyenne du caisson

Les paramètres utilisés dans l'étude des effets thermiques de longue durée sont la température atmosphérique maximale journalière et le rayonnement solaire journalier.

7.1.1. Valeurs maximales journalières

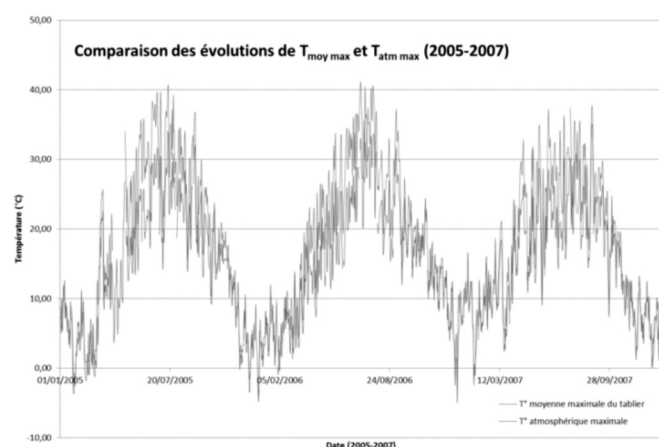


Figure 21 : Évolution de la température atmosphérique maximale et de la température moyenne maximale du tablier pendant trois ans.

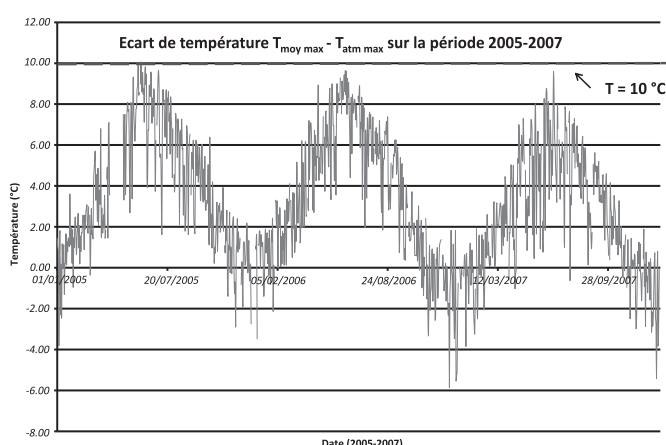


Figure 22 : Évolution de la différence entre la température maximale du tablier et la température atmosphérique maximale pendant trois ans.

Le maximum journalier de la température moyenne du tablier présente des variations annuelles semblables à celles du maximum journalier de la température atmosphérique.

Entre fin novembre et mi-février, la température atmosphérique maximale est généralement plus élevée de quelques degrés que la température maximale du tablier. Le reste de l'année, le tablier atteint une température moyenne maximale plus élevée que la température atmosphérique maximale. Entre mi-mai et mi-juillet, cette différence de température atteint des valeurs de l'ordre de 8 à 10 °C, ce qui conduit à la relation :

$$\text{Max}(T_{\text{moy}}) = \text{Max}(T_{\text{atm}}) + 10^{\circ}\text{C}$$

Dans la *Note d'hypothèses des actions d'origine thermique du Viaduc de Millau*, la température maximale du tablier avait alors été estimée selon la relation suivante :

$$\text{Max}(T_{\text{moy}}) = \text{Max}(T_{\text{atm}}) + 12^{\circ}\text{C}$$

La régression linéaire entre la température moyenne maximale du caisson et la température maximale atmosphérique montre une forte corrélation entre les deux valeurs :

$$T_{\text{moy max}} = 1.24T_{\text{atm max}} - 0.49$$

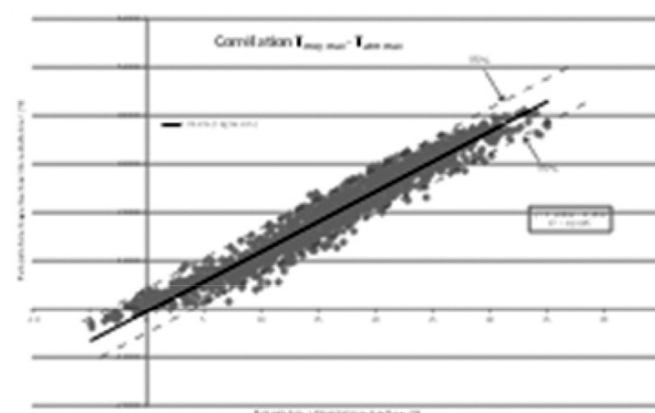


Figure 23 : Corrélation entre les maxima journaliers de température moyenne du caisson et les maxima journaliers de température atmosphérique.

