

50376
1991
70

N° d'ordre 695

50376
1991
70

THESE DE DOCTORAT 65459

Présentée à

L'Université des Sciences et Techniques de Lille-Flandres-Artois

Spécialité
GENIE CIVIL

ANALYSE DES ACTIONS THERMIQUES SUR LES OUVRAGES D'ART EN BETON



Par
Ammar HADJEB

Soutenu le 15 février 1991 devant le jury composé de :

MM. ABDUNUR C.
DUTHOIT B.
MICHEAU P.
SHAHROUR I.
TONNOIR B.

LCPC PARIS
Université Lille I
Université Lille I
Université Lille I
LRPC LILLE

Rapporteur
Rapporteur
Président
Examinateur
Examinateur

AVANT-PROPOS

Le présent travail a été mené au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Lille en collaboration avec l'Université des Sciences et Techniques de Lille.

Ce travail a été réalisé dans la section Ouvrages d'Art sous la responsabilité de Monsieur TONNOIR qui m'a guidé et conseillé avec grande compétence ; qu'il me soit permis de lui exprimer ma reconnaissance et ma gratitude.

Mes remerciements vont à Monsieur SHAHROUR qui a assuré la direction de cette thèse avec une grande disponibilité.

Je tiens également à remercier :

- Monsieur MICHEAU qui m'a fait un grand honneur d'examiner ce travail et en assurant la présidence du jury
- Messieurs ABDUNUR et DUTHOIT, rapporteurs de cette thèse
- Madame VANDERBEKE pour sa disponibilité et les soins apportés à la dactylographie de ce travail
- Tous les collègues et amis qui m'ont aidé au cours de ce travail.

MOTIVATION DE L'ETUDE

C'est la circulaire du 8 octobre 1983 qui précise la valeur caractéristique de la différence de température à prendre en compte pour le calcul, sous gradient thermique, des ponts hyperstatiques en béton précontraint : elle est de $\theta = 12^{\circ}\text{C}$ entre les fibres extrêmes du tablier.

On considère que la variation de la température est linéaire sur la hauteur du tablier et que l'extrados est plus chaud que l'intrados.

On remarque que ces règles ne tiennent pas compte :

- . du site d'implantation
- . du type de la section transversale du tablier
- . de la qualité des matériaux dont est constitué l'ouvrage.

Le but de l'étude est de déboucher sur des prescriptions de calcul plus réalistes, en s'appuyant sur les résultats obtenus sur des ouvrages réels, de sections transversales et de situations différentes :

On imagine en effet facilement que le régime thermique dans un pont dalle au bord de la mer peut être fort différent de celui concernant un pont caisson alpin.

L'étude ne se limite pas aux gradients thermiques, elle est plus ambitieuse : elle se propose de faire le point sur tous les effets thermiques, y compris :

- . les dilatations moyennes,
 - . les contraintes internes,
- effets qui étaient soit négligés, soit grossièrement estimés auparavant.

Néanmoins, l'objectif est de déboucher sur des calculs relativement simples.

Aussi, une méthode du type "éléments finis", même si elle peut résoudre les problèmes les plus complexes ne saurait être imposée systématiquement au Bureau d'Etudes pour ses calculs de vérification.

Nous nous sommes donc orientés vers la recherche de champs de température simplifiés rendant compte, cependant, des effets réels.

TABLE DES MATIERES

1. <u>INTRODUCTION</u>	1
2. <u>ETAT DES CONNAISSANCES ET TRAVAUX ANTERIEURS</u>	
2.1. <u>Comportement thermique d'un tablier de pont</u>	2
2.2. <u>Principaux paramètres influençant la réponse thermique d'un pont</u>	4
2.2.1. <i>Rayonnement solaire</i>	4
2.2.2. <i>Température ambiante</i>	4
2.2.3. <i>Vitesse du vent</i>	5
2.2.4. <i>Epaisseur et couleur du revêtement</i>	5
2.3. <u>Déformations thermiques et contraintes thermiques</u>	7
2.3.1. <i>Contraintes thermiques dans une poutre isostatique</i>	
2.3.2. <i>Contraintes thermiques dans une poutre continue</i>	11
2.4. <u>Gradient thermique efficace et température moyenne</u>	12
3. <u>EXPERIMENTATION IN-SITU</u>	
3.1. <u>Ouvrages instrumentés</u>	14
3.1.1. <i>Viaduc Jules Verne</i>	14
3.1.1.1. <i>Instrumentation du caisson</i>	15
3.1.2. <i>Pont de Beaumont sur Oise</i>	16
3.1.2.1. <i>Instrumentation du caisson</i>	17
3.1.3. <i>Ouvrage n° 6 à Calais</i>	17
3.1.3.1. <i>Instrumentation du tablier</i>	18
3.1.4. <i>PS 32</i>	18
3.1.4.1. <i>Instrumentation de la dalle</i>	19

3.2.	<u>Caractéristiques des capteurs et des sondes</u>	19
3.2.1.	<i>Capteurs de déformation</i>	19
3.2.2.	<i>Solarimètre</i>	20
3.2.3.	<i>Sondes de température</i>	
3.3.	<u>Méthodes d'instrumentation</u>	21
3.3.1.	<i>Mode opératoire</i>	21
1)	<i>Ouvrage en phase de construction</i>	22
2)	<i>Ouvrages existants</i>	22
3.4.	<u>Acquisition des mesures</u>	23
3.4.1.	<i>Description de la centrale de mesures</i>	23
3.4.2.	<i>Récupération des données</i>	24
3.4.3.	<i>Exploitation des mesures</i>	24
3.5.	<u>Résultats obtenus</u>	24
3.5.1.	<i>Viaduc Jules Verne</i>	24
3.5.1.1.	<i>Coefficient de dilatation du béton</i>	25
3.5.1.2.	<i>Distribution des températures</i>	
3.5.2.	<i>Pont de Beaumont sur Oise</i>	26
3.5.3.	<i>Ouvrage n° 6 à Calais</i>	27
3.5.4.	<i>PS 32</i>	29
3.6.	<u>Evolution des paramètres</u>	31
3.6.1.	<i>Gradients thermiques</i>	31
3.6.2.	<i>Gradients maximaux et ensoleillement</i>	31
3.6.3.	<i>Températures moyennes ouvrages - Températures moyennes extérieures</i>	31
3.6.4.	<i>Températures maximales ouvrages - Températures maximales extérieures</i>	35
3.6.5.	<i>Températures moyennes maximales et minimales de l'ouvrage</i>	35
3.6.6.	<i>Gradients thermiques maximaux et températures jours - températures nuits</i>	
3.7.	<u>Comparaison des mesures sur les différents ouvrages</u>	42
3.7.1.	<i>Gradients maximaux</i>	42
3.7.2.	<i>Gradients minimaux</i>	42
3.7.3.	<i>Températures moyennes extérieures</i>	44
3.7.4.	<i>Températures moyennes de l'ouvrage</i>	44
3.7.5.	<i>Températures moyennes maximales sur ouvrage</i>	44
3.7.6.	<i>Températures moyennes minimales sur ouvrage</i>	44
3.7.7.	<i>Différence entre température moyenne du jour et température moyenne de la nuit</i>	44
3.7.8.	<i>Températures maximales relevées à la station météo de Lille-Lesquin</i>	47
3.7.9.	<i>Evolution des gradients au cours de la journée</i>	49

3.8.	<u>Evolution des températures moyennes dans l'ouvrage au cours de la journée du 17/07/90</u>	50
3.9.	<u>Etudes annexes</u>	50
. <u>MODELISATION PAR LA METHODE DES DIFFERENCES FINIES</u>		
4.1.	<u>Diffusion de la chaleur</u>	52
4.1.1.	<i>Echanges de chaleur</i>	52
4.1.2.	<i>Bilan solaire à la surface d'un pont</i>	52
4.1.2.1.	<i>Chaleur reçue par rayonnement solaire</i>	53
4.1.2.2.	<i>Chaleur perdue par convection</i>	53
4.1.2.3.	<i>Chaleur perdue par rayonnement de l'ouvrage</i>	55
4.2.	<u>Résolution par la méthode des différences finies</u>	55
4.2.1.	<i>Caractéristiques des matériaux</i>	55
4.2.1.1.	<i>Dalle béton</i>	55
4.2.1.2.	<i>Enrobé</i>	56
4.2.1.3.	<i>Asphalte</i>	56
4.2.2.	<i>Calcul des températures dans le hourdis</i>	56
4.2.2.1.	<i>Application au hourdis supérieur du pont de Beaumont</i>	57
4.3.	<u>Comparaison des résultats</u>	59
4.4.	<u>Application du modèle à l'étude des effets de quelques paramètres</u>	
5.	<u>PROPOSITION D'UN PROFIL DE TEMPERATURE TYPE</u>	
5.1.	<u>Profil de température type</u>	64
5.1.1.	<i>Ponts-dalles</i>	64
5.1.2.	<i>Ponts à hourdis</i>	64
5.1.2.1.	<i>Evaluation des paramètres h1 et h2</i>	65
5.2.	<u>Echelle du profil de température</u>	65
5.2.1.	<i>Ponts-dalles</i>	65
5.2.2.	<i>Ponts à hourdis</i>	65
5.3.	<u>Calcul des effets thermiques - Module de déformation</u>	71
5.3.1.	<i>Béton non traditionnel</i>	71
5.3.2.	<i>Gradient installé - Gradient journalier</i>	71
<u>CONCLUSION</u>		
<u>ANNEXES</u>		
		80
<u>BIBLIOGRAPHIES</u>		

1. INTRODUCTION

En dehors de toute sollicitation extérieure, trois causes interviennent dans l'évolution des déformations d'un pont en béton précontraint : le retrait, le fluage et les variations de la température du béton, qu'elles soient saisonnières ou journalières du fait de l'ensoleillement.

A long terme les élongations de retrait et de fluage évoluent très lentement. A l'échelle de la journée, elles sont totalement masquées par les déformations thermiques dont l'amplitude des variations est bien plus importante.

Les variations de la température constituent l'une des causes pouvant entraîner des désordres sur un pont. En effet, les changements de température diurne ou saisonnier provoquent des déformations qui peuvent engendrer des contraintes si elles sont gênées.

Le pont échange aussi sans cesse de la chaleur avec le milieu environnant à travers sa surface extérieure. Ces échanges ne se faisant pas de la même façon et avec la même intensité sur les différentes parties de sa surface, conduisent à une distribution non uniforme des températures. On peut ainsi avoir un gradient de température assez considérable dans le sens vertical dans une section et qui peut même être variable d'une section à l'autre. Ce gradient crée des contraintes internes et des moments de flexion et l'ouvrage se courbe. De plus, si le pont repose sur plusieurs appuis, l'hyperstaticité de l'ouvrage, en gênant sa libre déformation peut induire des moments de flexion aussi importants que ceux dus aux surcharges routières.

Ces effets des gradients thermiques, peuvent avoir des conséquences néfastes sur le fonctionnement et la longévité des ponts. Ils peuvent être très préjudiciables lorsque l'ouvrage est en phase de construction. En effet, l'ouvrage n'étant que partiellement construit et n'ayant pas encore un revêtement sur sa surface supérieure, il peut subir un gradient thermique important.

Les contraintes dues à une distribution non linéaire des températures peuvent avoir des valeurs locales inadmissibles lorsqu'elles se superposent avec celles dues aux autres charges.

Les normes actuelles de dimensionnement abordent peu ces problèmes. Les règlements de calculs français, qui supposent une répartition linéaire des températures, ne tiennent pas compte des contraintes engendrées par la non linéarité du profil réel des températures. Cette méthode de calcul sous-estime donc, l'effet des gradients thermiques.

ETAT DES CONNAISSANCES ET TRAVAUX ANTERIEURS

Les phénomènes liés aux gradients thermiques sont connus depuis longtemps et les effets de ces gradients sur les ponts ont été étudiés par plusieurs auteurs, nationaux et étrangers.

En France, le LCPC, à travers le réseau des laboratoires régionaux, s'est attaché à étudier le comportement thermique des ponts par l'instrumentation de plusieurs ouvrages répartis sur le territoire national.

Dans ce chapitre, nous allons décrire les principaux paramètres qui influent sur la réponse thermique d'un pont en béton et donner quelques résultats obtenus par les auteurs étrangers.

Nous allons montrer, également, l'existence et la grandeur des contraintes dues aux déformations gênées du fait de la non linéarité des profils de température.

C'est à la fin du chapitre que nous définissons le gradient thermique efficace.

2.1. Comportement thermique d'un tablier de pont

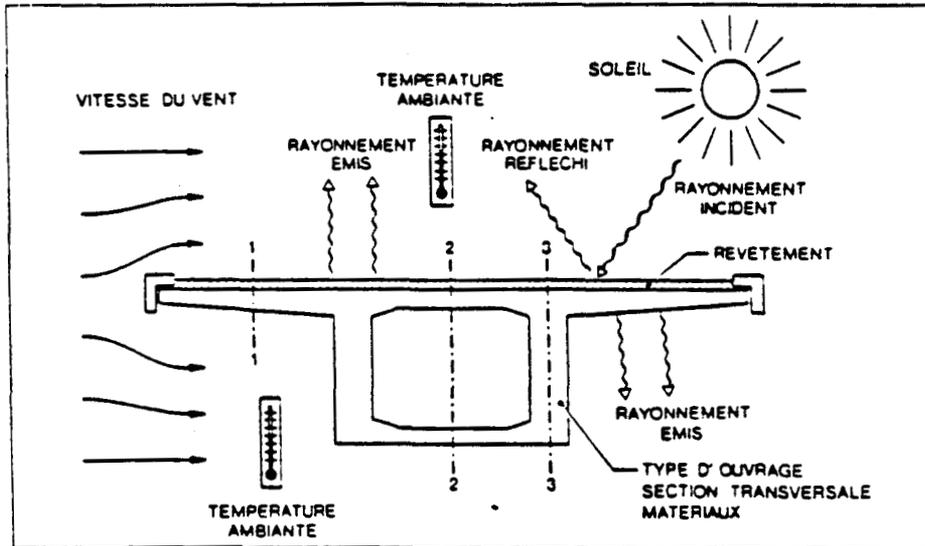


fig. : 2.1 a

PRINCIPAUX PARAMETRES INFLUENÇANT LA REPONSE THERMIQUE
D'UN TABLIER DE PONT

Les variations de température observées sur les ouvrages en service sont principalement dues aux variations saisonnières et journalières de l'intensité du rayonnement solaire.

Le comportement thermique d'un tablier de pont est un phénomène transitoire très complexe qui peut être décrit au moyen des équations différentielles de transfert de chaleur (équations de Fourier). Les principaux paramètres influençant la réponse thermique d'un tablier de pont sont (fig : 2.1a) :

- Intensité du rayonnement solaire
- Température ambiante et sa variation journalière
- Vitesse moyenne du vent
- Nature et propriétés des matériaux constituant le pont
- Caractéristiques des surfaces (principalement la couleur et l'épaisseur du revêtement de la dalle)
- Type et forme de la section transversale.

La courbe de distribution des températures dans une section transversale de pont est en général non linéaire. La figure 2.1 b montre une évolution des températures dans l'épaisseur d'une dalle massive située en Grande-Bretagne.

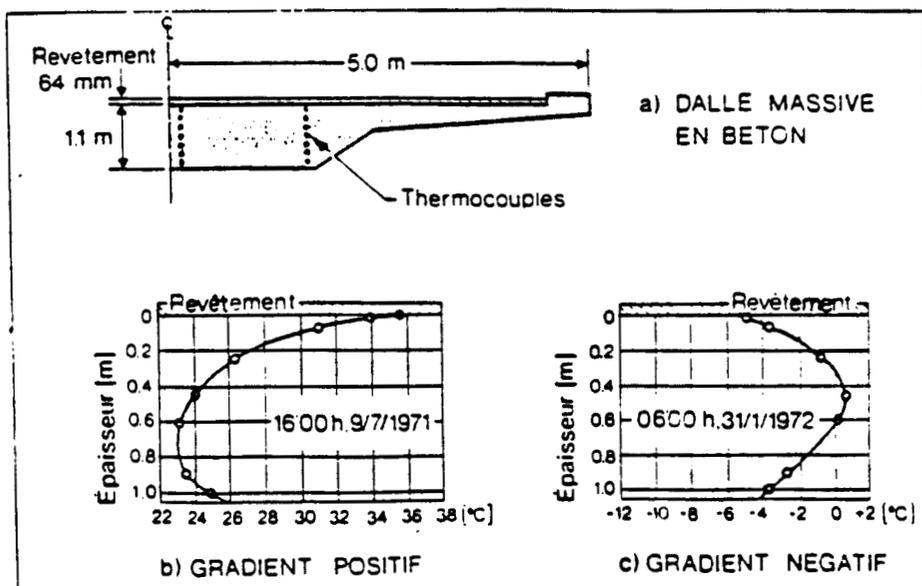
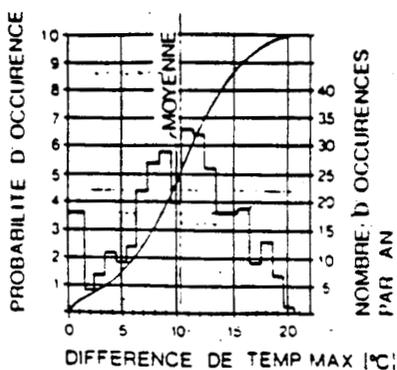


Fig. : 2.1 b - Emerson (1976)

EXEMPLE DE DISTRIBUTION DE TEMPERATURE MESUREE

Lorsque la température à la surface est plus élevée que celle à l'intérieur de la dalle, le gradient thermique est positif. Dans le cas contraire il est négatif. Selon des observations faites par Emerson en Grande-Bretagne (1973, 1976 et 1977) et par Wood, J.H. en Nouvelle Zélande (1979), les plus grands gradients positifs apparaissent en début d'après-midi, un jour d'été, lorsque le rayonnement solaire et la variation journalière de température ambiante sont élevés et lorsque le vent est inexistant ou modéré.

La probabilité d'occurrence d'un gradient positif maximal est, en moyenne, de 3 à 6 fois par an, durant les mois d'été. Les plus grandes différences de températures inversées apparaissent en hiver, de nuit ou tôt le matin, lorsqu'il fait très froid et qu'il n'y a pas de nuages et de vent. De telles conditions ne sont réunies en moyenne que 3 à 5 fois par an, durant les mois d'hiver.



Résultats statistiques de mesures de gradients de température durant un an sur un pont caisson en Australie (Elizabeth Street Ramp). Revêtement noir de 10 cm d'épaisseur

Etude réalisée par CHURCHWARD, A.J. (1980)

Fig. : 2.1 c

Kehlbeck (1975), Zichner (1976), Emanuel H.H. (1978), Hulsey (1978) et Priestley (1978) ont calculé des distributions de température à partir de l'équation de transfert de chaleur en introduisant des valeurs mesurées des conditions climatiques extrêmes locales. Les valeurs ainsi trouvées sont comparables à celles mesurées sur des ouvrages analogues et paraissent fiables.

