

VIADUC DE MILLAU

ETUDE DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU TABLIER

LUC DEFAUCHEUX – HERVÉ DESPRETS - **ZIAD HAJAR** - CLAUDE SERVANT

EIFFAGE TP

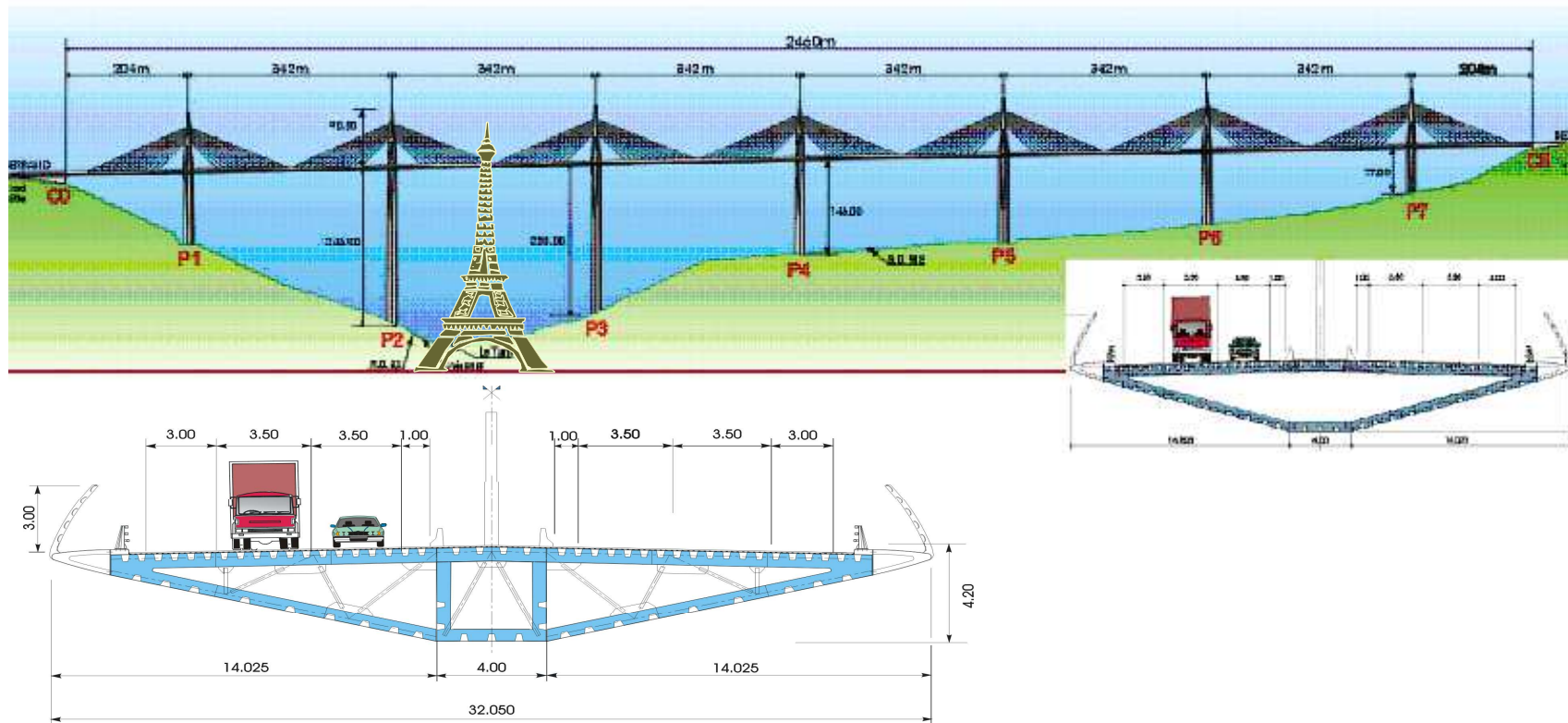
MICHEL VIRLOGEUX

MV CONSULTANT

GC'2015 – Paris 18 et 19 Mars 2015

■ Ouvrage exceptionnel multihaubané (2460 m)