L'étude du comportement thermique du tablier sur une courte période a montré que les variations de température du tablier dépendaient également du rayonnement solaire. Cependant la corrélation directe entre la température du tablier et le rayonnement solaire montre une dispersion importante. Ces résultats amènent logiquement à s'intéresser à la corrélation de la température du caisson avec ces deux paramètres météorologiques. Une régression linéaire effectuée sur les deux variables par la méthode des moindres carrés, avec une régression linéaire à deux variables conduit à la formule suivante :

$$T_{\text{moy max}} = 1.03T_{\text{atm max}} + 0.00093R_{\text{th}} - 1.01$$

Dans sa thèse sur les *Actions thermiques dans un caisson orthotrope sous sollicitations météorologiques*, J-M Lucas [2] a obtenu une corrélation similaire pour le Pont de Normandie à partir de mesures réalisées sur trois années (soit environ 950 observations) :

$$T_{\text{moy max}} = 0.97T_{\text{atm max}} + 0.0017R_{\text{th}} + 0.26$$

La formule ci-avant a été remplacée dans l'article *Temperature in the Box Girder of the Normandy Bridge*, Structural Engineering International [1], par l'expression simplifiée suivante :

$$T_{\text{moy max}} = T_{\text{atm max}} + 0.0017R_{\text{th}}$$

Dans les formules ci-dessus, les deux études conduisent à un coefficient de température atmosphérique très proche de 1. En revanche, le coefficient du rayonnement est 1.8 fois plus grand dans le cas du Pont de Normandie. De même, le coefficient constant est sensiblement différent mais très faible.

7.1.2. Valeurs minimales journalières

À l'exception de quelques journées entre décembre et février, la température moyenne minimale du tablier est toujours un peu plus élevée que la température atmosphérique minimale.

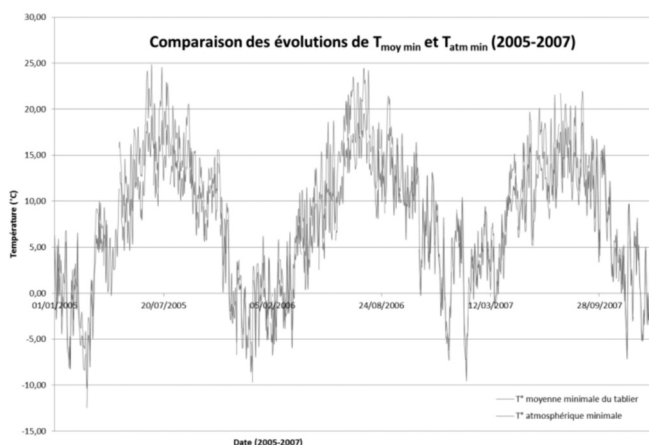


Figure 24 : Évolution de la température atmosphérique minimale et de la température moyenne minimale du tablier pendant trois ans.

La différence de température évolue entre 0.5°C et 5°C avec une variation saisonnière.

La relation suivante fournit une bonne approximation de la température moyenne minimale du caisson :

$$\text{Min}(T_{\text{moy}}) = \text{Min}(T_{\text{atm}}) - 1^\circ\text{C}$$

7.1.3. Valeurs extrêmes annuelles

Sur la période d'étude 2005-2011, les extrema de température moyenne du tablier et de température atmosphérique ont été relevés pour chaque année.

On constate que les relations établies aux § 7.1.1 et 7.1.2 nous placent en sécurité.

$$\text{Max}(T_{\text{moy}}) = 41.11^\circ\text{C} < \text{Max}(T_{\text{atm}}) + 10^\circ\text{C} = 35.06 + 10 = 45.06^\circ\text{C}$$

$$\text{Min}(T_{\text{moy}}) = -10.33^\circ\text{C} > \text{Min}(T_{\text{atm}}) - 1^\circ\text{C} = -12.45 - 1 = -13.45^\circ\text{C}$$

Avec une température de référence de 10°C les prescriptions de calcul du Viaduc de Millau fixaient l'écart maximal à +35°C et l'écart minimal à -40°C pour les effets thermiques rares dans le métal. Les données recueillies à la station météorologique de Millau-Soulobres permettent de remonter aux extrema de température atmosphérique depuis 1965 indiqués ci-après et sur lesquels sont basées les hypothèses de calcul du Viaduc de Millau :

Température maximale de 37.5°C atteinte les 30/07/1983 et 16/08/1987

Température minimale de -17.5°C atteinte le 16/01/1985

À la fin de l'année 2004, il a été décidé de porter la température de référence de 10°C à 13°C pour définir l'état à vide de l'ouvrage.