Ces études analytiques sont d'un grand intérêt en ce qui concerne l'influence des différents paramètres sur la valeur des gradients de température.

Les différences maximales positives de température observées en Suisse, par Bossart (1970), et en Nouvelle-Zélande, par Wood J.H. (1979), valent + 22°C sur la hauteur du tablier de ponts routes en service, c'est-à-dire avec revêtement. Sans revêtement, Wood J.H. a observé, sur la hauteur du tablier, une différence positive maximale de + 24,6°C.

Selon les observations de longue durée effectuées par Emerson (1977) en Grande Bretagne et par Wood J.H. (1979) en Nouvelle Zélande, des différences positives maximales de l'ordre de + 20°C apparaissent en moyenne 20 à 30 fois par an. Les différences maximales négatives valent - 9°C.

Sur les hourdis supérieurs des caissons, Kehlbeck (1975) et Zichner (1976) ont mesuré des différences de + 12°C. Ils ont également constaté qu'une différence de températures sur les faces opposées d'une âme de poutre de pont pouvait atteindre + 15°C. C'est le cas lorsque l'âme de la poutre est orientée vers le Sud ou vers l'Ouest.

2.2. Principaux paramètres influençant la réponse thermique d'un pont

2.2.1. Rayonnement solaire

Des mesures faites successivement en Allemagne, en Grande Bretagne et en Suisse montrent que l'intensité maximale du rayonnement solaire est de l'ordre de 800 à 900 W/m². Les enregistrements effectués sur plusieurs ouvrages montrent que la variation du gradient thermique est liée à celle de l'intensité du rayonnement solaire.

2.2.2: Température ambiante

Des observations systématiques effectuées en Grande Bretagne (Emerson en 1977) ainsi que des études paramétriques réalisées analytiquement par Zichner (1976) et Priestley (1978) ont de plus montré que la température extérieure de l'air ambiant ainsi que sa variation journalière avaient une incidence relativement modérée sur la valeur des gradients de température (fig. 2.2. b).

2.2.3. Vitesse du vent

L'influence déterminante sur les gradients thermiques de la vitesse moyenne du vent est soulignée par de nombreux auteurs. Le mouvement de l'air au voisinage du pont influence en effet fortement la transmission de chaleur.

Analytiquement, il a été montré, pour un pont en béton, (Priestley 1978) que la valeur du gradient de température diminuait de moitié lorsque la vitesse du vent passe de zéro à une valeur modérée de 4 à 6 m/s (fig. 2.2 a).

La probabilité d'occurrence de températures extérieures extrêmes et simultanément d'un vent nul est très faible. Les études paramétriques de Priestley montrent que les gradients extrêmes, théoriquement possibles sans aucun vent, seraient d'environ 30 % supérieurs aux valeurs maximales usuellement indiquées.

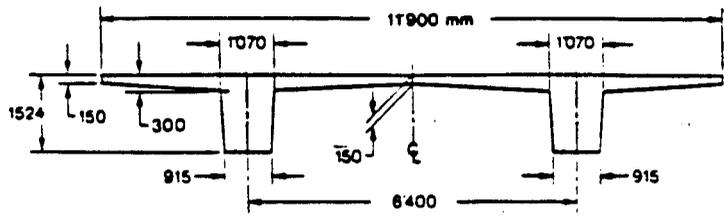
2.2.4. Épaisseur et couleur du revêtement

La couleur et l'épaisseur du revêtement jouent un rôle non négligeable selon les mesures réalisées en Grande Bretagne par Emerson, ainsi que d'après les études paramétriques de Priestley. Notons que la température maximale à la surface du revêtement peut atteindre 70°C dans le cas d'un revêtement hydrocarboné noir et 60°C dans celui d'un revêtement en béton. Le gradient thermique a tendance à baisser pour des épaisseurs croissantes du revêtement (fig. 2.2 c), qui absorbe et conserve une partie de l'énergie thermique et qui, de ce fait, joue un rôle d'isolant pour la structure portante.

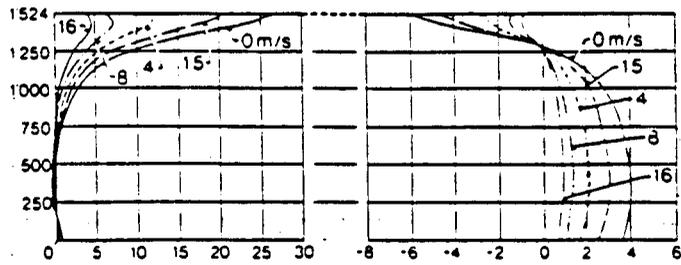
Les valeurs les plus élevées du gradient de température sont celles que l'on peut observer lorsque l'ouvrage ne comporte pas de revêtement.

Pour les ponts en service, avec une épaisseur de revêtement hydrocarboné usuelle comprise entre 50 et 100 mm, les résultats de mesures tendent à démontrer que l'influence de ce paramètre pourrait être négligée en première approximation.

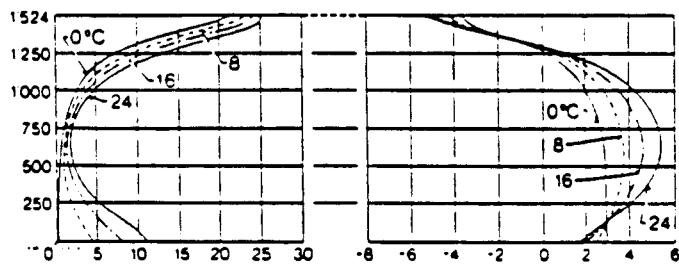
La figure 2.2 d montre l'effet du coefficient d'absorption de la surface sur le gradient thermique.



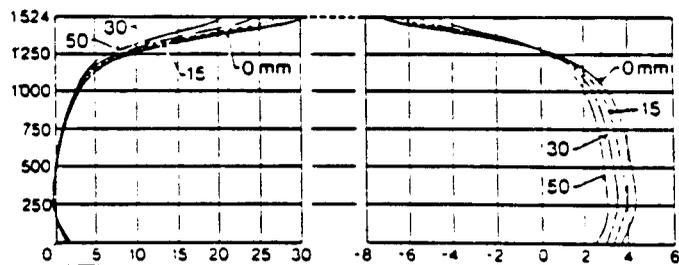
SECTION TRANSVERSALE - PONT EN BETON



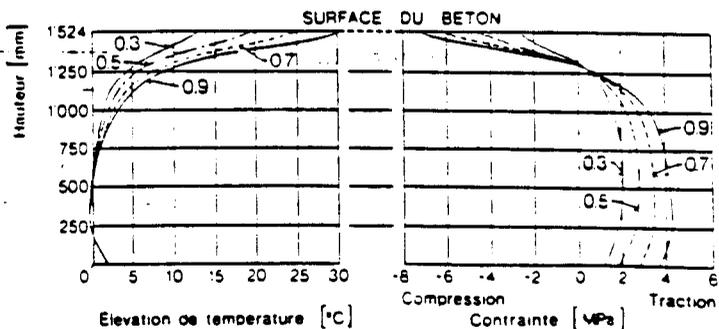
a) INFLUENCE DE LA VITESSE MOYENNE DU VENT



b) INFLUENCE DE LA VARIATION JOURNALIERE DE LA TEMPERATURE AMBIANTE



c) INFLUENCE DE L' EPAISSEUR D' UN REVETEMENT HYDROCARBONE (NOIR)



d) INFLUENCE DU COEFFICIENT D' ABSORPTION (COULEUR) DE LA SURFACE

Fig. : 2.2 _ETUDE PARAMETRIQUE REALISEE PAR PRIESTLEY

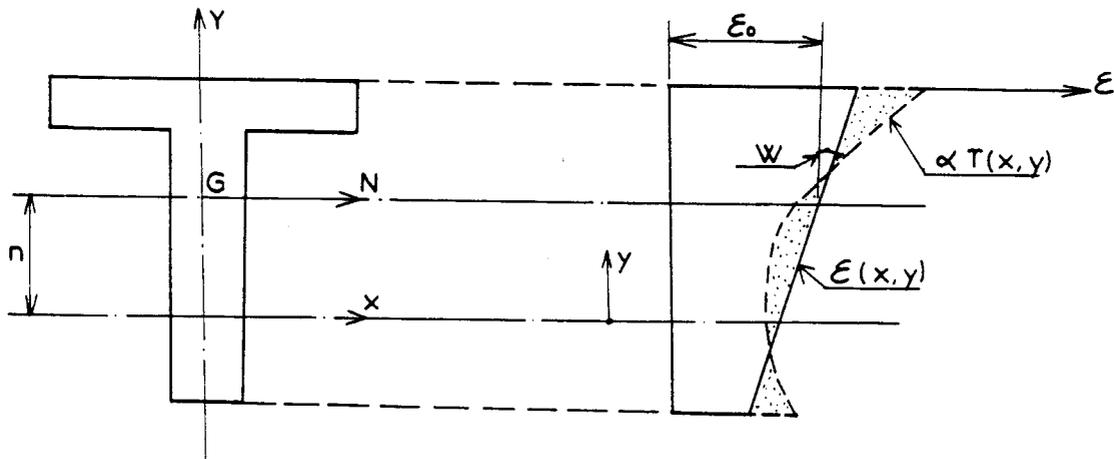
2.3. Déformations thermiques et contraintes thermiques

2.3.1. Contraintes thermiques dans une poutre isostatique

Pour le calcul des contraintes thermiques on admet les hypothèses suivantes :

- Une section plane avant déformation reste plane après déformation (Navier-Bernouilli)
- Proportionnalité des contraintes normales aux déformations instantanées correspondantes
- Superposabilité des contraintes, thermiques et mécaniques.

On considère une poutre isostatique avec une répartition quelconque des températures. La répartition des températures est symétrique par rapport à l'axe vertical de la section transversale et uniforme le long de la poutre qui est à inertie et hauteur constantes (le gradient thermique sur la largeur de l'âme de la poutre est supposé nul).



On considère une répartition $T(x, y)$, y étant mesuré par rapport à un axe de référence quelconque, x étant mesuré par rapport à l'axe vertical de symétrie de la section.

En un point M de la section, s'il pouvait y avoir une déformation libre, la déformation par rapport à un état de référence où la température est nulle.

$$\epsilon_M = \alpha T(x, y) \quad (1)$$

Cependant, l'hypothèse de Navier-Bernouilli impose qu'une section plane demeure plane après déformation. Le profil final de T étant symétrique par rapport à l'axe de symétrie vertical de la section, il y aura seulement une rotation et une translation de la section par rapport à l'axe neutre GN.

On peut donc écrire :

$$\epsilon(x, y) = \epsilon(y) = \epsilon_0 + \omega y \quad (2)$$

La différence entre la déformation libre et la déformation finale provoque une contrainte normale en M :

$$\sigma(y) = E [\epsilon(y) - \alpha T(y)] \quad (3)$$

Lorsque $\epsilon(y) \neq \alpha T(y)$ on aura $\sigma(y) \neq 0$, c'est ce qu'on appelle les contraintes internes.

L'intégration de l'équation (3) donne l'effort normal N :

$$N = E \iint_S (\epsilon(y) - \alpha T(y)) \, ds \quad (4)$$

De même, on obtient un moment par rapport à l'axe neutre :

$$M = E \iint_S (\epsilon(y) - \alpha T(y)) \cdot y \cdot ds \quad (5)$$

Or la poutre est isostatique et n'est pas sollicitée extérieurement. On a alors :

$$N = M = 0$$

On déduit :

$$N = E \iint_S (\epsilon(y) - \alpha T(y)) \, ds = 0$$

Soit :

$$\epsilon_0 = \frac{\alpha}{S} \iint_S T(y) \, ds$$

S est l'aire de la section de la poutre

De même :

$$M = E \iint_S (\epsilon(y) - \alpha T(y)) y ds = 0$$

Soit
$$W = \frac{\alpha}{I} \iint_S T(y) \cdot y \cdot ds$$

I est le moment d'inertie de la section par rapport à l'axe GN

On peut déduire immédiatement que pour :

1) $T(y) = \text{constante}$, on aura :

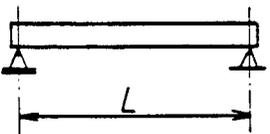
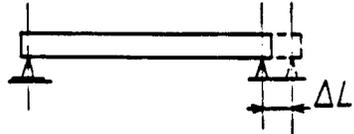
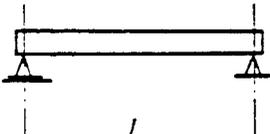
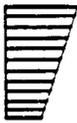
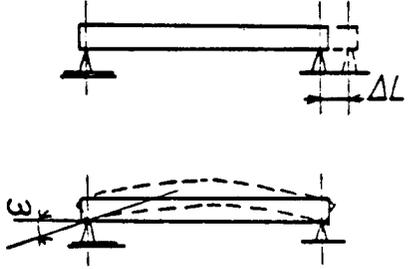
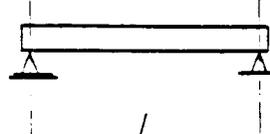
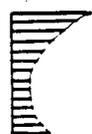
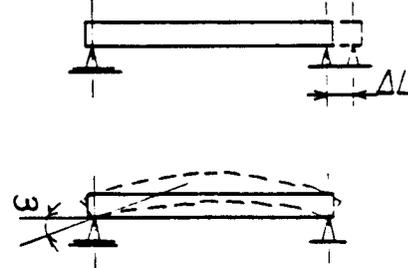
$$w = 0 ; \epsilon_0 = \alpha T(y) = \text{constante} \quad \text{d'après (3)} \quad \sigma(y) = 0$$

2) $T(y) = ay + b$, soit une répartition linéaire. On aura :

$$\begin{aligned} w &= a \alpha = \text{constante} \neq 0 \\ \epsilon_0 &= b \alpha = \text{constante} \\ \sigma(y) &= 0 \end{aligned}$$

Le tableau de la figure 2.3.1 récapitule les différents cas que l'on peut rencontrer.

TABLEAU RECAPITULATIF

STRUCTURE	PROFIL DE TEMPERATURE	EFFETS THERMIQUES	σ
	 <p>$\Delta T = \text{constante}$</p>	 <p>$\Delta L = \text{Dilatation axiale}$</p>	0
	 <p>Répartition Linéaire</p>	 <p>Dilatation linéaire + Courbure</p>	0
	 <p>Répartition Quelconque</p>	 <p>Dilatation linéaire + Courbure + Contraintes internes</p>	$\sigma \neq 0$

2.3.2. Contraintes thermiques dans une poutre continue

Dans le cas d'un pont hyperstatique les travées ne peuvent pas se déformer librement sous l'effet d'un chargement thermique. Si chaque travée était isostatique, elle se déformerait librement. Mais comme le pont est continu, il se produit alors des moments hyperstatiques aux appuis pour que la déformation de l'ensemble de la structure reste compatible.

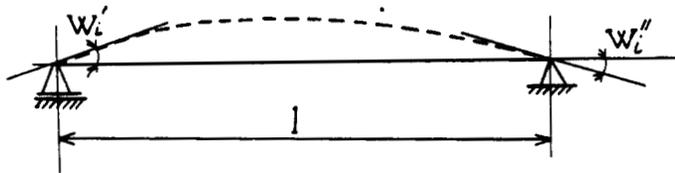


fig. : 2.3.2. TRAVÉE ISOSTATIQUE

La courbure W est constante tout au long de la poutre, dont l'inertie de la section est constante, il est alors aisé de déduire les rotations :

$$W_i' = W_i'' = \frac{Wl}{2}$$

Connaissant les rotations dans chaque travée, on calcule, par l'une des formules usuelles de la résistance des matériaux, les moments hyperstatiques (M^*) sur chaque appui. La contrainte normale due à M^* est :

$$\sigma^* = - \frac{M^*}{I} y$$

En faisant la superposition avec les contraintes isostatiques, on obtient :

$$\epsilon(y) = \epsilon_0 + wy - \frac{M^*}{EI} y$$

et $\sigma(y) = E \epsilon(y)$

2.4. Gradient thermique efficace et température moyenne

La température moyenne dans l'ouvrage est définie par :

$$T_{\text{moy}} = \frac{\epsilon_0}{\alpha}$$

C'est cette température qui conditionne la dilatation générale de l'ouvrage.

Le gradient thermique efficace est défini par :

$$G_{\text{eff}} = \frac{1}{I} \iint_S T(y) \cdot y \, ds \quad (^\circ\text{C}/\text{m})$$

$$\text{soit : } G_{\text{eff}} = \frac{W}{\alpha}$$

Connaissant le gradient thermique efficace, on obtient la différence de température entre les fibres extrêmes de la section en multipliant par la hauteur totale :

$$\Delta\theta = G_{\text{eff}} \cdot H \quad (^\circ\text{C})$$

C'est ce qu'on appelle la distribution linéarisée équivalente (fig. 2.4).

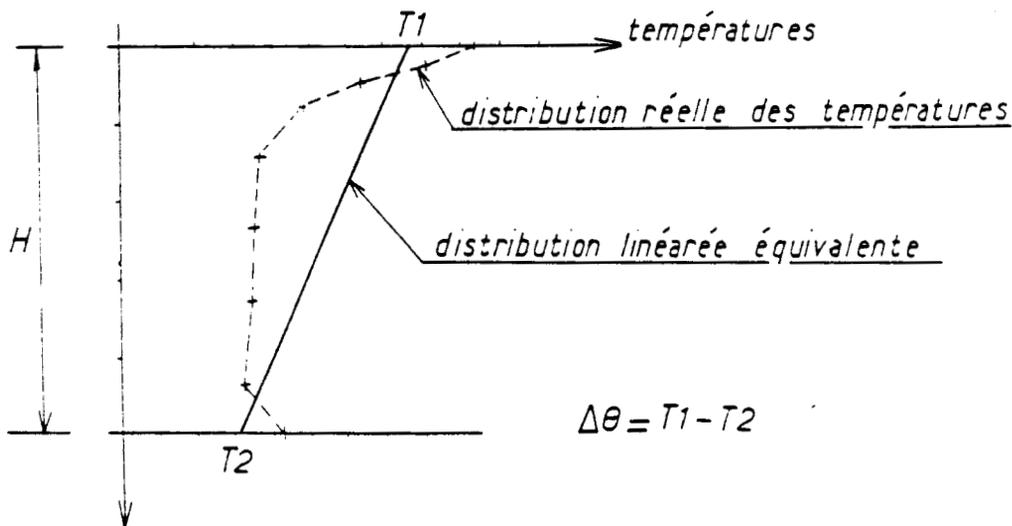


fig. : 2.4 - linéarisation des températures

EXPERIMENTATIONS IN-SITU

Au moins seize ouvrages, instrumentés par le réseau des laboratoires des ponts et chaussées, ont fait l'objet de mesures de températures régulières.