Record du monde de hauteur des piles



- Longueur : 2 460 m

- Hauteur des piles : de 78 à 245 m

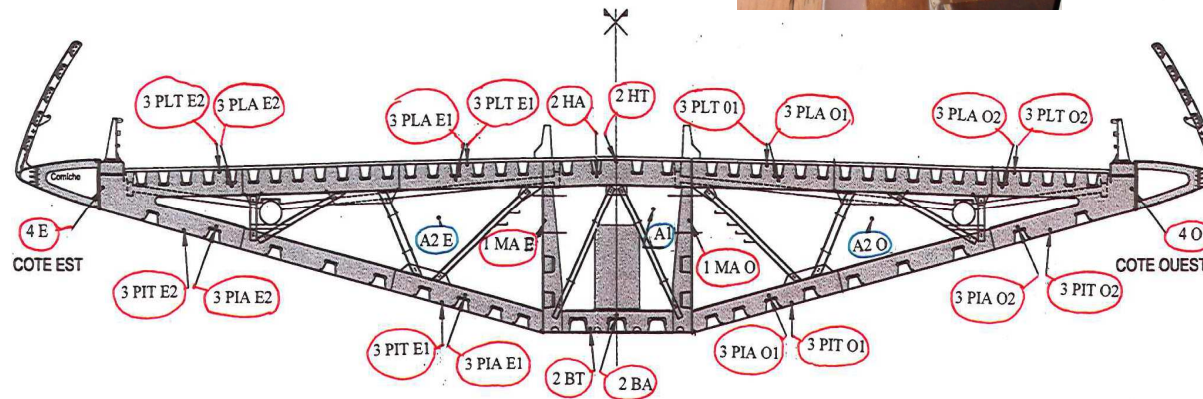
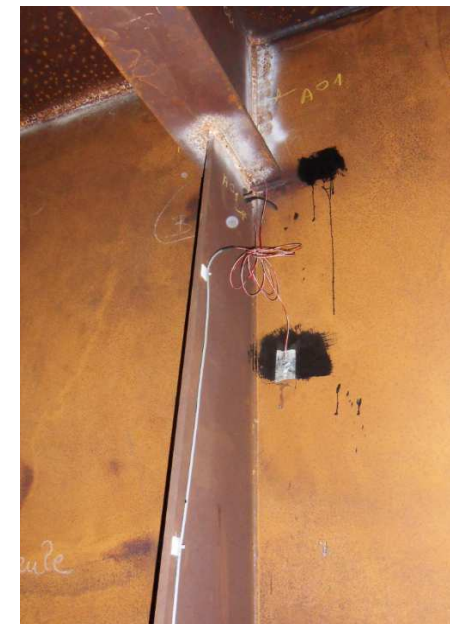
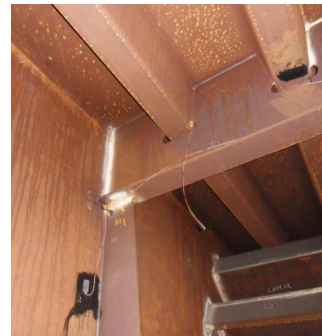
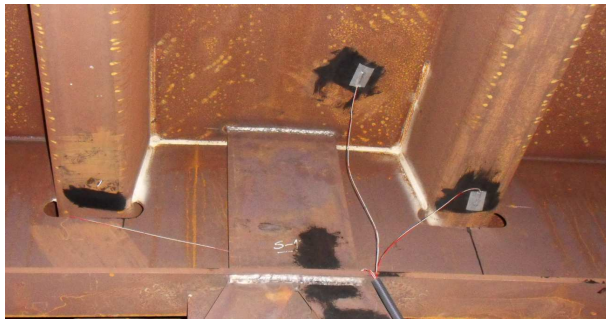
- Travées : 204 m, 6 x 342 m, 204 m

- Hauteur des pylônes : 90 m

- Etude du comportement thermique du tablier basée sur une période de 7 ans d'acquisitions (2005 à 2011)
- Evaluation des actions thermiques et leur corrélation avec les données météorologiques ($T_{\text{tab.}}$, Gradients, concomitance,....)
- Comparaison avec les hypothèses de calcul (CCTP, EC1, ..)
- Préconisations pour le suivi allégé (nombre de capteurs, cadences d'acquisitions,...)

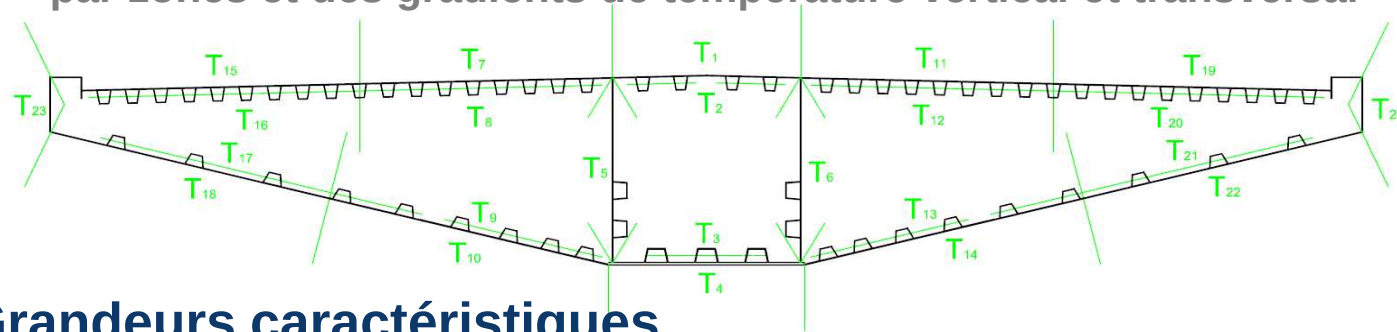
INSTRUMENTATION

- 1 section instrumentée située entre les piles P2 et P3
- 27 sondes thermiques
- Une acquisition toute les 30 min entre 2005 et 2011



Traitement des relevés de température

- Découpage du tablier en zones d'influence
- Calcul de la température moyenne, des températures caractéristiques par zones et des gradients de température vertical et transversal