L'Eurocode 1 partie 5, indique à la clause 6.1.3.2(1) des valeurs de référence pour les températures maximale et minimale de l'air sous abri pour chaque département français. La clause 6.1.3.1(4) définit l'écart entre la température de l'air sous abri et la température du tablier en fonction de la nature du tablier. L'application de l'Eurocode 1 pour un tablier métallique situé dans le département de l'Aveyron donne ainsi :

$$\text{Max}(T_{\text{moy}}) = \text{Max}(T_{\text{atm}}) + \Delta T_{\text{max}} = 40 + 16 = 56^\circ\text{C}$$

$$\text{Min}(T_{\text{moy}}) = \text{Min}(T_{\text{atm}}) + \Delta T_{\text{min}} = -20 - 3 = -23^\circ\text{C}$$

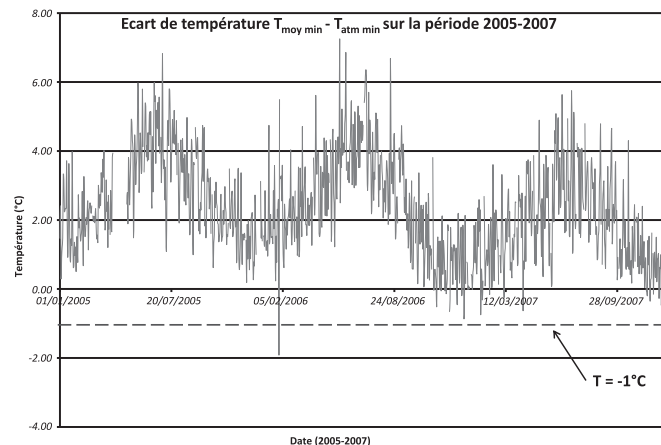


Figure 25 : Évolution de la différence entre la température moyenne minimale du tablier et la température atmosphérique minimale pendant trois ans.

Nous allons comparer dans les tableaux ci-après les différents résultats obtenus pour les deux températures de référence retenues pendant les études d'exécution à savoir 10°C puis 13°C.

Ce tableau permet de juger de la pertinence des hypothèses thermiques retenues pour le projet du Viaduc de Millau et des prescriptions réglementaires :

- Variations thermiques positives / négatives maximales autour de T_{ref} :

La *Note d'hypothèses des actions d'origine thermique* dégage une marge d'environ 8°C par rapport aux valeurs maximales observées entre 2005 et 2011.

- Écarts entre température atmosphérique et température moyenne du tablier :

Les valeurs observées entre 2005 et 2011 sont très proches de celles de la *Note d'hypothèses des actions d'origine thermique*. Les prescriptions de l'Eurocode 1 sont toutefois pessimistes pour les écarts de température positifs.

À noter par ailleurs, que sur la période étudiée, la plus forte température observée du tablier a été atteinte pour le côté ouest du platelage orthotrope, dont la température s'est élevée à 49.7°C le 2 juillet 2006.

7.2. Gradient thermique horizontal équivalent

Le gradient thermique horizontal équivalent varie entre les valeurs extrêmes de -3 et +3°C. Cette faible valeur du gradient thermique transversal s'explique certainement par les dimensions transversales du tablier. En effet, la grande largeur du tablier (27.75 m) conduit à une grande inertie de flexion d'axe vertical $I_z = 81 \text{ m}^4$, qui a tendance à diminuer l'influence du gradient transversal.