Dans une première phase, l'étude a consisté à rassembler les mesures effectuées sur ces ouvrages afin de constituer une base de données.

Le dépouillement et l'exploitation approfondie des mesures concernant quatre d'entre eux représentent l'essentiel de la seconde phase.

En particulier, nous avons lancé une campagne de mesures systématiques durant l'été 1990. Ces mesures, réalisées sur trois ponts de caractéristiques géométriques différentes, se sont déroulées sans interruption du 30 juin au 24 septembre.

Ce chapitre décrit les quatre ouvrages : leur géométrie, leur instrumentation et le mode d'acquisition des mesures. Il présente, également, les résultats dépouillés des enregistrements.

3.1. Ouvrages instrumentés

Le nombre d'ouvrages instrumentés en sondes de température s'élève à 16. On distingue :

- . 2 ponts à poutres
- . 4 ponts dalle
- . 8 ponts caisson
- . 2 ponts mixtes.

Suivant leur implantation géographique, les mesures sont effectuées par les laboratoires régionaux de :

- . Angers
- . Bordeaux
- . Clermont Ferrand
- . Lille
- . Nancy.

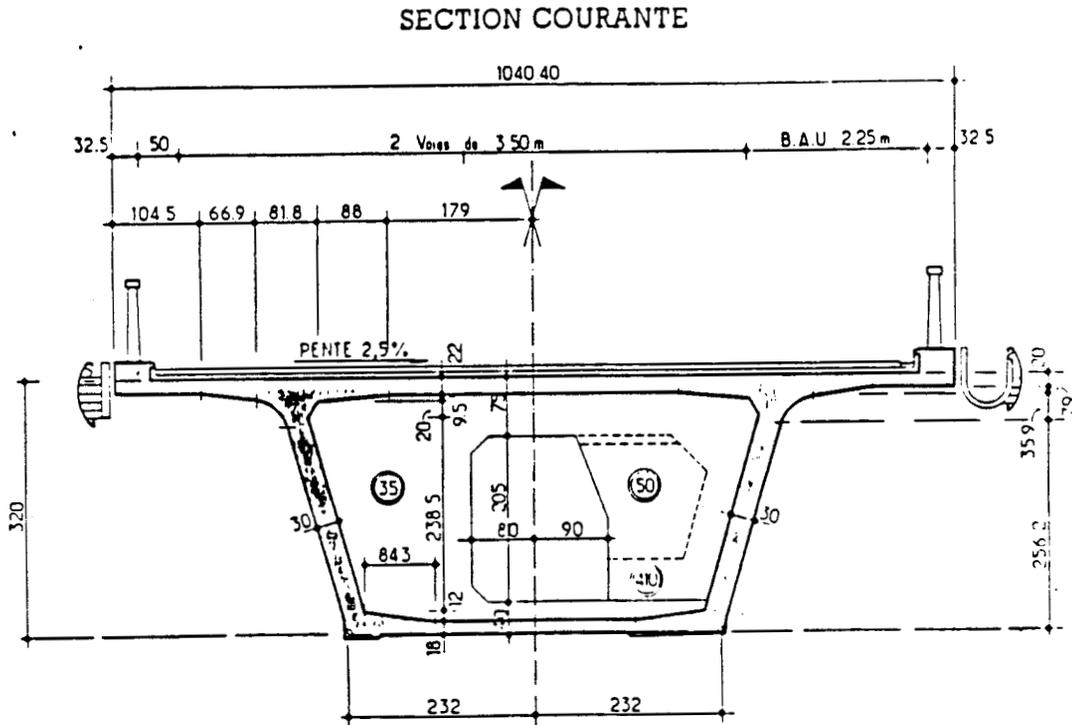
Les ouvrages suivis régulièrement par le Laboratoire Régional de Lille sont au nombre de 4 :

- le viaduc Jules Verne à Amiens
- le pont de Beaumont sur Oise
- ouvrage n° 6 à Calais
- le PS 32 à Saint Amand.

3.1.1. Viaduc Jules Verne

C'est un pont en béton à précontrainte totalement extérieure. Il est réalisé par poussage. Pour une longueur totale de 943,10 m, il comprend 17 travées de 50,50 m et 2 travées, extrêmes, de 41,50 m.

Son tracé est rectiligne avec une pente longitudinale de 0,6 % et un devers constant de 2,5 %. La figure 3.1.1a montre une coupe effectuée dans la section courante du tablier.



3.1.1.1. Instrumentation du caisson

L'instrumentation comprend :

- 14 capteurs de déformation par cordes vibrantes disposés longitudinalement et répartis dans la section suivant le schéma représenté par la figure 3.1.1b
- 4 rosettes de déformation constituées de 3 cordes vibrantes chacune
- 25 sondes de température dont 18 sont associées aux capteurs de déformation afin de corriger la déformation due à la variation de la température.

IMPLANTATION DES CAPTEURS DANS LA SECTION

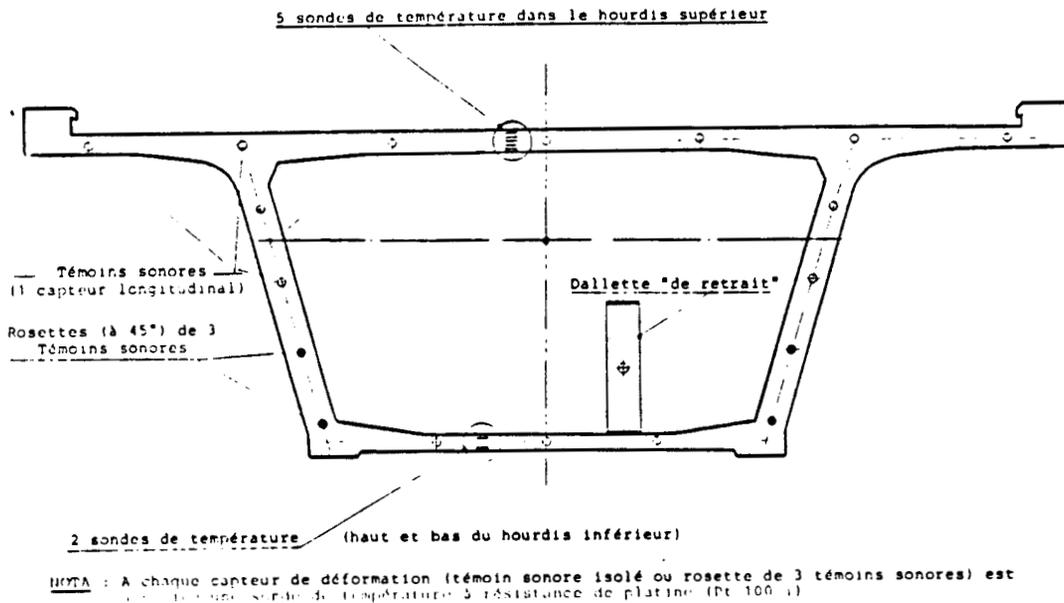


fig. : 3.1.1b

3.1.2. Pont de Beaumont sur Oise

Le pont est constitué de 3 travées qui ont respectivement, 30 m, 120 m et 30 m. Les 2 travées de rives, à inertie variable, sont réalisées en béton traditionnel. La travée centrale, également à inertie variable, est réalisée en béton de granulats légers. Le pont, à précontrainte totalement extérieure, est rectiligne. La figure 3.1.2a représente une coupe transversale à la clef de la travée centrale : c'est à cet endroit que se trouve la section instrumentée.

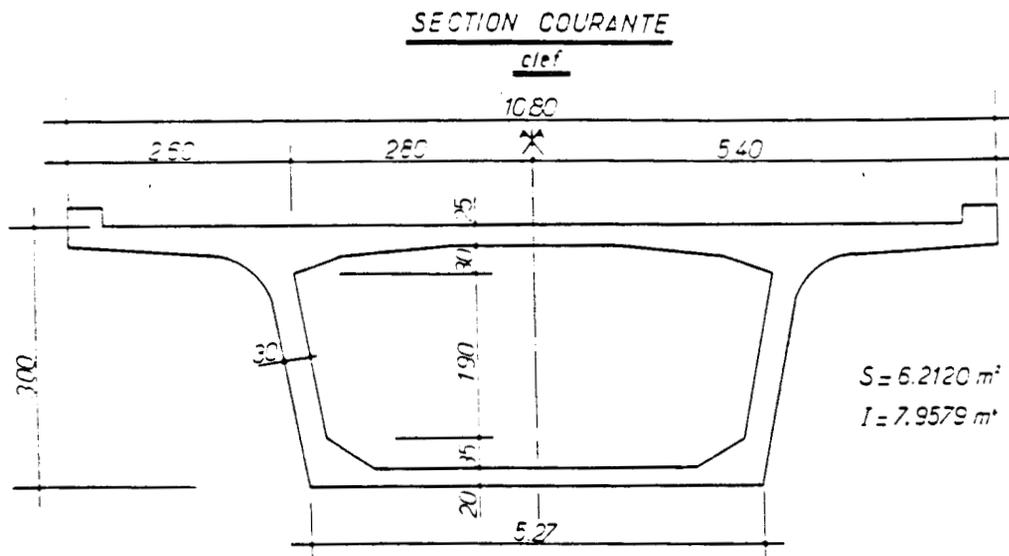


fig. : 3.1.2a

SECTION TRANSVERSALE DU CAISSON

.../...

3.1.2.1. Instrumentation du caisson

L'instrumentation comprend :

- 13 capteurs de déformation par cordes vibrantes disposés longitudinalement et répartis dans la section transversale suivant le schéma indiqué par la figure 3.1.2b
- 20 sondes de température dont 13 sont associées aux capteurs de déformation.

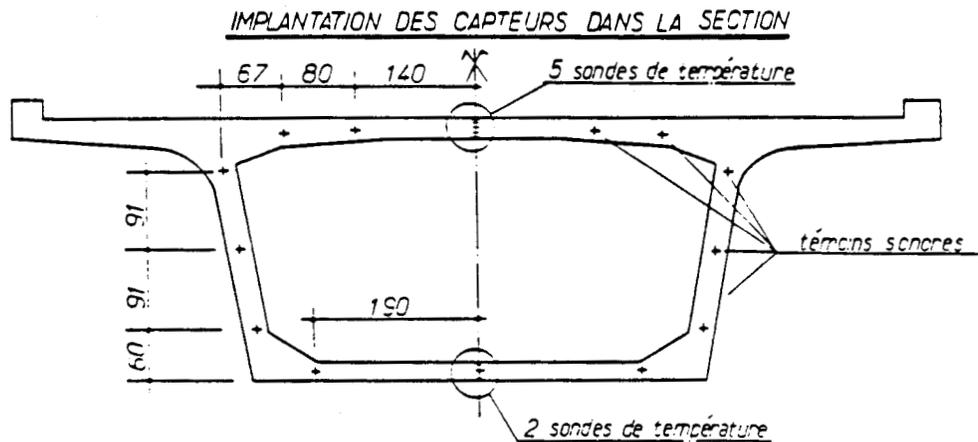


fig. : 3.1.2b

3.1.3. Ouvrage n° 6 à Calais

Ce pont, réalisé en béton de granulats légers, est constitué de 5 poutres en T reliées par un hourdis de 22 cm d'épaisseur. Le pont est isostatique et il présente, en plan, un léger biais. La figure 3.1.3a représente une coupe transversale effectuée sur une des poutres.

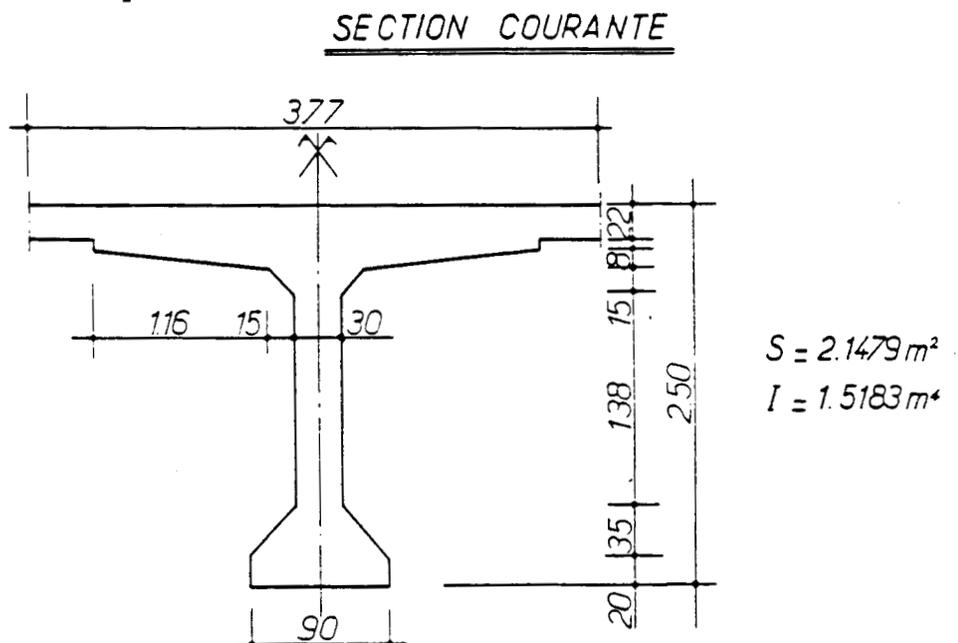


fig. : 3.1.3a

SECTION TRANSVERSALE DE LA POUTRE

.../...

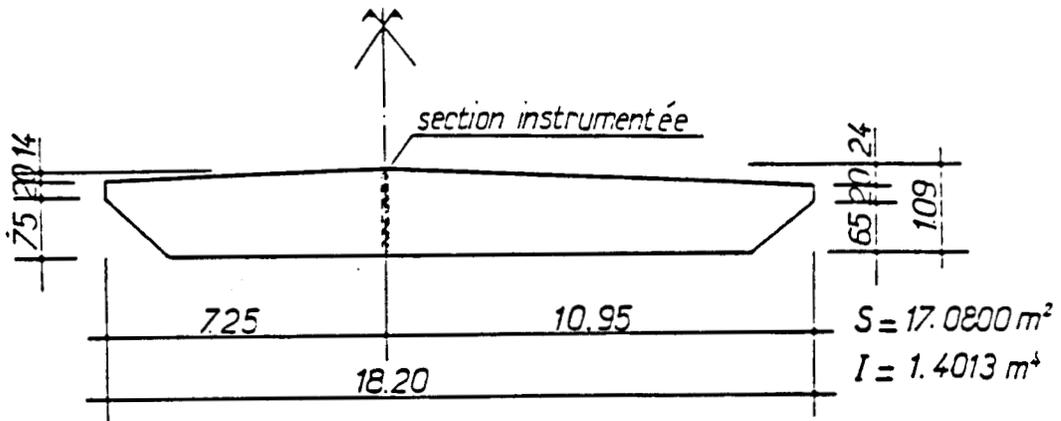


fig. : 3.1.4a
SECTION TRANSVERSALE DE LA DALLE

3.1.4.1. Instrumentation de la dalle

Dans le sens longitudinal de la dalle on trouve 3 bases de sondes. La dalle n'est pas instrumentée en capteurs de déformation. La figure 3.1.4b schématise la position des sondes situées dans la base principale.

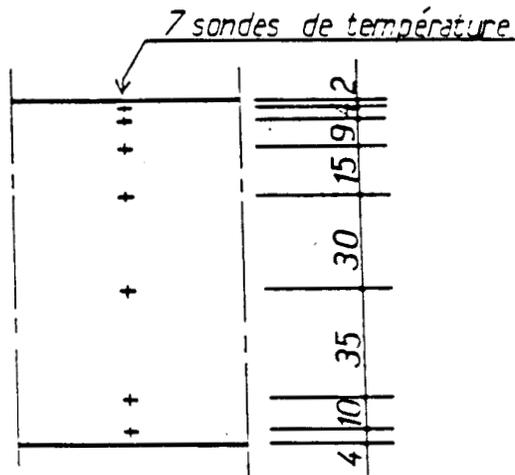


fig. : 3.1.4b IMPLANTATION DES SONDES

3.2. Caractéristiques des capteurs et des sondes

3.2.1. Capteurs de déformation

Les capteurs, du type C 110, sont constitués d'une corde vibrante dont la fréquence propre N_0 est donnée par :

$$N_0 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{E}{PS}}$$

.../...

avec : F = force appliquée (F = 2 ES)
 P = masse volumique
 S = section de la corde
 L = longueur de la corde
 E = module d'Young

La déformation relative du témoin sonore est donnée par :

$$\epsilon = K (N^2 - N_0^2)$$

avec : $K = \frac{4 L^2 P}{E}$

No = fréquence à l'origine
 N = fréquence après déformation

Un effort de compression induit une diminution de la fréquence propre de la corde. A l'inverse, un effort de traction correspond à une élévation de la fréquence.

Si la température de la corde varie, il y a lieu de corriger les déformations relatives apparentes. Finalement on aura :

$$\epsilon = K (N^2 - N_0^2) + \lambda \Delta T$$

avec : λ = coefficient de dilatation de la corde
 ΔT = variation de la température

La sensibilité des témoins sonores, autour de 1000 Hz, est de 0,1 Hz, soit 0,35 $\mu\text{m}/\text{m}$. La fréquence initiale No est réglée à 1000 Hz et le coefficient de dilatation de la corde est de :

$$\lambda = 11,6 \cdot 10^{-6} (^\circ\text{C}^{-1})$$

3.2.2. Solarimètre

Le solarimètre est utilisé pour obtenir l'intensité globale du rayonnement tombant sur la surface horizontale de la terre et provenant non seulement du soleil mais aussi de la diffusion des rayons de la voûte céleste.

Cet appareil se compose d'une pile solarimétrique. L'élément sensible est constitué par 14 éléments de thermocouple en constantan manganèse. Leurs soudures chaudes sont de faible masse et forment une surface noire exposée au rayonnement ; leurs soudures froides sont solidaires d'un bloc métallique abrité qui reste à la température de l'air ambiant. L'élément sensible est protégé des mouvements de l'air par deux coupelles hémisphériques en verre.

Pour la mise en service, la pile du solarimètre doit être placée horizontalement. Dans ce but, le socle est pourvu d'un niveau à bulle et ce réglage est effectué à l'aide de vis calantes.

3.2.3. Sondes de température

Les températures dans le béton sont mesurées grâce à des termo-sondes à résistance de platine dont les caractéristiques sont :

- Résistance : R = 100 Ω à 0°C
- Corps inox d'un diamètre de 3,5 mm et de 50 mm de longueur
- Câblage 3 conducteurs sous gaine PVC (4 conducteurs pour Beaumont).

.../...

Les sondes ont une sensibilité de $0,1^{\circ}\text{C}$. Leur précision en mesures relatives est meilleure que $0,3^{\circ}\text{C}$. Ces sondes ont été fixées soit sur les témoins sonores, soit sur les armatures du ferrailage de la dalle.