Grandeurs caractéristiques

- ☐ Température moyenne
- ☐ Gradient vertical équivalent
- ☐ Gradient transversal équivalent

$$T_m = \frac{1}{S} \int_0^L T(z) e(z) dz$$

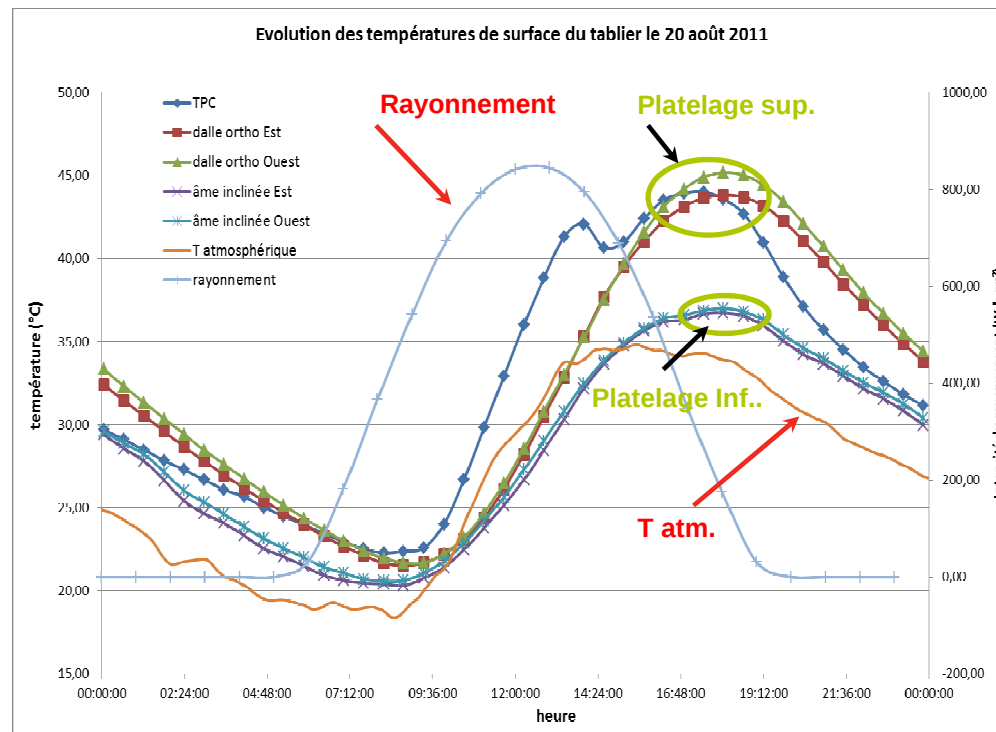
$$GT_z = \frac{h}{T_m} \int_0^L T(z) e(z) z dz$$

$$GT_y = \frac{b}{l_z} \int_L T(s) e(s) y(s) ds$$

Données météorologiques

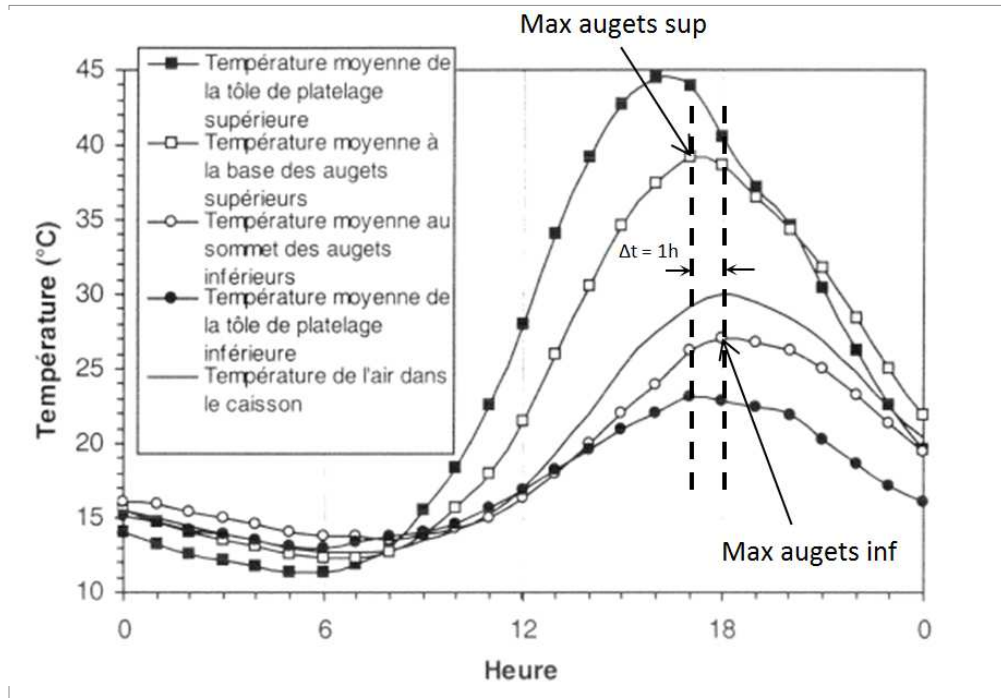
Température atmosphérique et rayonnement solaire (Station Météo-France de Millau-Soulobres/ Station météo du viaduc)

■ Température de surface en journée chaude (20/08/2011)



- Même allure que la température atmosphérique (refroidissement puis réchauffement).
- Ecart de température entre platelage supérieure et platelage inférieure $\sim 10^\circ$ (rayonnement).
- Variation plus rapide en TPC
- Décalage entre le pic de rayonnement solaire et le pic de T° du tablier (5 à 6h).
- Peu de différence Est – Ouest.