À titre de comparaison, le tablier du pont de Normandie présente une inertie de flexion verticale $I_z = 43 \text{ m}^4$. Ce rapport de moitié entre les inerties I_z des deux ouvrages se retrouve à peu près dans l'amplitude de variation des gradients transversaux :

-/+ 3 °C pour le viaduc de Millau,

ΔT max	$T_{atm\ max}$ (1)	$(T_{moy\ max} - T_{atm\ max})$ (2)	$T_{moy\ max}$ (1) + (2) = (3)	$(T_{atm\ max} - T_{réf})$ (4)	$(T_{moy\ max} - T_{réf})$ (2) + (4) = (5)
CCTP ($T_{réf} = 10^{\circ}C$)	45	–	45	35	35
Note d'hypothèses ($T_{réf} = 10^{\circ}C$)	37.5	12	49.5	27.5	39.5
Note d'hypothèses ($T_{réf} = 13^{\circ}C$)	37.5	12	49.5	24.5	36.5
Mesures Millau 2005-2011 ($T_{réf} = 13^{\circ}C$)	35.1	10	45.1	22.1	32.1
Eurocode 1 ($T_{réf} = 13^{\circ}C$)	40	16	56	27	43

ΔT min	$T_{atm\ min}$ (1)	$(T_{moy\ min} - T_{atm\ min})$ (2)	$T_{moy\ min}$ (3) = (1) + (2)	$(T_{atm\ min} - T_{réf})$ (4)	$(T_{moy\ min} - T_{réf})$ (5) = (2) + (4)
CCTP ($T_{réf} = 10^{\circ}C$)	– 30	–	– 30	– 40	– 40
Note d'hypothèses ($T_{réf} = 10^{\circ}C$)	– 17.5	0	– 17.5	– 27.5	– 27.5
Note d'hypothèses ($T_{réf} = 13^{\circ}C$)	– 17.5	0	– 17.5	– 30.5	– 30.5
Mesures Millau 2005-2011 ($T_{réf} = 13^{\circ}C$)	– 12.5	– 1	– 13.5	– 25.5	– 26.5
Eurocode 1 ($T_{réf} = 13^{\circ}C$)	– 20	– 3	– 23	– 33	– 36

Figure 26 : Tableaux comparatifs des variations de température.

-/+ 5°C pour le pont de Normandie.

Lorsqu'on étudie l'évolution du gradient horizontal au cours d'une journée de forte amplitude thermique horizontale, on constate que la variation du gradient est proche de celle de la différence de température entre les deux âmes de rive. On relève seulement un léger décalage temporel de l'ordre de 30 minutes.

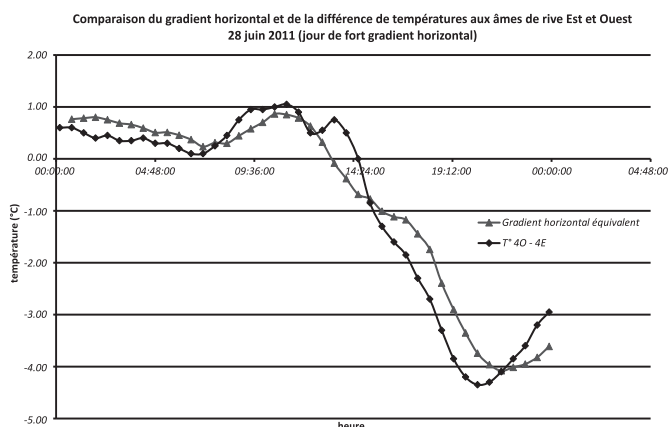


Figure 27 : Journée de gradient thermique horizontal maximal.

Dans la *Note d'hypothèses des actions d'origine thermique* du Viaduc de Millau, il a été considéré que ce gradient était négligeable. Les mesures montrent que sa valeur maximale depuis 2005 a atteint 4,6°C, ce qui valide

l'hypothèse de calcul retenue. Il y a lieu de rappeler que le paragraphe 6.1.4.4 de l'Eurocode 1-5 conseille de prendre en compte le gradient horizontal seulement dans certains cas particuliers, tels que les situations où le tablier, par son orientation ou sa configuration, a un côté plus exposé au soleil que l'autre. Une valeur de référence de 5°C est alors donnée.

7.3. Gradient thermique vertical équivalent

Les extrema de gradient thermique vertical équivalent du tablier ont été relevés pour chaque année de l'étude (figure 29).

L'observation des évolutions annuelles du gradient thermique vertical équivalent et du rayonnement solaire journalier met en évidence un caractère saisonnier et une certaine corrélation entre ces deux grandeurs.