3.3. Méthodes d'instrumentation

L'implantation des sondes dans les ouvrages doit être judicieusement choisie. Les différentes mesures enregistrées montrent, en effet, que c'est le champ de température qui conditionne cette implantation. Le schéma donné par la figure 3.2a permet de distinguer 3 zones où la température évolue différemment :

Zone 1 : cette zone, de 20 cm environ, est le siège de gradients très élevés. Pour mieux apprécier le champ de température, 5 sondes sont nécessaires. La répartition préconisée est : 1, 3, 7, 12 et 20 cm de profondeur à partir de la face supérieure de la dalle.

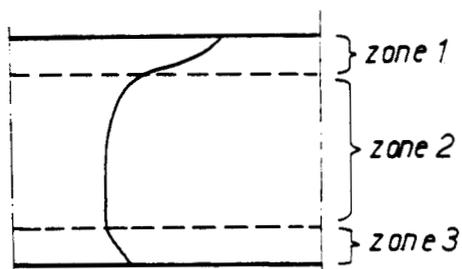


fig.: 3.2a. CHAMP DE TEMPERATURE

Zone 2 : c'est la zone où les températures enregistrées sont très voisines. 2 sondes peuvent suffire pour décrire le champ des températures.

Zone 3 : dans cette zone, la face inférieure du tablier est très influencée par la variation de la température extérieure. Il est nécessaire d'avoir une sonde dans les 2 premiers centimètres de cette face. Dans le cas d'un pont caisson, c'est dans le hourdis inférieur qu'on place 2 sondes : une dans la face supérieure et une autre dans la face inférieure.

Dans l'hypothèse où le gradient transversal est négligé, 8 sondes de température, au moins, sont nécessaires afin de décrire au mieux le champ de température régnant sur la hauteur de la section.

3.3.1. Mode opératoire

Deux cas peuvent se présenter :

- 1) L'instrumentation est prévue dès la construction de l'ouvrage
- 2) L'instrumentation est exécutée sur un ouvrage existant.

1) Ouvrage en phase de construction

Les sondes sont fixées de 2 façons différentes :

- 1) Les sondes sont soit associées aux capteurs de déformation qui sont, eux-mêmes, fixés au ferrailage de la dalle soit fixées directement sur une barre du ferrailage à l'aide de colliers de serrage en PVC. La figure 3.3.1. schématise une sonde de température associée à un capteur de déformation.

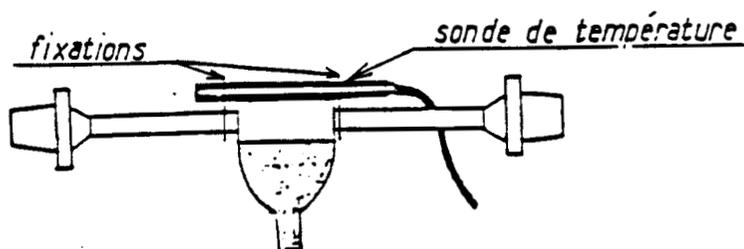


fig.: 3-31 - SCHEMA D'UN TEMOIN SONORE

- 2) Les sondes sont encastrées dans un tube en PVC, de 15 à 20 mm de diamètre, dont l'intérieur est rempli de coulis. Le tube a une longueur sensiblement égale à l'épaisseur de la dalle. La base de sondes ainsi constituée est solidement fixée au ferrailage de la dalle.

2) Ouvrages existants

Sur les ouvrages anciens on exécute un carottage d'un diamètre de 10 cm sur l'épaisseur du hourdis. On positionne la base de sondes, préalablement préparée, comme indiqué par la figure 3.3.3. et on remplit le trou avec du béton.

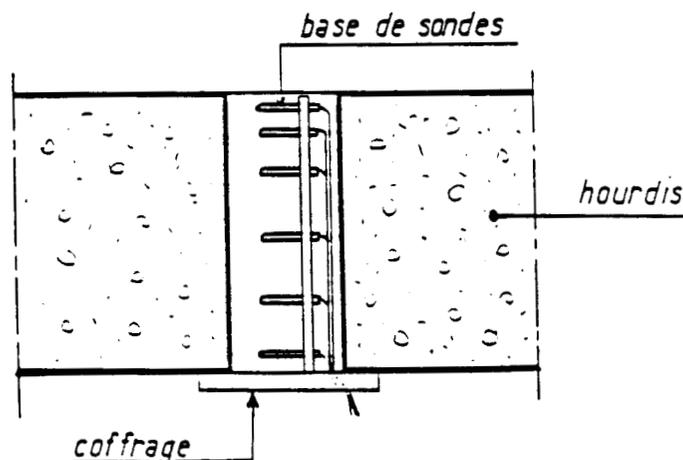


fig. : 3.3.3. IMPLANTATION DE LA
BASE DE SONDES

Remarque : une étude approfondie effectuée par le laboratoire régional de Bordeaux montre que le choix du coulis de remplissage n'a aucune incidence sur les mesures données par les sondes.

3.4. Acquisition des mesures

L'acquisition des mesures est réalisée grâce à une centrale automatique installée sur le site.

3.4.1. Description de la centrale de mesures

La centrale, dont le nom est DELTA LOGGER, est un équipement qui permet la saisie et le stockage des informations issues de capteurs. On peut disposer jusqu'à 62 voies d'entrée et la centrale peut accepter en entrée des tensions, des résistances, des fréquences et des niveaux logiques.

L'enregistrement des données est entièrement automatique. Les données enregistrées sont stockées dans la RAM de la centrale et peuvent être relues sur une imprimante ou par un calculateur et stockées sur disque. Les données peuvent être extraites de la centrale et les lectures en cours peuvent être examinées sans interrompre la scrutation.

On peut fournir des instructions à la centrale de 2 façons : manuellement ou à l'aide d'un ordinateur.

En mode manuel, les instructions de fonctionnement sont données à l'aide des boutons du panneau supérieur. Elles servent à :

- mettre à l'heure et à jour la centrale
- démarrer et arrêter la scrutation
- afficher la valeur en cours de chaque capteur relié à la centrale
- Obtenir un enregistrement sur une imprimante reliée à la centrale.

Si l'on n'utilise pas de calculateur, la centrale peut servir à effectuer des mesures selon la configuration par défaut stockée en PROM.

En utilisation avec un ordinateur, ce que nous avons fait, les instructions sont données à la centrale à l'aide du logiciel fourni.

On peut prendre des données à des intervalles réguliers, chaque voie pouvant avoir son propre intervalle de scrutation. Afin d'optimiser l'utilisation de la mémoire de la centrale, on peut enregistrer les valeurs d'une voie pendant une période comme une valeur unique représentant la moyenne, la maximale ou la minimale pendant cette période.

La centrale fonctionne avec 6 piles R6 qui procurent environ 28 heures de fonctionnement, ce qui est équivalent à un million de lectures de tension ou 300000 lectures de thermocouples.

3.4.2. Récupération des données

La collecte des mesures se fait tous les mois, environ. Pour récupérer les données, nous utilisons un micro-ordinateur portable.

3.4.3. Exploitation des mesures

Les données recueillies par l'ordinateur sont traitées par le logiciel THERM. C'est un programme mis au point au laboratoire de Lille.

A partir des caractéristiques géométriques de la section transversale du tablier et de l'implantation des capteurs et des sondes, il calcule :

- la différence de température linéarisée entre les fibres extrêmes de la section
- la température moyenne de l'ouvrage
- la déformation au niveau de chaque capteur.

Ce sont ces résultats, associés aux mesures de l'ensoleillement et de la température ambiante in-situ, qui constituent l'essentiel des données de l'étude.

3.5. Résultats obtenus

3.5.1. Viaduc Jules Verne

Les mesures de températures et de déformations ont commencé dès la réalisation de l'ouvrage, en 1986.

Sur cet ouvrage, les gradients thermiques maximaux sont obtenus en fin d'après-midi, entre 17 heures et 19 heures. Les gradients minimaux apparaissent le matin, généralement entre 9 heures et 11 heures.

L'intensité la plus élevée enregistrée, pour le gradient maximal, est de 7,9°C. Pour la même journée, le gradient minimal vaut 1,2°C. Les figures 3.5.1a et 3.5.1b montrent l'allure du profil des températures pour ces 2 gradients.

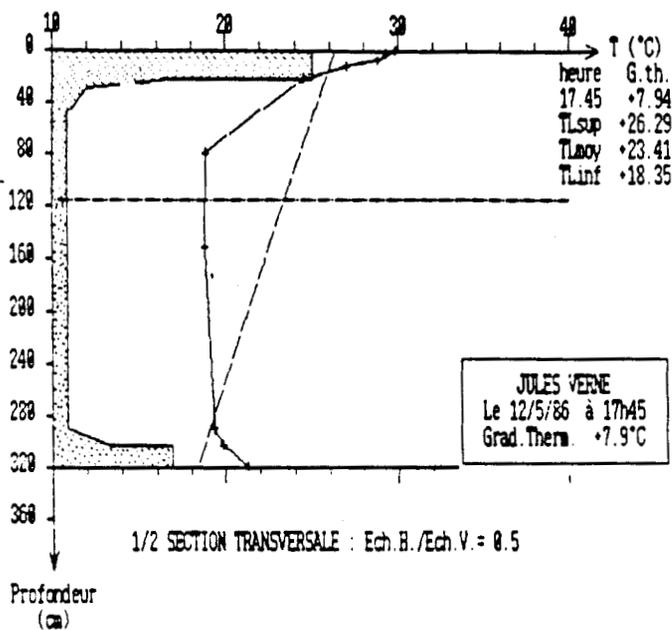


fig. : 3.5.1a
DISTRIBUTION DES TEMPERATURES A 17h45

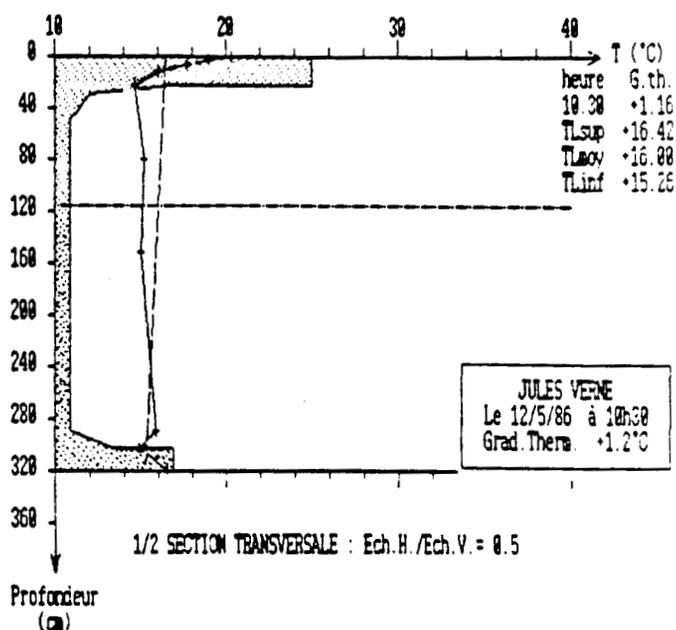


fig. : 3.5.1b
DISTRIBUTION DES TEMPERATURES A 10h30

Les 2 figures montrent la distribution réelle des températures sur la hauteur de la section transversale. En traits interrompus nous avons la distribution linéarisée équivalente. Entre 10 heures 30 et 17 heures 45 la température moyenne de l'ouvrage est passée de 16°C à 23,41°C, soit une variation de 7,41°C. La longueur totale de l'ouvrage étant de 943,10 m, l'allongement à l'axe neutre est de 9 cm (en prenant un coefficient de dilatation du béton $\alpha = 13.10^{-6} / ^\circ\text{C}$).

3.5.1.1. Coefficient de dilatation du béton

Au cours de l'année le coefficient de dilatation du béton prend des valeurs qui peuvent varier de 11.10^{-6} à $13,6.10^{-6}$. Au cours de la journée du 7 juillet 1987 nous avons enregistré la dilatation générale de l'ouvrage à l'aide de capteurs de déplacements fixés aux extrémités du viaduc. Nous avons évalué de cette manière le coefficient de dilatation du béton. Le graphe de l'allongement en fonction de la variation de la température moyenne est donné par la figure 3.5.1c. Une régression linéaire sur les points significatifs donne :

$$\alpha = 13,2.10^{-6} / ^\circ\text{C}.$$

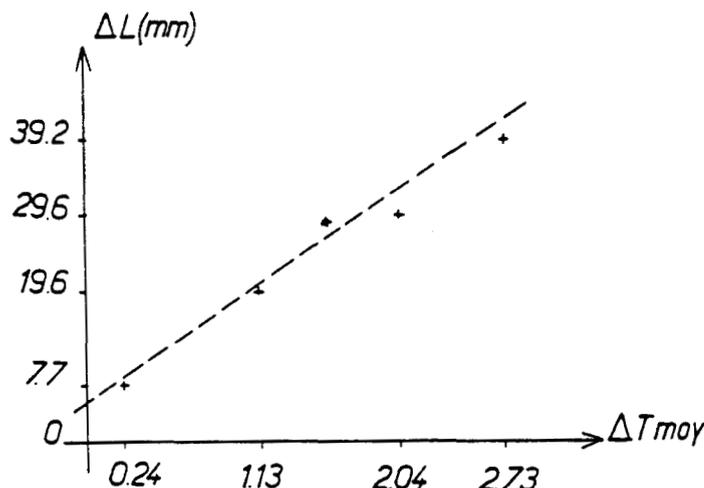


fig. : 3.5.1c .VARIATION DE L'ALLONGEMENT
EN FONCTION DE LA TEMPERATURE MOYENNE

3.5.1.2. *Distribution des températures*

Si on s'intéresse uniquement aux gradients maximaux, on remarque que les températures évoluent d'une manière non linéaire (figure 3.5.1a). Sur une profondeur de 60 cm, environ, le gradient de température est élevé. Sur les 20 premiers centimètres ce gradient atteint facilement $0,5^{\circ}\text{C}/\text{cm}$. Cette zone de l'ouvrage est sous l'exposition directe de l'ensoleillement qui s'exerce sur le dessus du tablier.

Sur la hauteur de l'âme du caisson, la variation de la température ne dépasse guère 2°C . Cette partie de l'ouvrage est très influencée par l'effet du vent ainsi que par la variation de la température ambiante.

Au niveau du hourdis inférieur du caisson, la différence de température entre la fibre supérieure et la fibre inférieure est faible. Les mesures enregistrées montrent que cette différence ne dépasse pas 2°C et la température donnée par la sonde inférieure est supérieure, dans tous les cas, à la température enregistrée par la sonde de la face supérieure.

Les températures mesurées par la sonde de la face inférieure sont très influencées par la variation de la température ambiante.

3.5.2. Pont de Beaumont sur Oise

Le pont de Beaumont sur Oise et le viaduc Jules Verne présentent les mêmes similitudes dans l'évolution des températures sur la hauteur de la section instrumentée. Les mesures réalisées durant l'été 1990 montrent que les gradients obtenus sont élevés, relativement à ceux trouvés sur Jules Verne.

Le gradient maximal (10,7°C) a été enregistré pendant la journée du 15 juillet 1990. Les gradients maximaux sont obtenus en fin d'après-midi, généralement entre 20 heures et 22 heures. Comme pour le viaduc Jules Verne, les gradients minimaux apparaissent le matin vers 10 heures. Les figures 3.5.2a et 3.5.2b montrent les graphes de l'évolution des températures correspondant au gradient maximal et au gradient minimal au cours de la journée du 15 juillet 1990.

PONT DE BEAUMONT

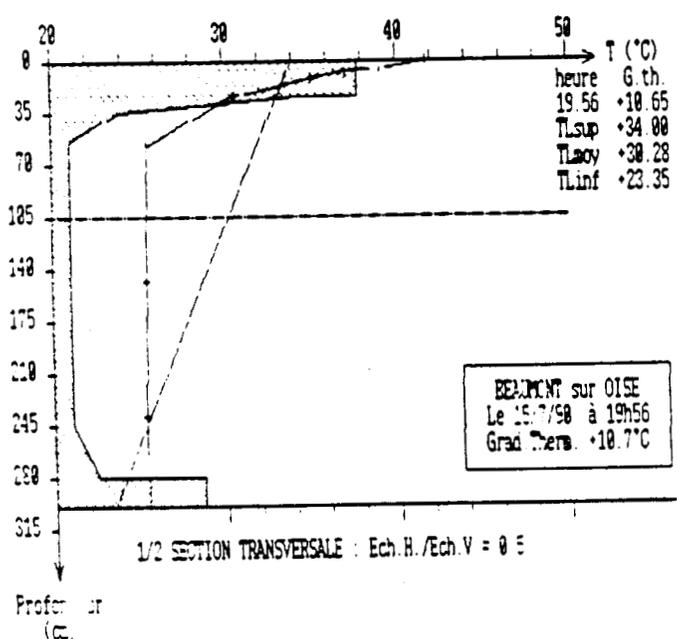


fig. : 3.5.2a
DISTRIBUTION DES TEMPERATURES A 19h56

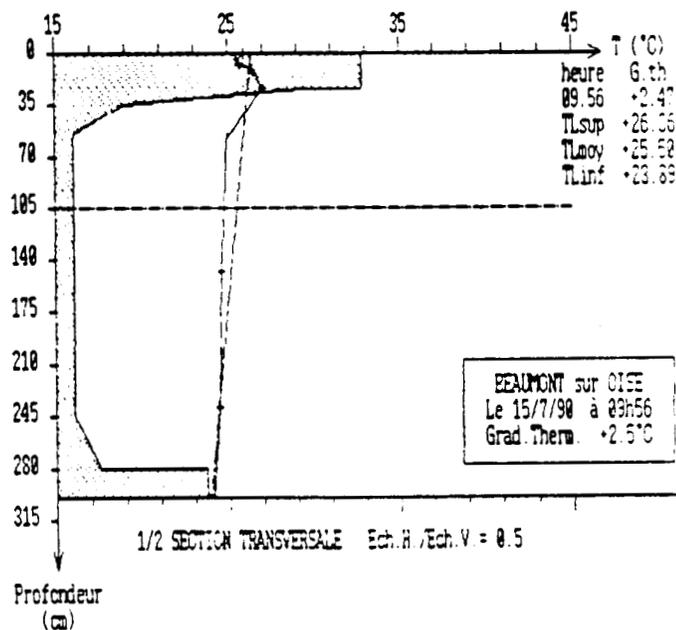


fig. : 3.5.2b
DISTRIBUTION DES TEMPERATURES A 9h56

3.5.3. Ouvrage n° 6 à Calais

Sur cet ouvrage, les premières mesures remontent à 1976. Le profil des températures, lorsque le gradient est maximal, est similaire à ceux enregistrés à Beaumont et à Jules Verne, mais l'amplitude des gradients est plus proche des valeurs trouvées au viaduc Jules Verne. On remarque également une légère différence dans le profil des températures au niveau de la partie inférieure des poutres.