■ Température du caisson central en journée chaude (2/07/2011)

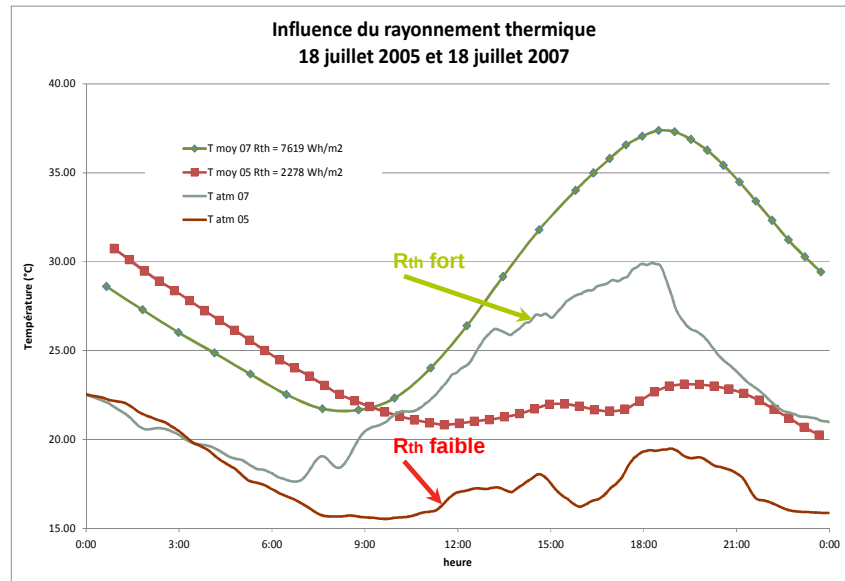


- Même allure que la température atmosphérique (refroidissement puis réchauffement).
- Décalage temporel entre le pic des faces sup. et inf. (~3h30)
- Ecart de température entre platelage supérieure et platelage inférieure ~ 10° (rayonnement).

Comparaison Millau / Normandie

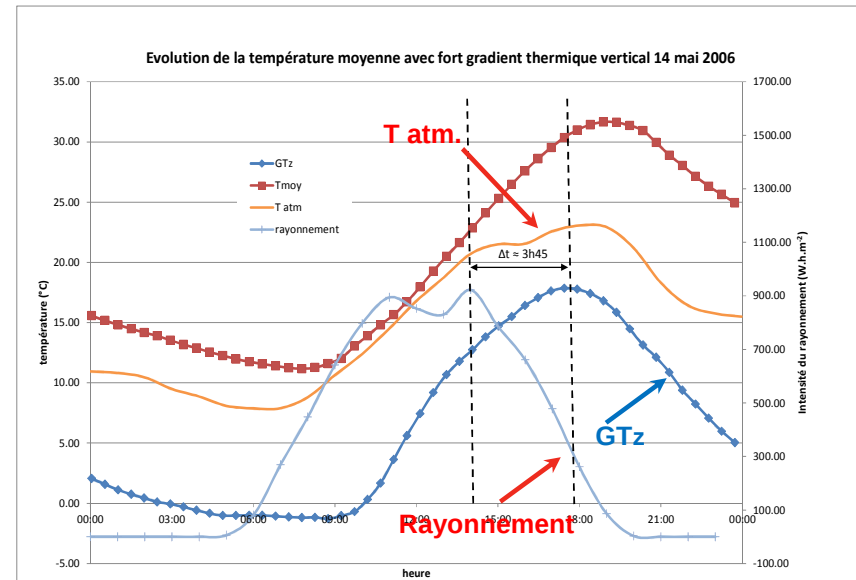
- Allure générale des courbes identique
- Décalage temporel moins marqué dans le cas de Normandie

■ Température moyenne et gradient thermique



Température moyenne

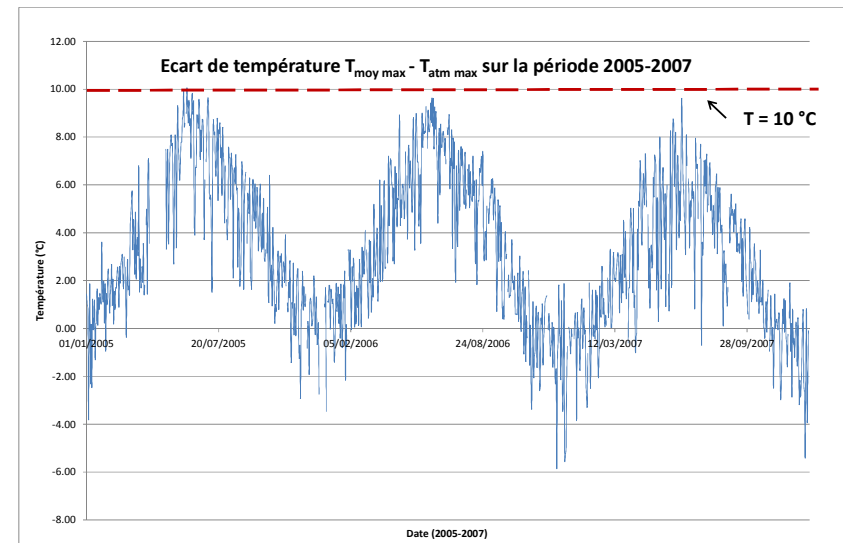
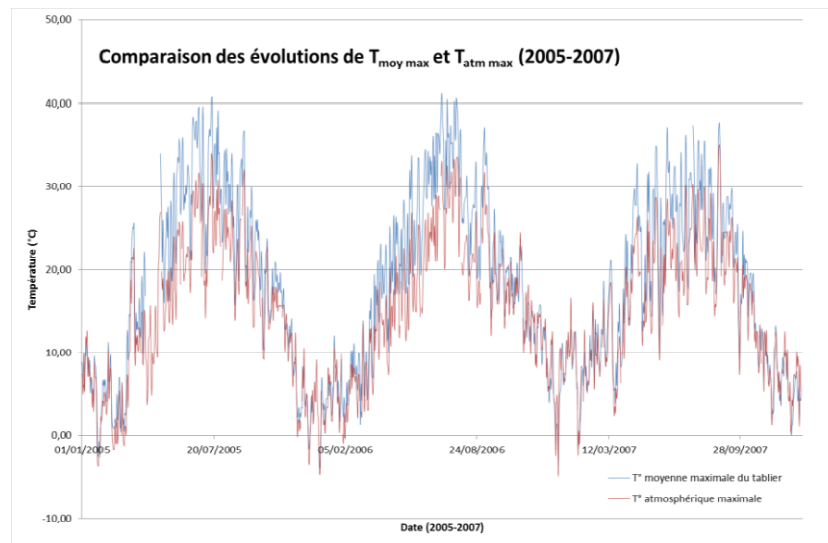
- Température caisson > T_{atm}.
- Forte influence du rayonnement solaire