Lors des journées de fort rayonnement, le gradient peut être estimé par la relation suivante :

$$\text{Max}(GT_z) = 0.002R_{th}$$

Pour le Pont de Normandie, la relation obtenue avec les mesures réalisées entre 1996 et 1998 était :

$$\text{Max}(GT_z) = 0.003R_{th}$$

L'influence du rayonnement sur le gradient thermique vertical s'avère moins élevée pour le Viaduc de Millau que

	GT _z max annuel °C
24/05/2005	17.78
14/05/2006	17.85
30/05/2007	17.94
18/06/2008	17.94
17/05/2011	17.28

	GT _z min annuel °C
30/01/2005	- 3.36
23/01/2006	- 3.31
17/11/2007	- 3.53
02/03/2008	- 3.24
03/01/2011	- 3.52

Figure 28 : Maximum et minimum annuels du gradient vertical de 2005 à 2011.

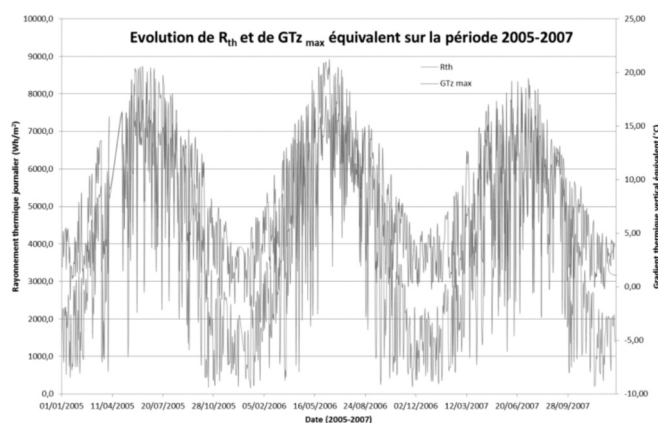


Figure 29 : Évolution annuelle du maximum journalier de gradient thermique vertical et du rayonnement global quotidien (période 2005-2007).

pour le Pont de Normandie. Ce constat est identique à celui indiqué au paragraphe 7.1 sur le rôle joué par le rayonnement solaire dans les variations de température moyenne du tablier. En l'absence de données précises sur le rayonnement, la note d'hypothèses des actions d'origine thermique considèrerait une valeur maximale du gradient thermique vertical équivalent sévère de 25°C à corriger en fonction des relevés de rayonnement.

Pour un tablier métallique, le paragraphe 6.1.4.1 de l'Eurocode 1-5 donne pour le gradient thermique vertical (positif) une valeur de 18°C lorsque la surface supérieure est plus chaude que la partie inférieure. Pour le Viaduc

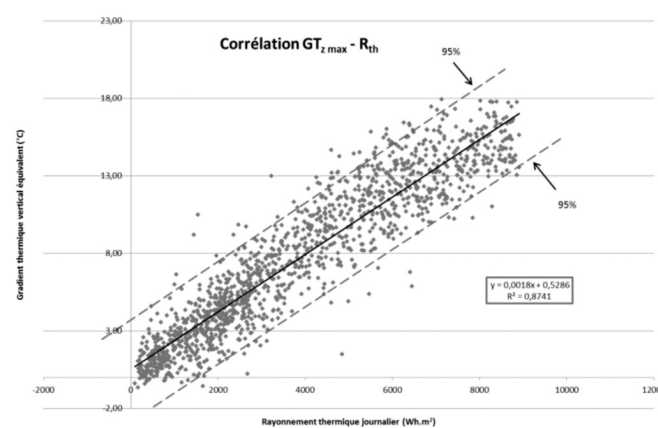


Figure 30 : Gradient linéaire vertical équivalent en fonction du rayonnement solaire journalier.

de Millau cette valeur coïncide avec celle établie à partir des mesures sur la période 2005-2011. Le gradient inverse (négatif), lorsque la surface inférieure est plus chaude que la surface supérieure, peut atteindre 13°C d'après l'Eurocode. Les résultats des mesures montrent que ce gradient ne dépasse pas 4°C pour le Viaduc de Millau.