La température enregistrée par la sonde de la face inférieure de la poutre est voisine, ou même légèrement inférieure, à la température donnée par la sonde située juste au dessus. Les figures 3.5.3a et 3.5.3b illustrent respectivement le profil des températures enregistrées à 22 heures, correspondant au gradient maximal et le profil des températures enregistrées à 11 heures et qui correspondent au gradient minimal de la journée du 17 juillet 1990.

PONT DE CALAIS

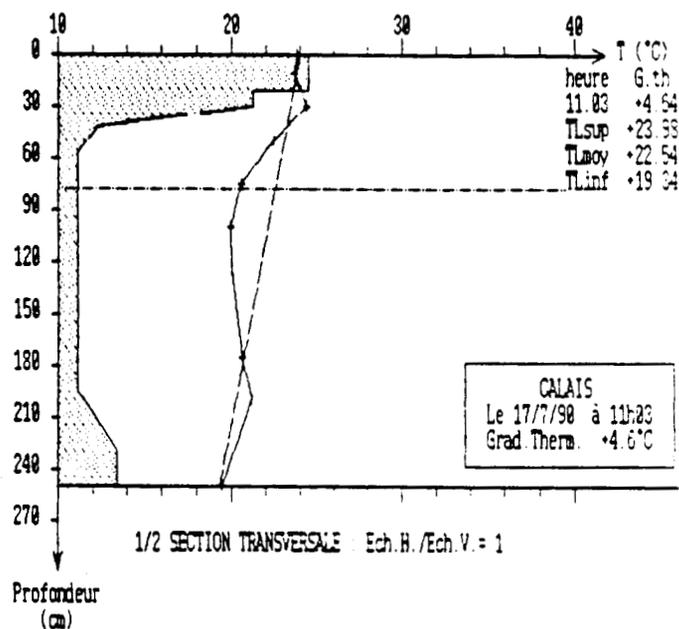
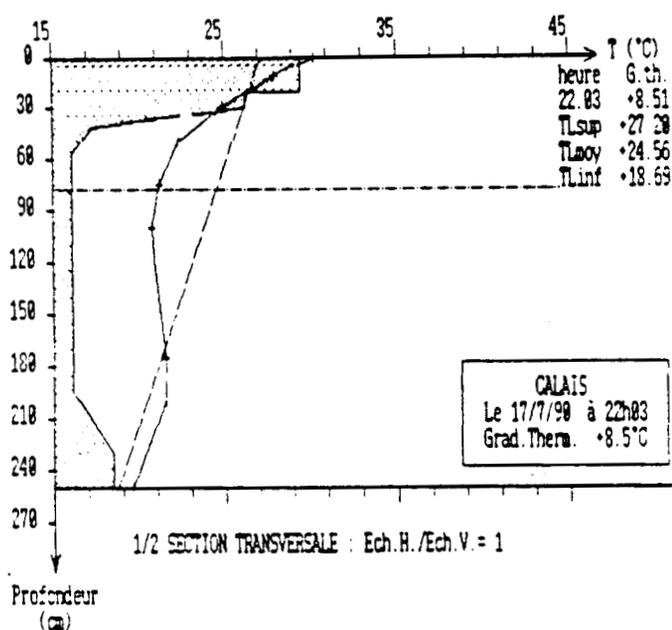


fig. : 3.5.3a
DISTRIBUTION DES TEMPERATURES A 22h03

fig. : 3.5.3b
DISTRIBUTION DES TEMPERATURES A 11h03

Comme pour le pont de Beaumont sur Oise, les gradients maximaux apparaissent vers 22 heures. Le tableau de la figure 3.5.3c indique, pour la période du 30 juin au 24 septembre 1990, quelques gradients maximaux ainsi que les heures où ils se manifestent.

Dates	12/7	13/7	16/7	17/7	18/7	31/7	5/8	11/8	22/8	4/9	9/9
Gradients	7,31	7,58	8,44	8,63	8,25	6,94	7,33	6,05	5,05	4,91	3,64
Heures	23H	22H	21H30	22H	22H30	22H30	19H	22H	21H30	20H	21H

fig. 3.5.3c

3.5.4. PS-32

Cet ouvrage, constitué par une dalle très massive, présente des résultats très différents par rapport aux ouvrages déjà présentés.

Sur ce pont, les gradients maximaux apparaissent très tôt le matin et les gradients minimaux sont enregistrés l'après-midi.

Au cours d'une journée, la température moyenne de l'ouvrage varie très peu.

Le profil des températures correspondant au gradient maximal est sensiblement linéaire. Les figures 3.5.4a et 3.5.4b montrent les profils obtenus pour la journée du 18 juillet 1990.

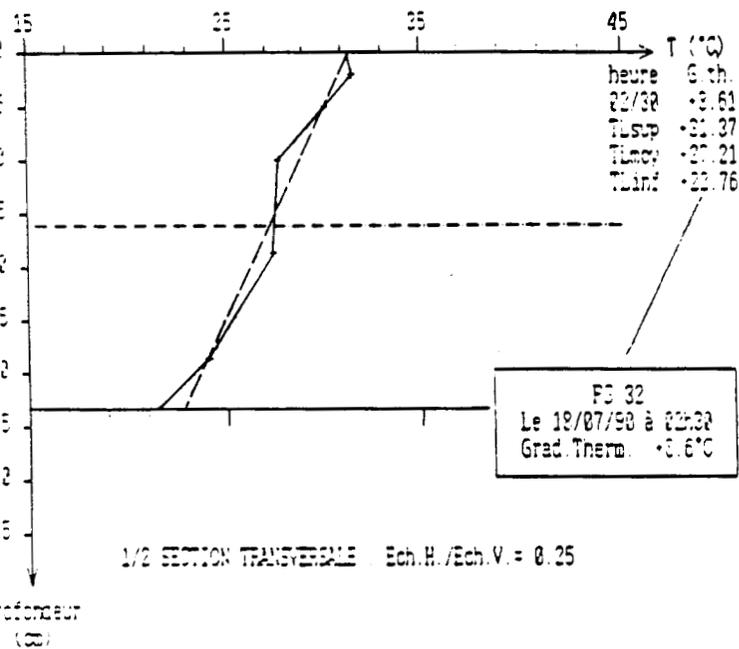
PS-32

fig. : 3.5.4a

DISTRIBUTION DES TEMPERATURES A 2h30

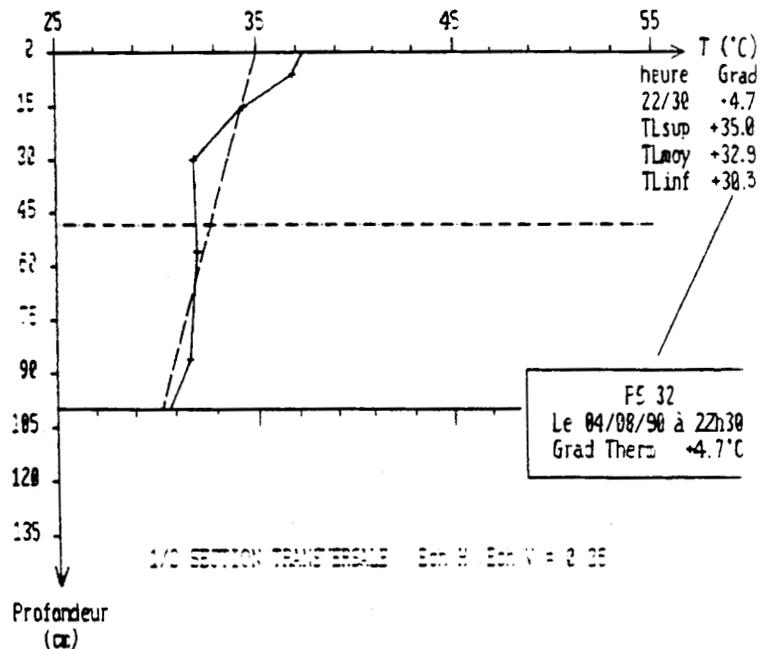


fig. : 3.5.4b

DISTRIBUTION DES TEMPERATURES A 22h30

Au cours d'une journée, la variation du gradient thermique atteint rarement 4°C. Au pont de Beaumont cette variation atteint facilement 5°C et au viaduc Jules Verne on dépasse les 6°C.

Le tableau de la figure 3.5.4c donne quelques gradients maximaux avec les heures qui leur correspondent.

Dates	1/7	3/7	14/7	16/7	18/7	19/7	20/7	21/7	23/7	25/7	14/8	5/9
Gradients	6,23	6,21	6,98	7,49	8,61	8,40	7,80	7,31	7,54	8,52	6,40	4,09
Heures	6H	3H30	7H30	4H	2H30	2H	3H	3H30	4H30	1H30	2H30	2H

fig. : 3.5.4c

3.6. Evolution des paramètres

3.6.1. Gradients thermiques

Les graphes des figures 3.61, 3.63 et 3.66 représentent l'évolution des gradients de température pour la période allant du 30 juin au 24 septembre 1990.

C'est sur le pont de Beaumont sur Oise que nous mesurons les gradients les plus élevés. C'est sur cet ouvrage que nous avons, également, les écarts les plus forts entre les gradients maximaux et les gradients minimaux.

Sur le pont de Calais, les gradients minimaux descendent jusqu'à des valeurs largement négatives et ce pendant les mois de juillet et août.

3.6.2. Gradients maximaux et ensoleillement

L'ensoleillement et les gradients maximaux évoluent dans le même sens, mais les deux graphiques présentent un déphasage de 24 heures. En effet, l'ensoleillement du jour précédent influe beaucoup sur le gradient de température du jour. On peut expliquer ce phénomène par le point suivant :

- à cause de l'inertie importante des ouvrages, l'énergie reçue au cours d'une journée bien ensoleillée n'est dissipée qu'après une ou deux journées non ensoleillées.

C'est pendant le mois de juillet que nous enregistrons les intensités les plus élevées. On mesure, pour les trois ouvrages, plus de 7000 Wh/m² et pour le pont de Beaumont sur Oise on atteint 8000 Wh/m² lors de la journée du 11 juillet.

Les graphes représentant ces variations sont donnés par les figures 3.62, 3.64 et 3.65.

3.6.3. Températures moyennes ouvrages - Températures moyennes extérieures

Sur les figures 3.67, 3.70 et 3.71 nous avons représenté l'évolution des températures moyennes de l'ouvrage et de l'air extérieur sous abri. Pour les trois ouvrages, les températures extérieures et intérieures à l'ouvrage évoluent dans le même sens. On remarque, pour le pont de Calais, que l'amplitude des variations entre les deux températures est faible. L'ouvrage étant plus proche de la mer, la température moyenne ambiante est plus élevée que sur les deux autres ponts.