Gradient vertical

- Fortement lié au rayonnement solaire
- Gradient maxi. 3 à 5h après le pic de rayonnement solaire

Valeurs maximales journalières



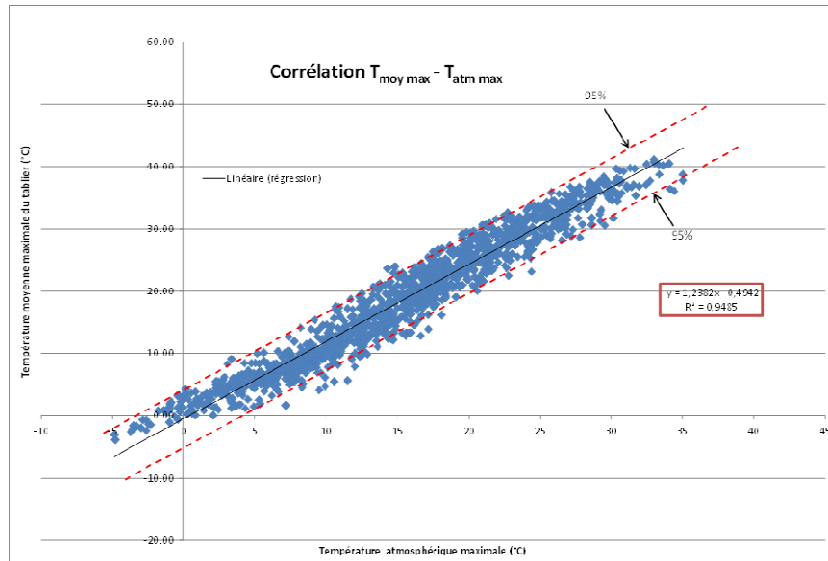
Mesures :

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

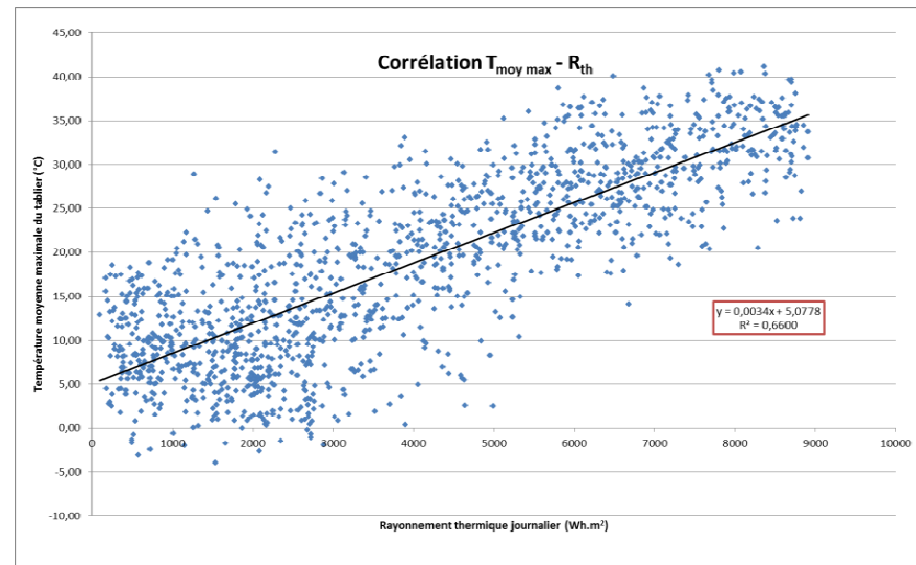
Hypothèses actions thermiques :