7.4. Concomitance

La représentation du gradient thermique vertical équivalent maximal en fonction de la température moyenne maximale

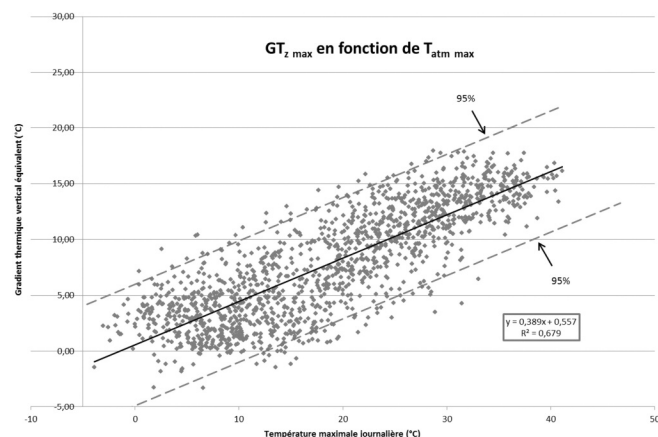


Figure 31 : Représentation du gradient linéaire vertical équivalent de température en fonction de la température atmosphérique (ou de l'air).

Rapports	T _{moy} Concomitant / T _{moy} max annuel	ΔT Concomitant / ΔT max annuel	GT _z Concomitant / GT _z max annuel
2005	0.76	0.65	0.75
2006	0.77	0.66	0.90
2007	0.76	0.63	0.77
2011	0.83	0.74	0.69
Moyenne	0.78	0.67	0.78

Figure 32 : Étude de la simultanéité des maxima annuels de gradient vertical et de température moyenne du tablier.

montre que les deux paramètres sont relativement bien corrélés.

En considérant les températures absolues, les valeurs concomitantes représentent environ 78% de la valeur maximale annuelle.

$$\text{Max}(T_{\text{moy}}) + 0.78 \text{Max}(GT_z)$$

$$0.78 \text{Max}(T_{\text{moy}}) + \text{Max}(GT_z)$$

Pour le Pont de Normandie, les concomitances étaient similaires et les deux coefficients égaux à 0.80. En considérant des variations de température par rapport à la température de référence, les combinaisons deviennent :

$$\text{Max}(\Delta T_{\text{moy}}) + 0.78 \text{Max}(GT_z)$$

$$0.67 \text{Max}(\Delta T_{\text{moy}}) + \text{Max}(GT_z)$$

Ces résultats peuvent être comparés aux préconisations de l'Eurocode 1-5 § 6.1.5, selon lesquelles :

– le coefficient d'accompagnement pour l'action du gradient vertical doit être pris égal à $\omega_N = 0.75$

$$\text{soit : } \text{Max}(\Delta T_{\text{moy}}) + 0.75 \text{Max}(GT_z)$$

– le coefficient d'accompagnement pour la variation de température doit être pris égal à $\omega_M = 0.35$

$$\text{soit : } 0.35 \text{Max}(\Delta T_{\text{moy}}) + \text{Max}(GT_z)$$

La seconde formule de l'Eurocode ne va pas dans le sens de la sécurité.

8. CONCLUSION

Les analyses menées en exploitant les enregistrements réalisés sur une période de sept ans allant de 2005 à 2011 permettent de connaître avec précision le comportement

thermique du tablier : l'évolution des valeurs extrêmes de la température moyenne du caisson, les valeurs des gradients thermiques, vertical et transversal, ainsi que la concomitance entre les deux phénomènes en recourant à une analyse statistique. Il a également été possible d'établir la corrélation de ces grandeurs avec les données météorologiques, et plus particulièrement la température ambiante et l'ensoleillement (rayonnement solaire).

Elles ont permis ainsi de confirmer les hypothèses de calcul établies par Michel VIRLOGEUX qui ont servi à la conception et à la justification de l'ouvrage. Ces analyses montrent que le dimensionnement du tablier et des appuis du viaduc de Millau a été mené sur la base d'hypothèses réalistes et prudentes.

Pour conclure, au regard des observations et des calculs effectués, il a été décidé avec l'accord du concessionnaire de conserver un ensemble de 8 capteurs (au lieu des 27 d'origine) afin de réduire le volume des enregistrements dans le temps tout en continuant à enregistrer des valeurs significatives de la température.

RÉFÉRENCES

- [1] Lucas Jean-Michel, Virlogeux Michel, Louis Claude: Temperature in the Box Girder of the Normandy Bridge - Structural Engineering International, 2005, vol. 15, n°3.
- [2] Lucas Jean-Michel. Actions thermiques dans un caisson métallique orthotrope. Modélisation et mesures sur le Pont de Normandie. Thèse de doctorat. Université du Havre 2001.