----- PONT de BEAUMONT sur OISE -----
GRADIENTS THERMIQUES

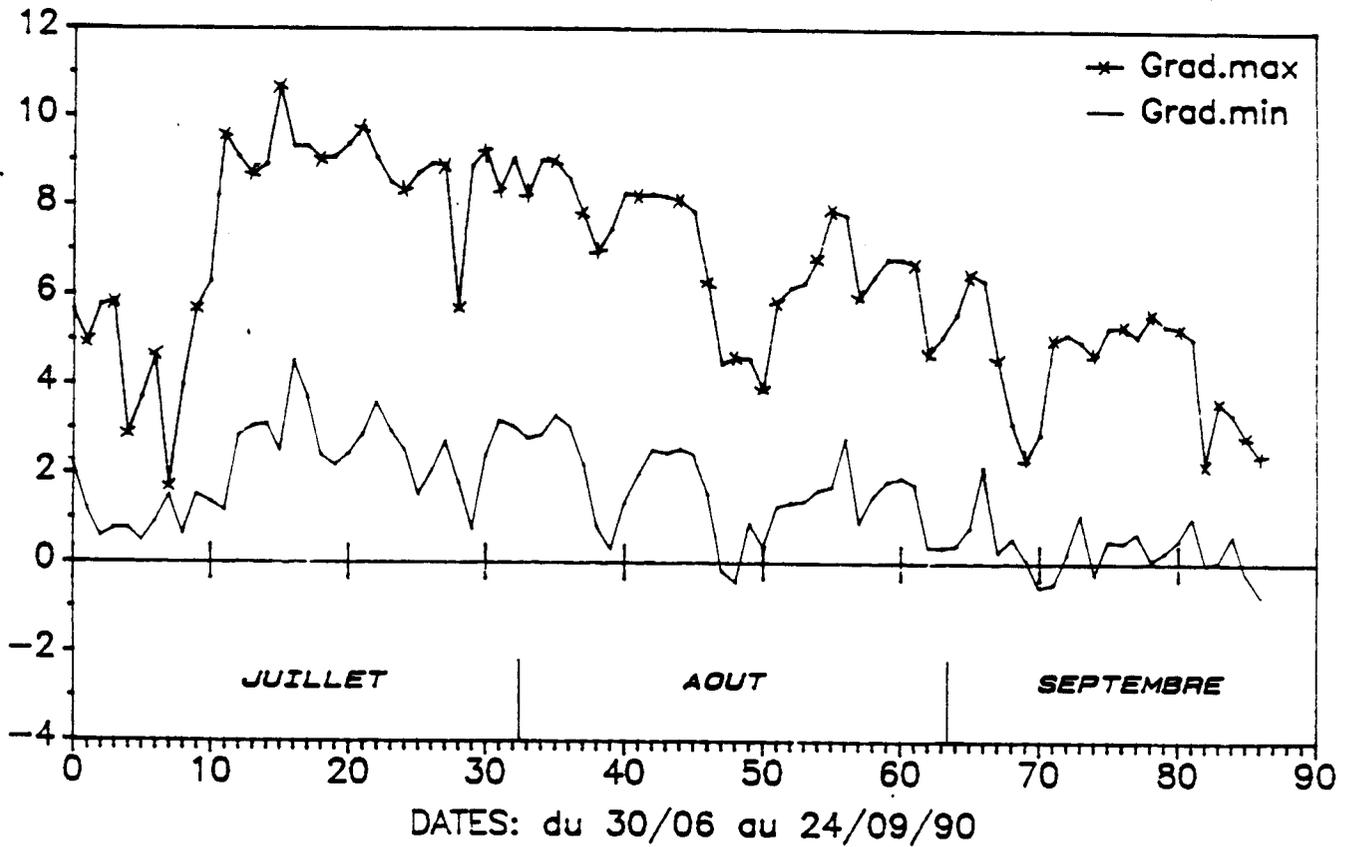


fig. 3.61

----- PONT de BEAUMONT sur OISE -----
GRADIENT MAXIMAL ET ENSOLEILLEMENT

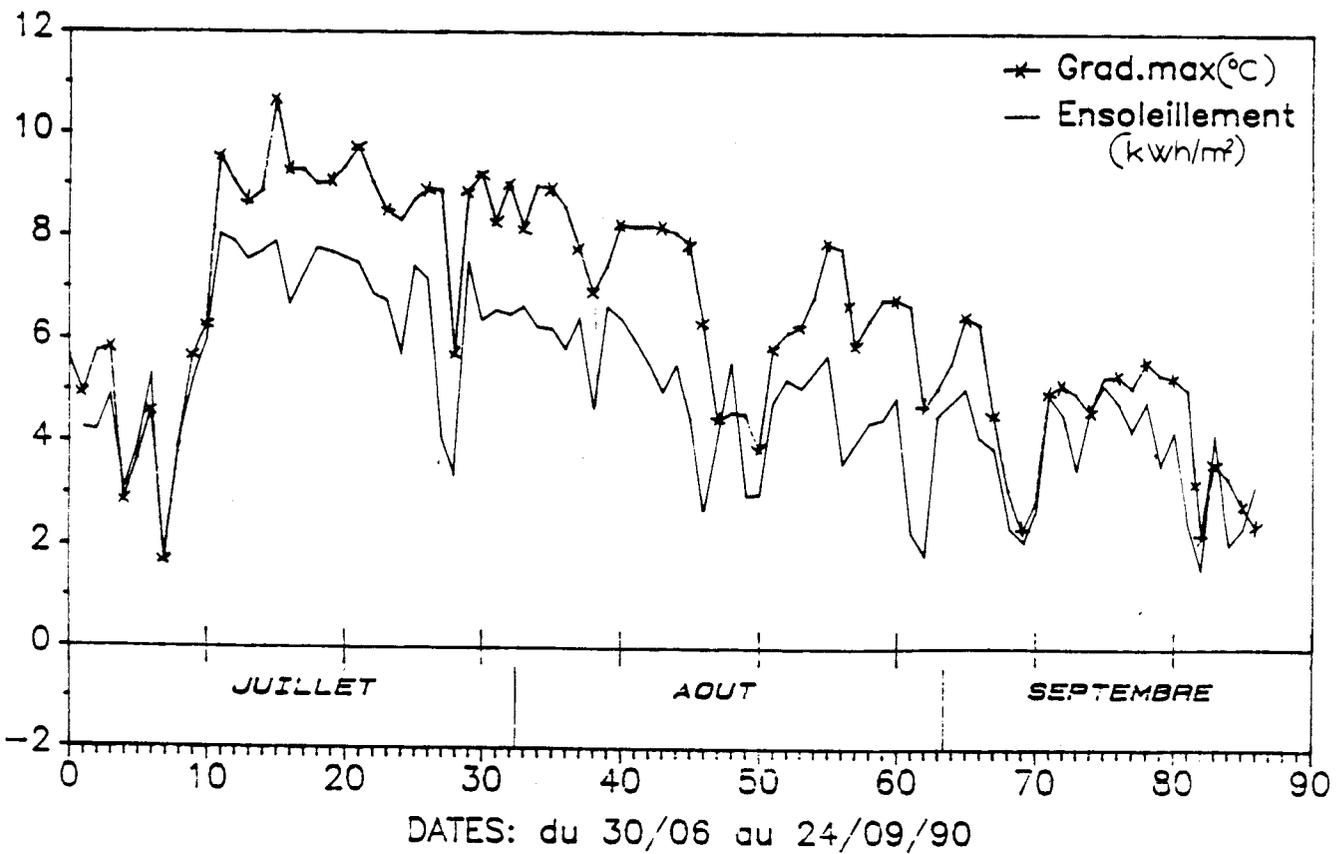


fig. 3.62

----- PONT DE CALAIS -----
GRADIENTS THERMIQUES

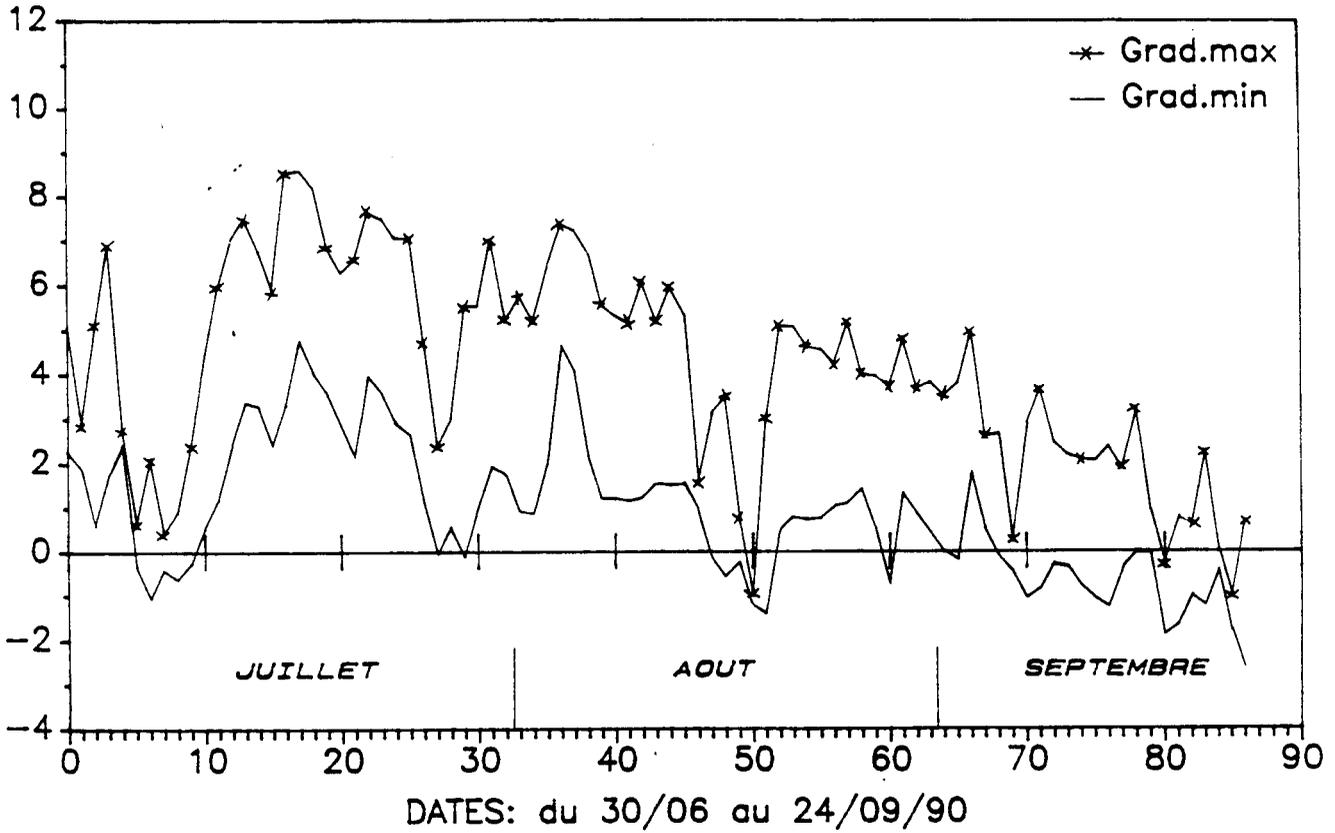


fig. 3.63

----- PONT de CALAIS -----
GRADIENT MAXIMAL ET ENSOLEILLEMENT

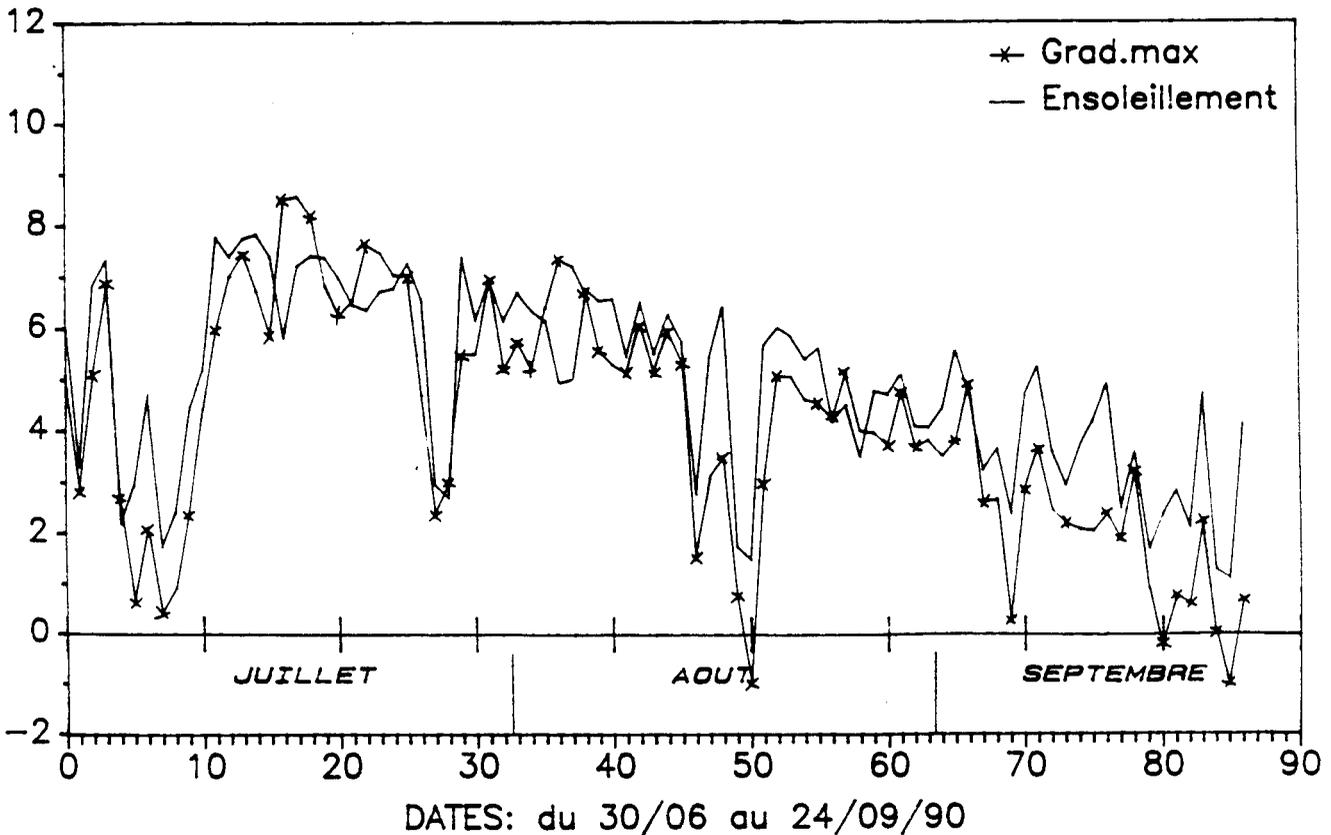


fig. 3.64

----- PS-32 -----
GRADIENT MAXIMAL ET ENSOLEILLEMENT

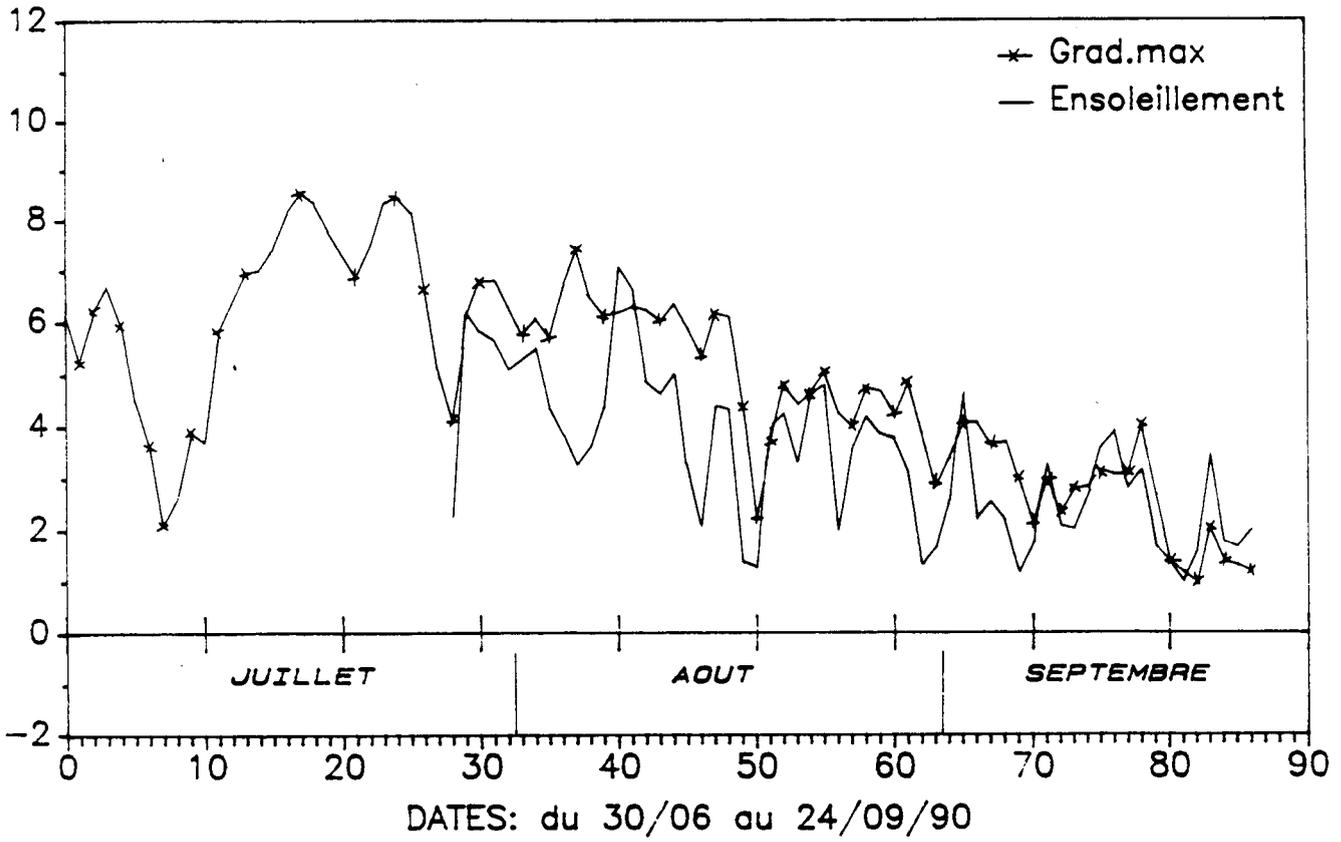


fig. 3.65

----- PS-32 -----
GRADIENTS THERMIQUES

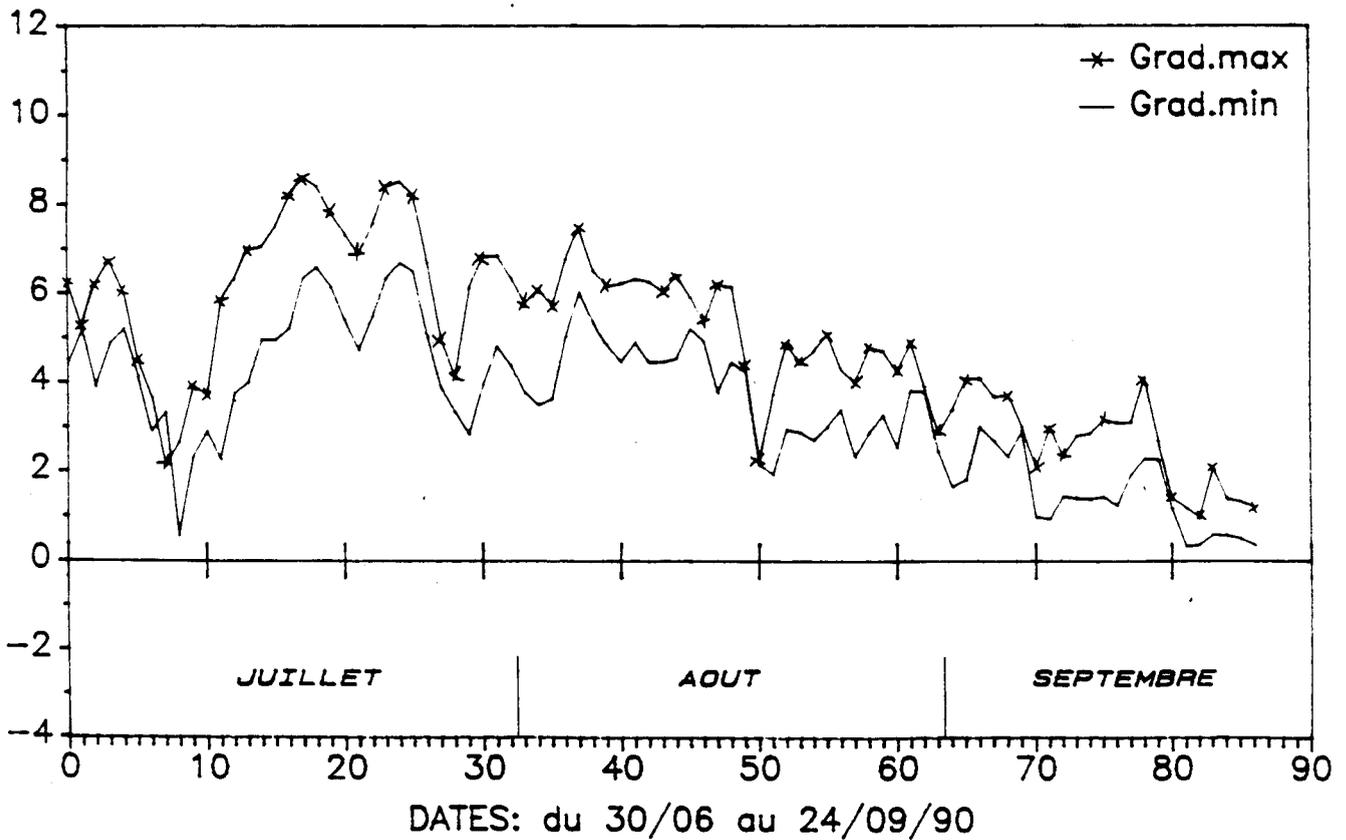


fig. 3.66

3.6.4. Températures maximales ouvrages - Températures maximales extérieures

Les graphiques de ces deux températures évoluent dans le même sens.

Les températures les plus élevées sont enregistrées au pont de Beaumont sur Oise. C'est à Calais que nous obtenons les valeurs les plus faibles. On remarque, également, l'écart très faible, entre les deux températures pour cet ouvrage.

Les températures extrêmes, pour les trois ouvrages, ont été enregistrées le 4 août. Les figures 3.68, 3.69 et 3.72 montrent l'évolution des deux graphes.

3.6.5. Températures moyennes maximales et minimales de l'ouvrage

L'écart entre la température maximale et la température minimale ne dépasse pas 1°C au PS 32. A Beaumont et à Calais, l'écart plus important, atteint et dépasse les 2°C.

Les températures les plus chaudes sont relevées, pour l'ensemble des trois ponts, au début du mois d'août.

Du 4 août au 24 septembre, la température moyenne du pont de Beaumont sur Oise a chuté de 20°C, celle du pont de Calais de 19°C et seulement de 16°C pour le PS 32.

Les graphes représentant ces températures sont donnés par les figures 3.73, 3.75 et 3.78.

3.6.6. Gradients thermiques maximaux et températures jours - températures nuits

Les deux graphiques, figures 3.74, 3.76 et 3.77, évoluent dans le même sens. C'est au PS 32 que nous enregistrons les variations les plus importantes entre la température du jour et la température de la nuit.

La température du jour est calculée en prenant la moyenne des températures pour la période allant de 8 heures à 20 heures.

La température de la nuit est prise égale à la moyenne des températures pour la période allant de 20 heures à 8 heures du matin du jour suivant.