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

■ Corrélation $\text{Max}(T_{\text{tab}})$ et $\text{Max}(T_{\text{atm}})$



■ Corrélation $\text{Max}(T_{\text{tab}})$ et Rayonnement



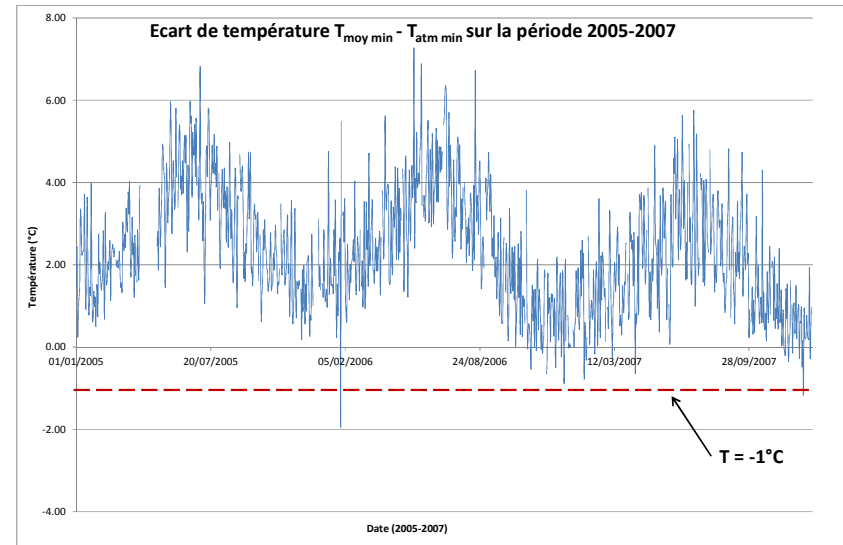
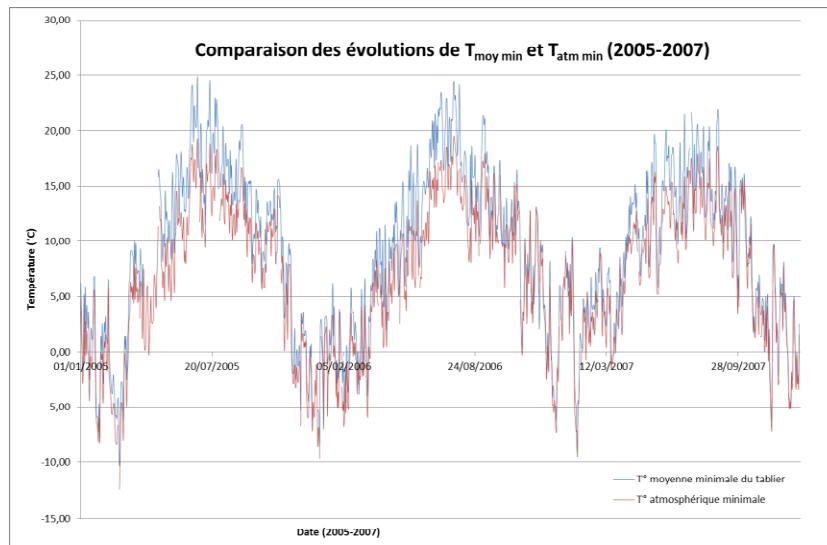
Millau :

$$T_{\text{moy,max}} = 1,03T_{\text{atm,max}} + 0,00093R_{\text{th}} - 1,01$$

Normandie :

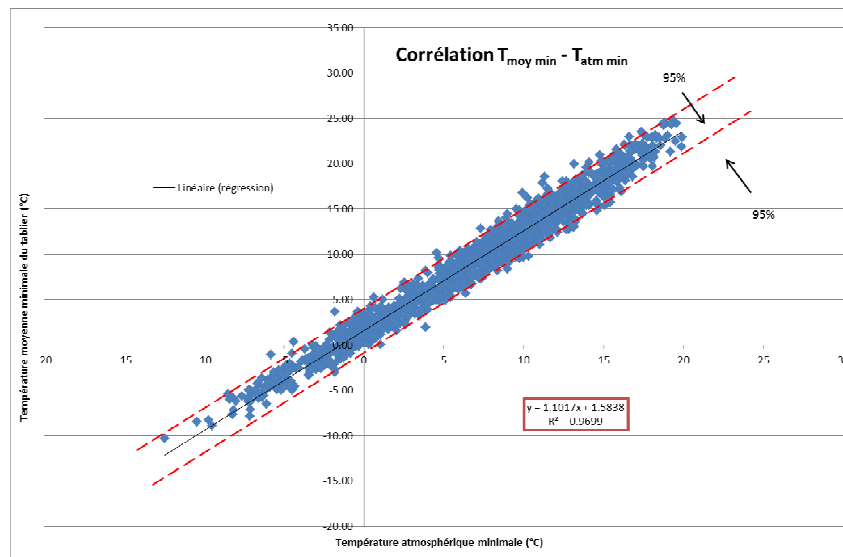
$$T_{\text{moy,max}} = T_{\text{atm,max}} + 0,0017R_{\text{th}}$$

Valeurs minimales journalières

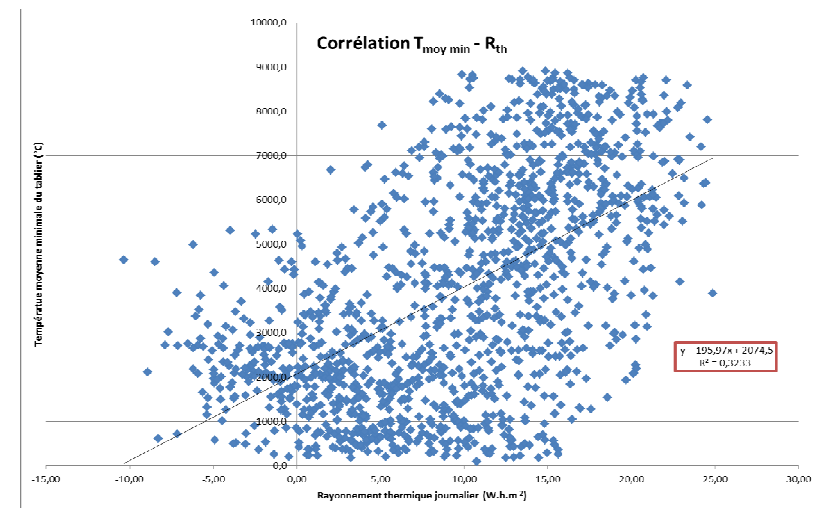


$$\text{Min}(T_{moy}) = \text{Min}(T_{atm}) - 1^{\circ}\text{C}$$

■ Corrélation Min(T tab) et Min(Tatm)



■ Corrélation Min(T tab) et Rayonnement



$$T_{\text{moy}} = 1.1T_{\text{atm}} + 1.6^{\circ}\text{C}$$

COMPARAISON MESURES - HYPOTHESES DE CALCUL

■ Valeurs extrêmes annuelles

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

- La note d'hypothèses dégage une **marge d'environ 4°C** par rapport aux valeurs maximales observées entre 2005 et 2011.
- Les prescriptions de l'Eurocode sont largement enveloppes et très pessimistes.

COMPARAISON MESURES - HYPOTHESES DE CALCUL

■ Valeurs extrêmes annuelles

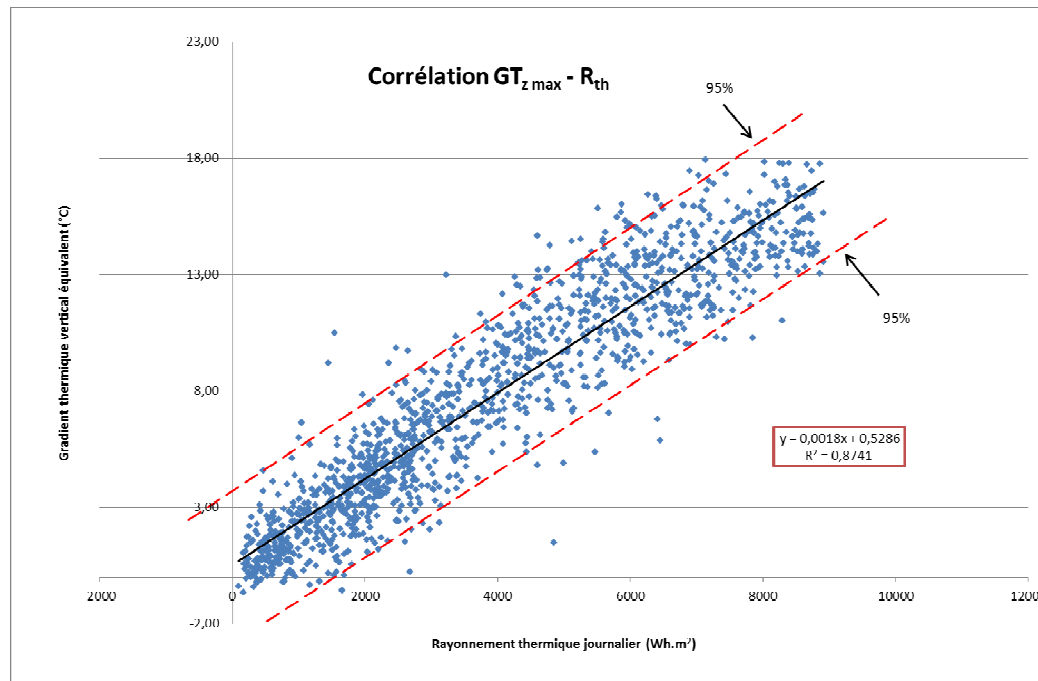
ΔT_{min}	$T_{atm\ min}$ (1)	$(T_{moy\ min} - T_{atm\ min})$ (2)	$T_{moy\ min}$ (3) = (1)+(2)	$(T_{atm\ min} - T_{réf})$ (4)	$(T_{moy\ min} - T_{réf})$ (5) = (2)+(4)
CCTP ($T_{réf} = 10^{\circ}C$)	-30	-	- 30	- 40	- 40
Note d'hypothèses ($T_{réf} = 10^{\circ}C$)	-17.5	0	-17.5	- 27.5	-27.5
Note d'hypothèses ($T_{réf} = 13^{\circ}C$)	- 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

- La note d'hypothèses dégage une **marge d'environ 4° C** par rapport aux valeurs minimales observées entre 2005 et 2011.
- Les prescriptions de l'Eurocode sont largement enveloppes et très pessimistes.