----- PONT de BEAUMONT sur OISE -----
TEMPERATURES MOYENNES

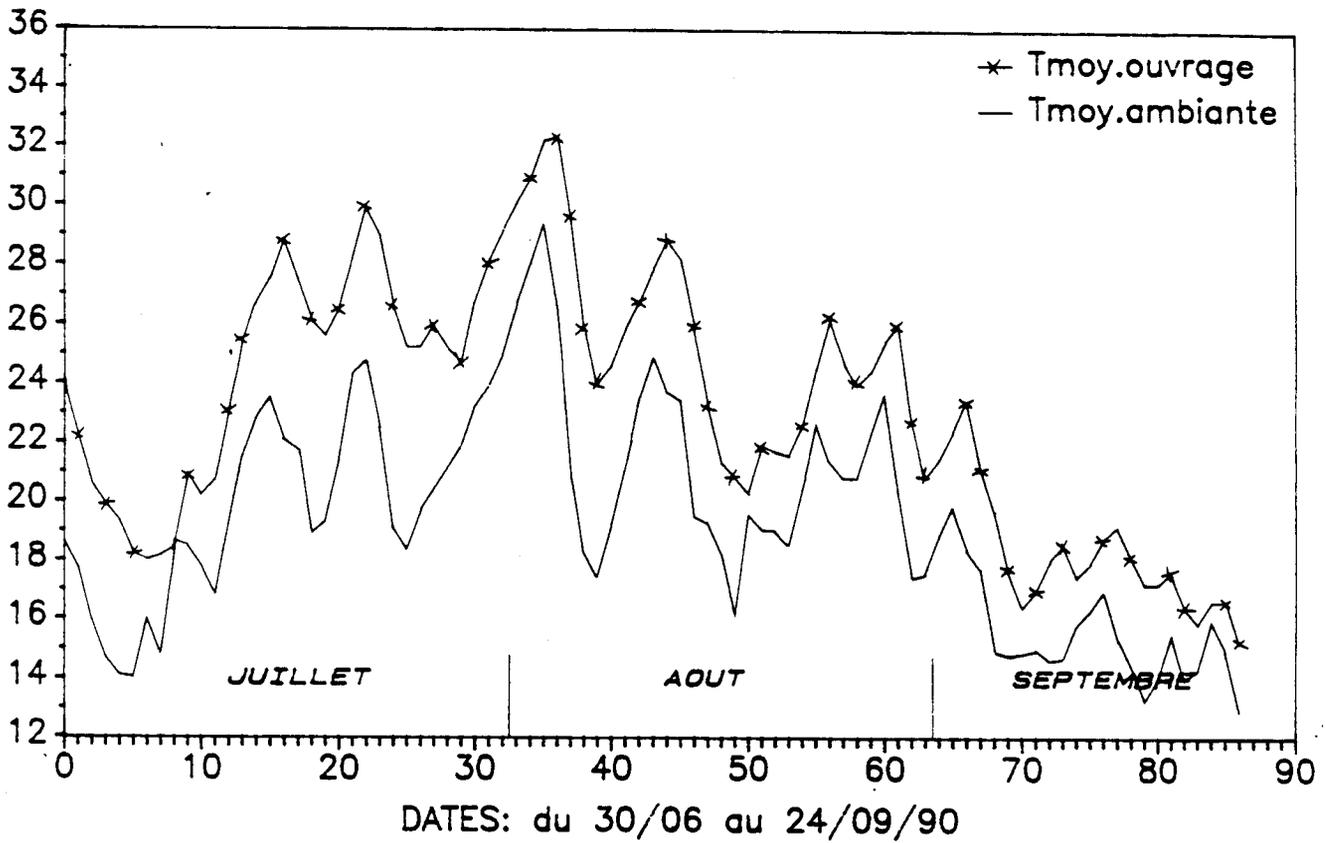


fig. 3.67

----- PONT de BEAUMONT sur OISE -----
TEMPERATURES MAXIMALES

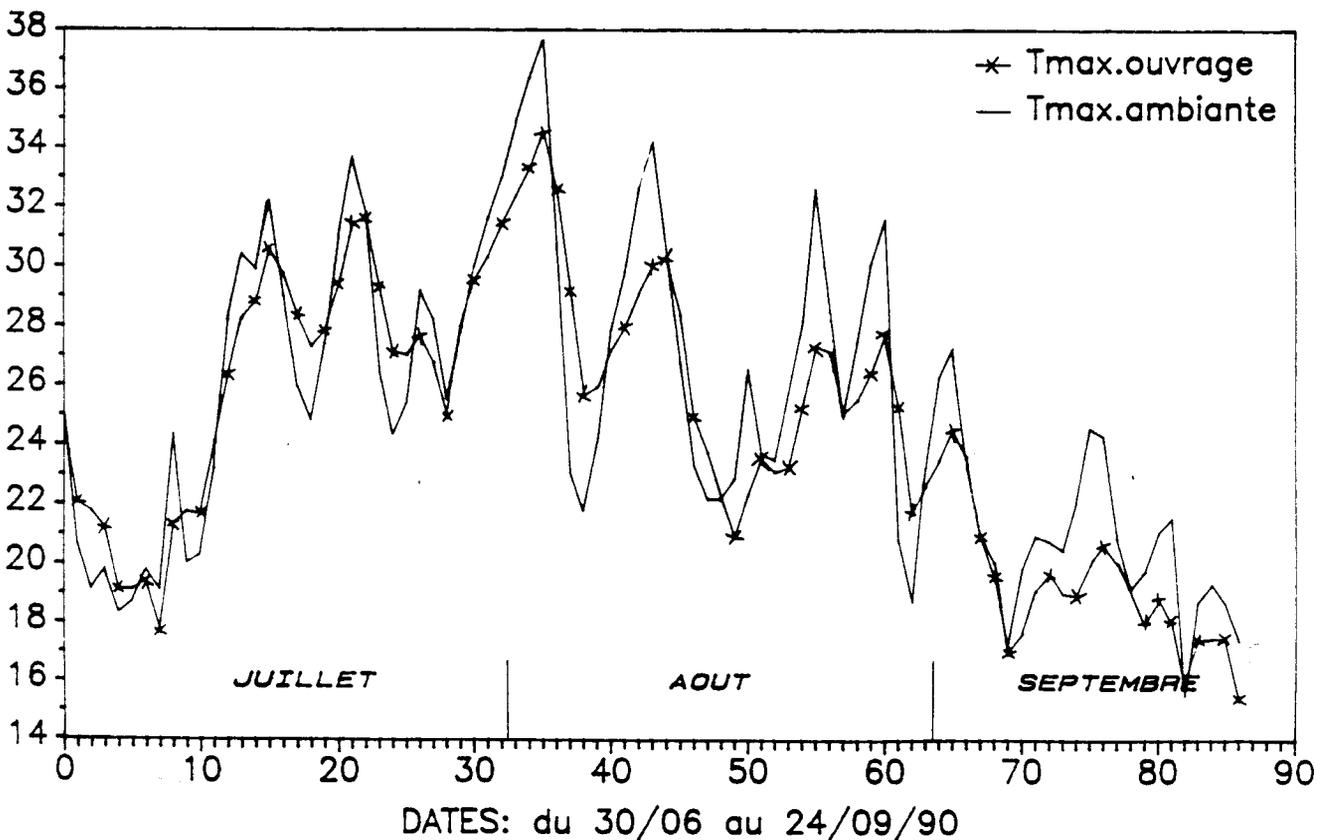


fig. 3.68

37
 ----- PONT de CALAIS -----
 TEMPERATURES MAXIMALES

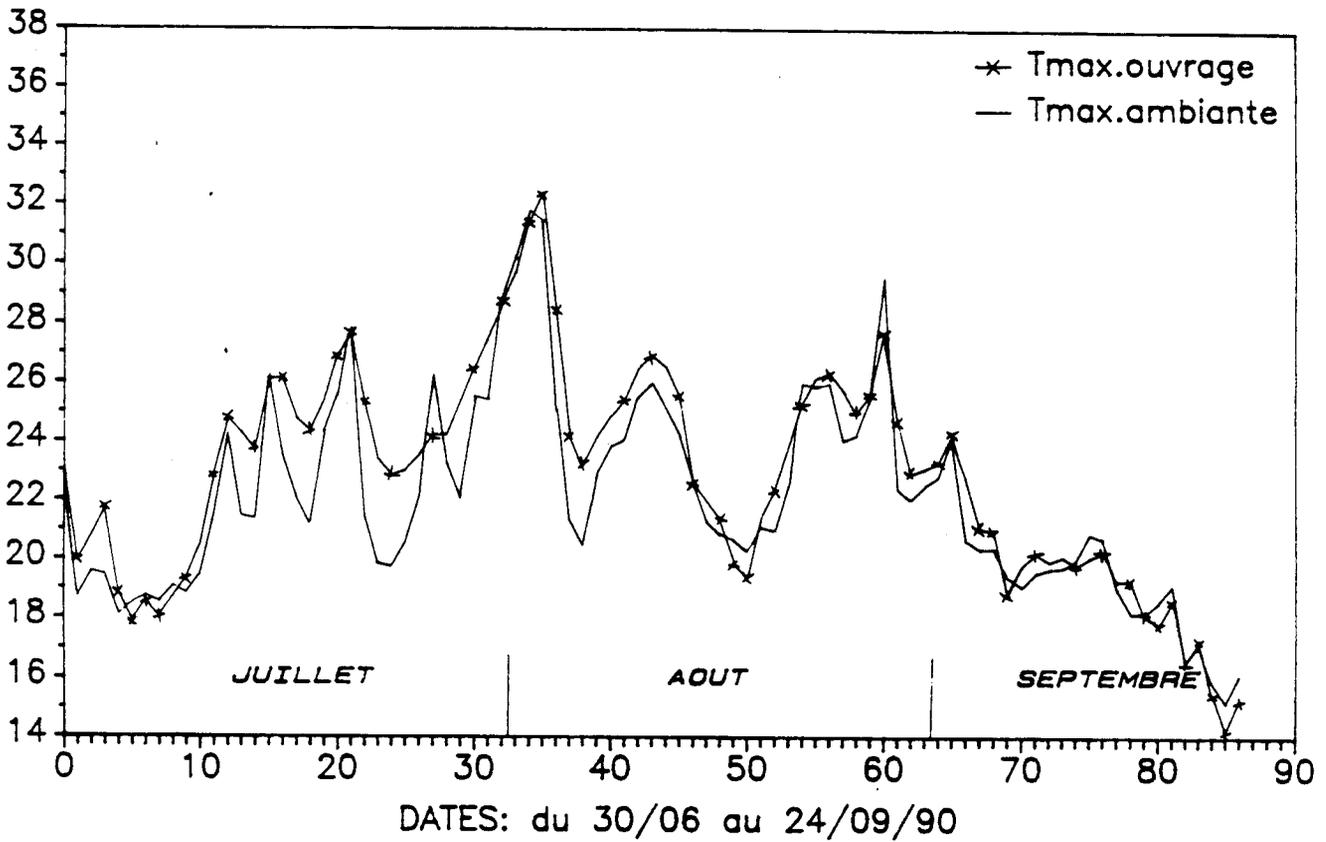


fig. 3.69

----- PONT DE CALAIS -----
 TEMPERATURES MOYENNES

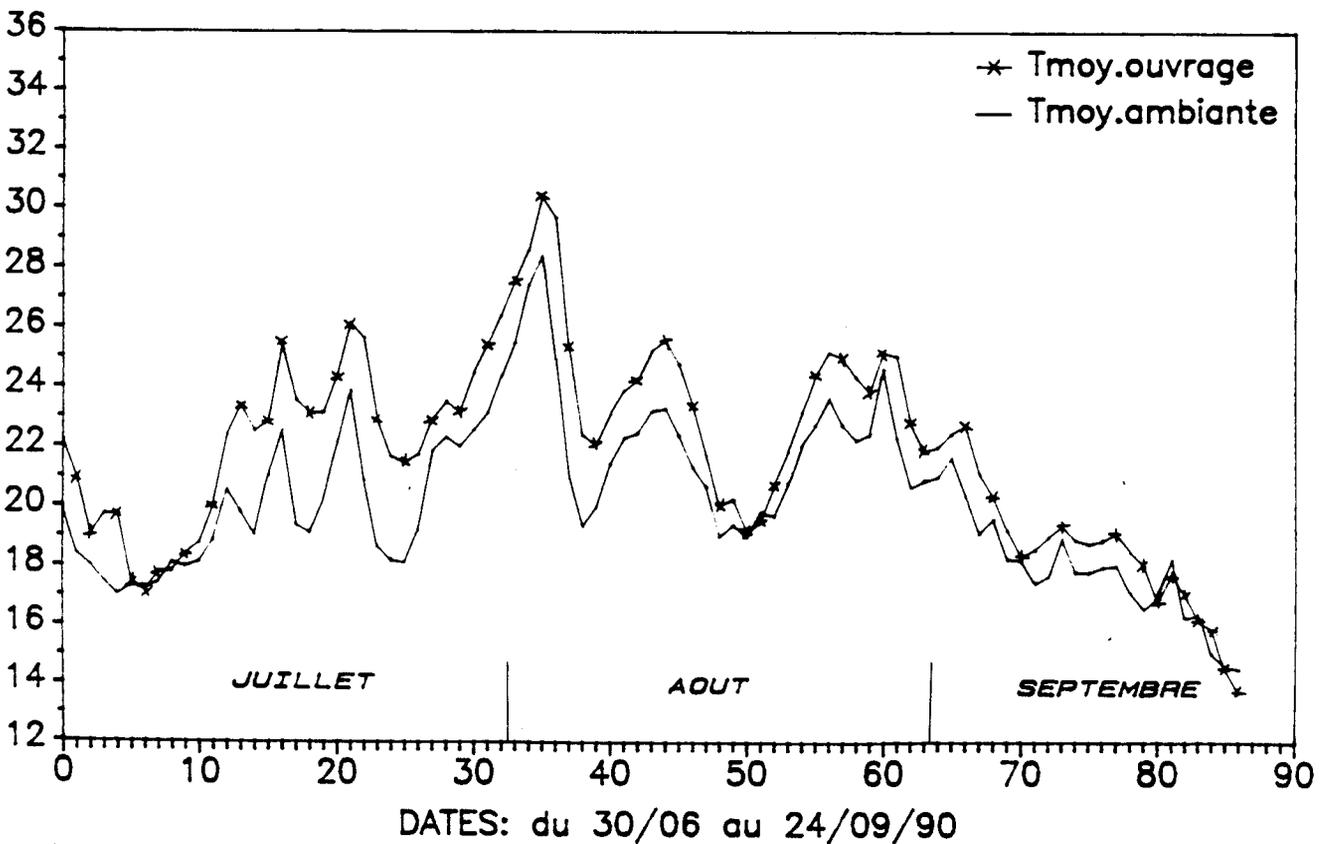


fig. 3.70

----- PS-32 -----
TEMPERATURES MOYENNES

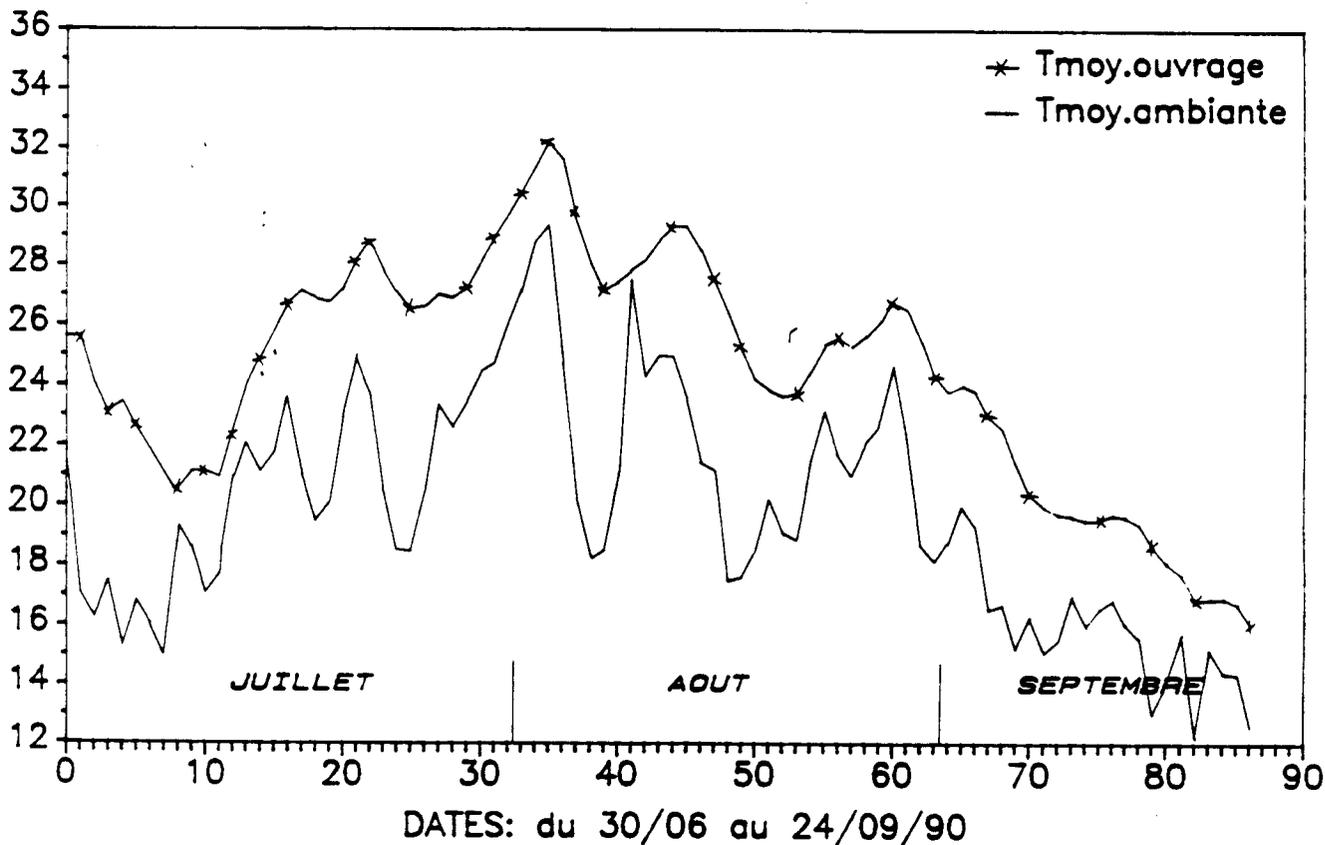


fig. 3.71

----- PS-32 -----
TEMPERATURES MAXIMALES

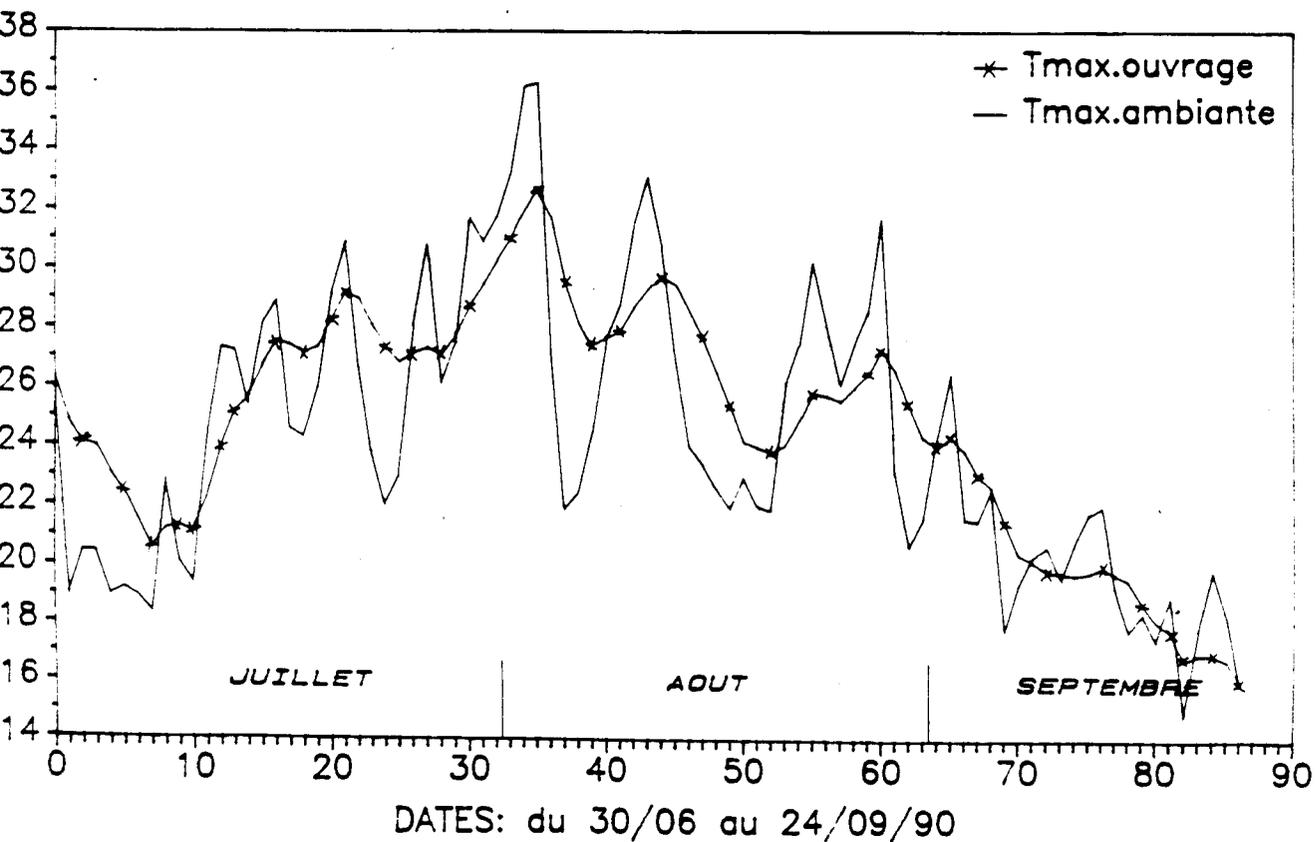


fig. 3.72