■ Gradient vertical

- Corrélation avec le rayonnement solaire

- GTz maximal

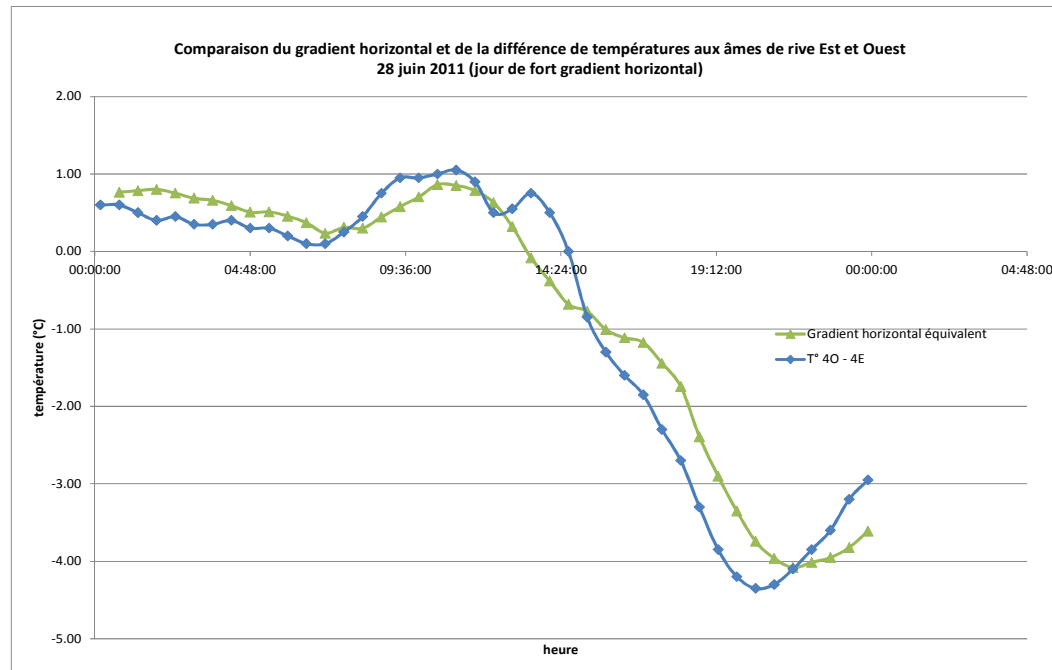


	Gradient vertical
CCTP	12°C
Note d'hypothèses	25°C
Mesures	18°C
Eurocode	18°C

Millau : $Max(GT_z) = 0.002R_{th}$

Normandie : $Max(GT_z) = 0.003R_{th}$

■ Gradient horizontal



	Gradient horizontal
CCTP	Négligé
Note d'hypothèses	Négligé
Mesures	4.6°C
Eurocode	5°C

Millau : $GTy = 4,6^{\circ} \text{ C}$

Normandie : $GTy \sim 5^{\circ} \text{ C}$

■ Concomitance $\text{Max}(T_{\text{tab}})$ et $\text{Max}(GT_z)$

■ **Millau :**

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

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

■ **Normandie :**

$$\text{Max}(\Delta T_{\text{moy}}) + 0.80 \text{Max}(GT_z)$$

$$0.80 \text{Max}(\Delta T_{\text{moy}}) + \text{Max}(GT_z)$$

✓ *Millau et Normandie : coefficients d'accompagnement ~ identiques*

■ **EC 1 :**

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

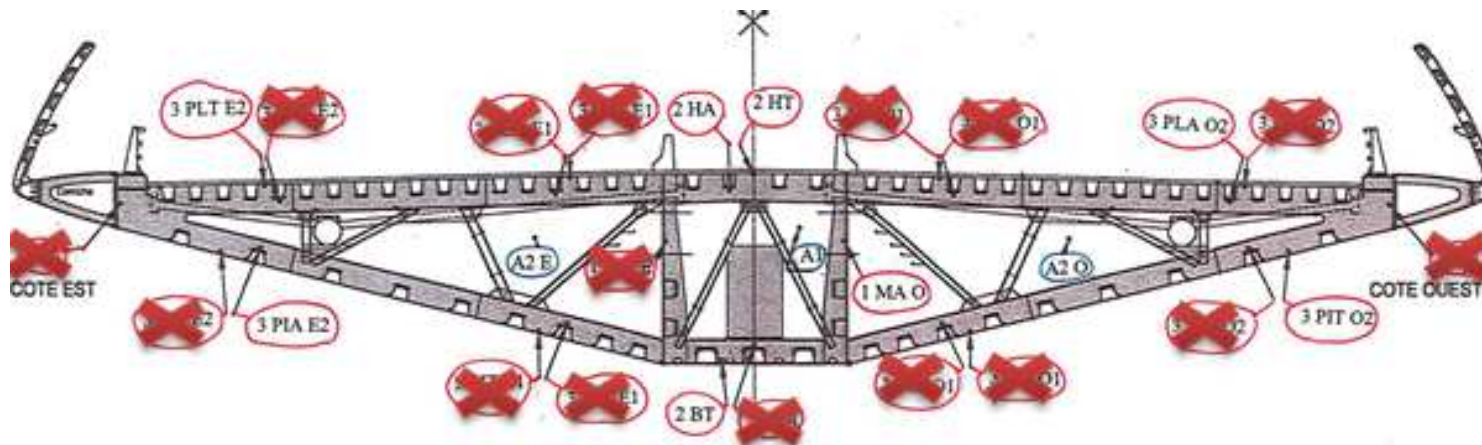
$$0.35 \text{Max}(\Delta T_{\text{moy}}) + \text{Max}(GT_z)$$

✓ *EC1 non sécuritaire*

■ **L'exploitation et les analyses menées sur 7 ans d'enregistrements ont permis :**

- 1) de connaître avec précision le comportement thermique du tablier** (Valeurs extrêmes de la température moyenne du caisson, valeurs des gradients thermiques vertical et transversal, concomitance T et GT)
- 2) de déterminer la corrélation de ces grandeurs avec les données météorologiques** (Température ambiante et rayonnement solaire).
- 3) de confirmer les hypothèses sur les actions thermiques établies par M. VIRLOGEUX et qui ont servi à la justification de l'ouvrage,**

- **Suivi allégé : Décision de réduire le nombre de capteurs (8 conservés sur les 27), d'où moins de données à enregistrer et à traiter.**
- Sélection des capteurs conservés faite de manière à conserver une précision suffisante sur les valeurs de températures caractéristiques.



MERCI POUR VOTRE ATTENTION