----- PONT de BEAUMONT sur OISE -----
 TEMPERATURES MOYENNES DE L'OUVRAGE

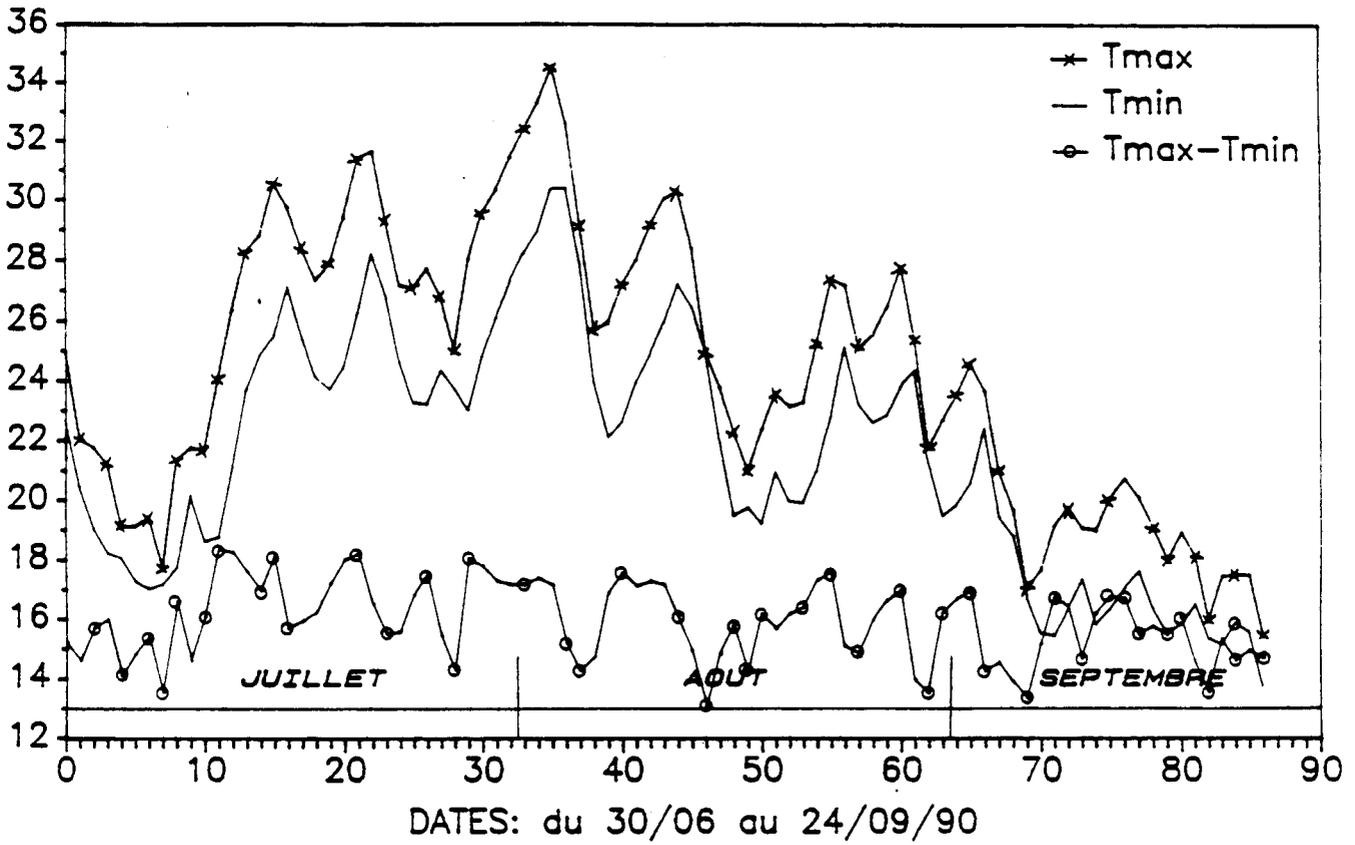


fig. 3.73

----- PONT de BEAUMONT sur OISE -----
 GRADIENT Max et T_{jour}-T_{nuit}

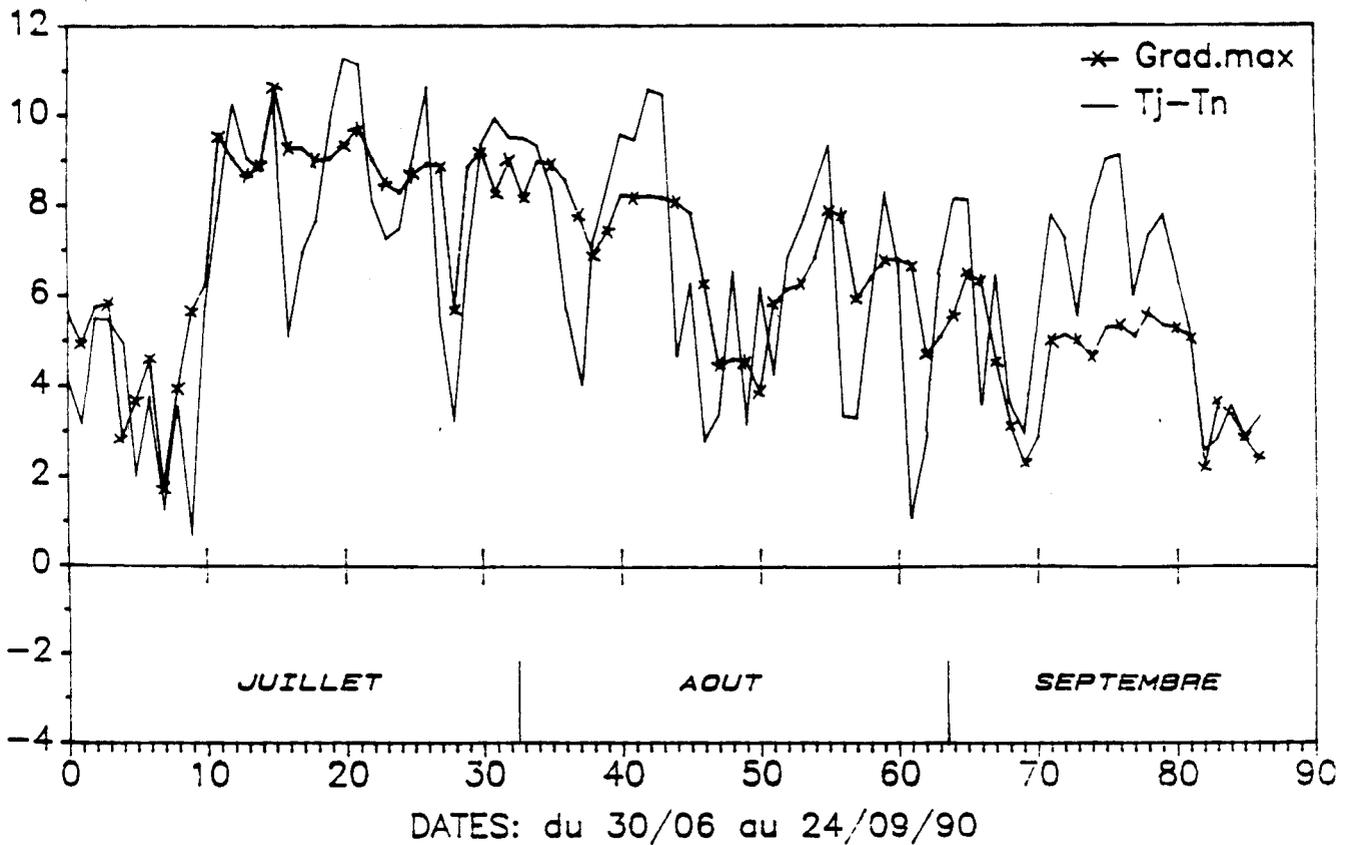


fig. 3.74

40
 ----- PONT DE CALAIS -----
 TEMPERATURES MOYENNES DE L'OUVRAGE

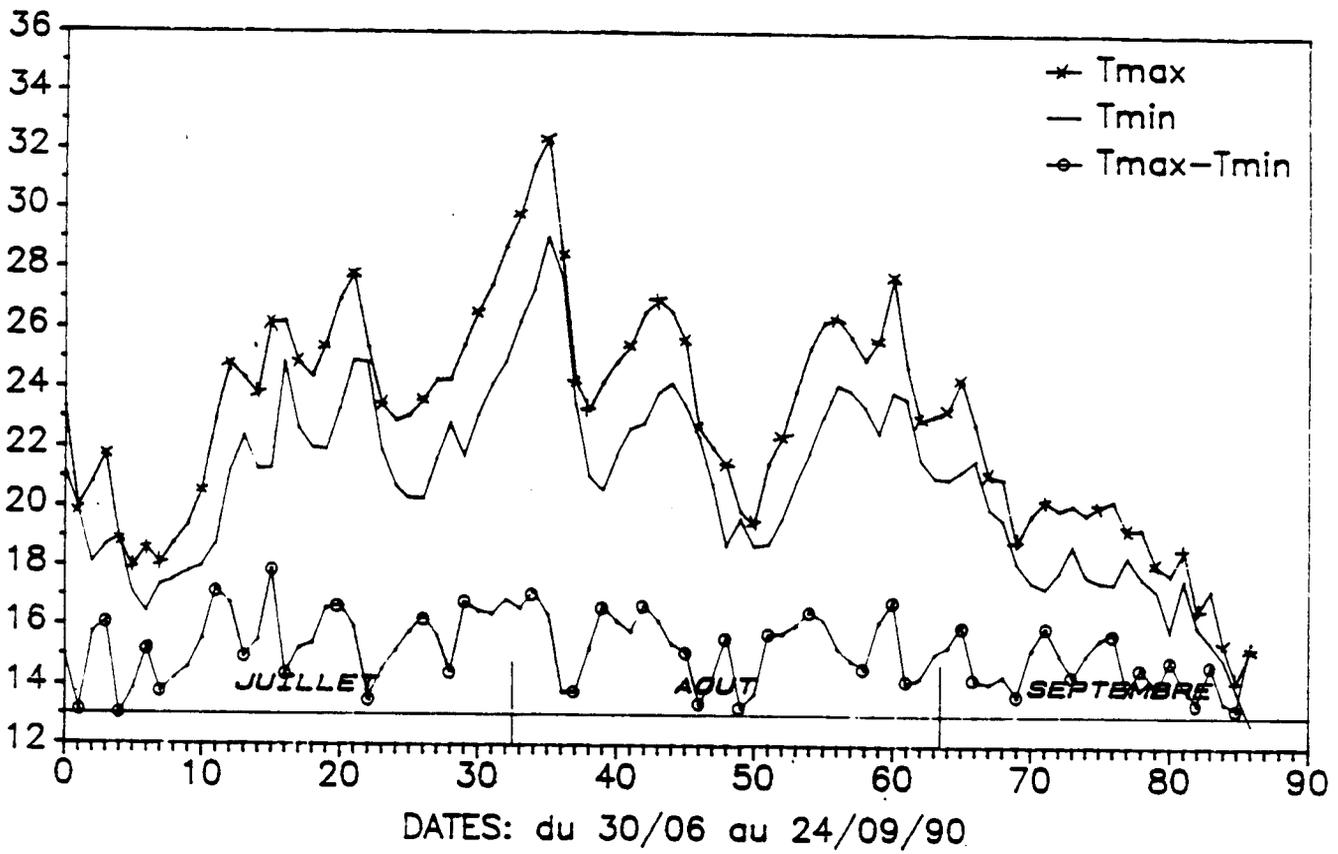


fig. 3.75

----- PONT de CALAIS -----
 GRADIENT Max et T_{jour}-T_{nuit}

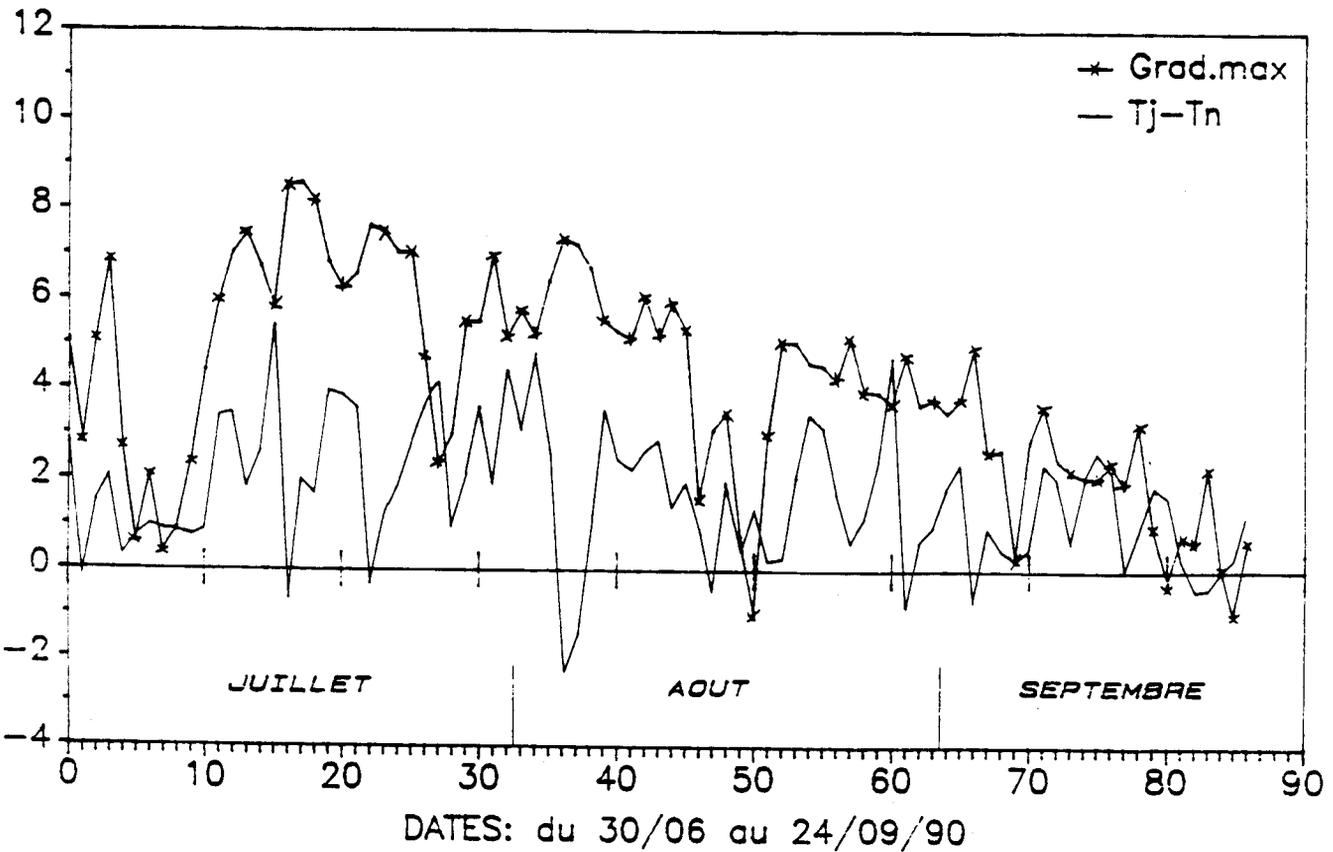


fig. 3.76

41
 ----- PS-32 -----
GRADIENT Max et T_{Jour}-T_{Nuit}

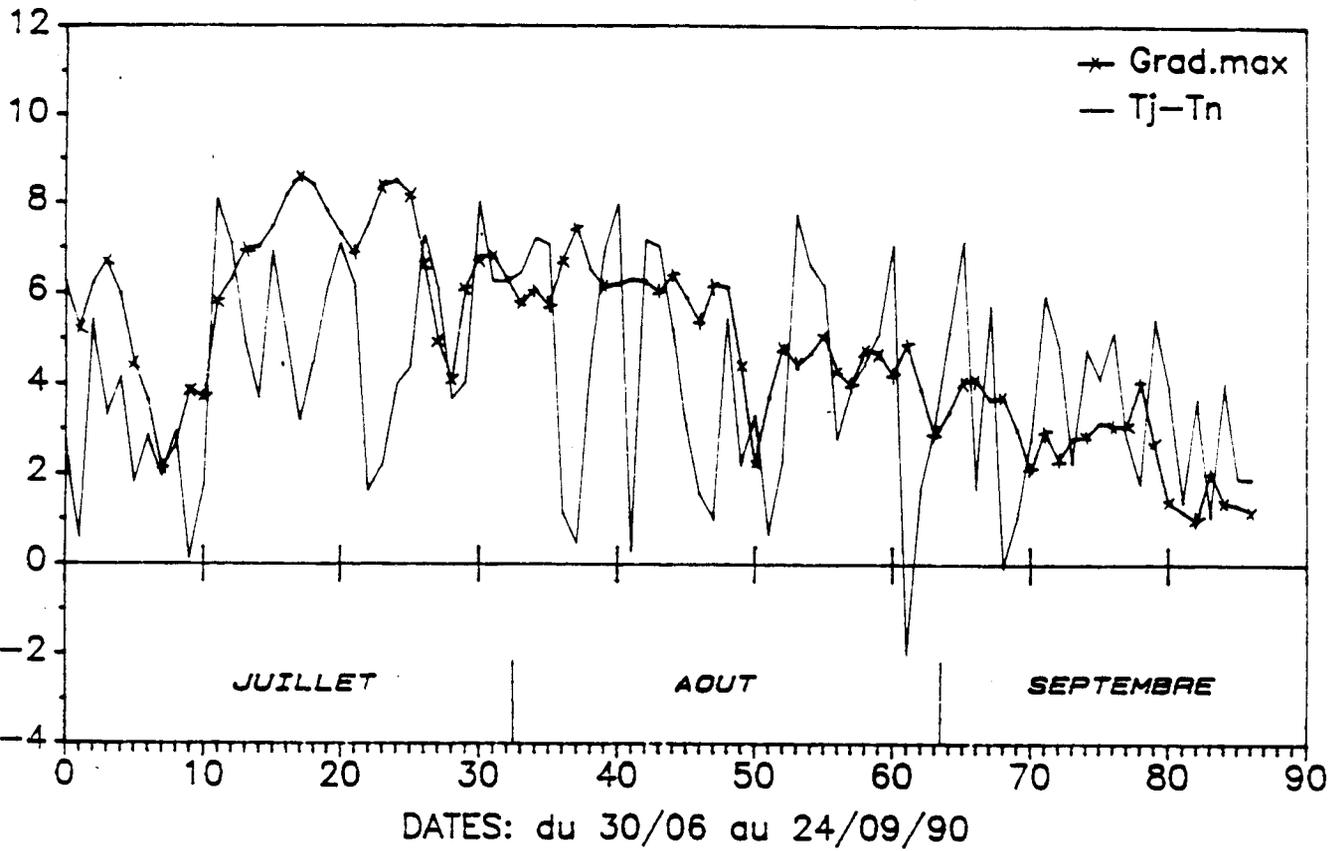


fig. 3.77

----- PS-32 -----
TEMPERATURES MOYENNES DE L'OUVRAGE

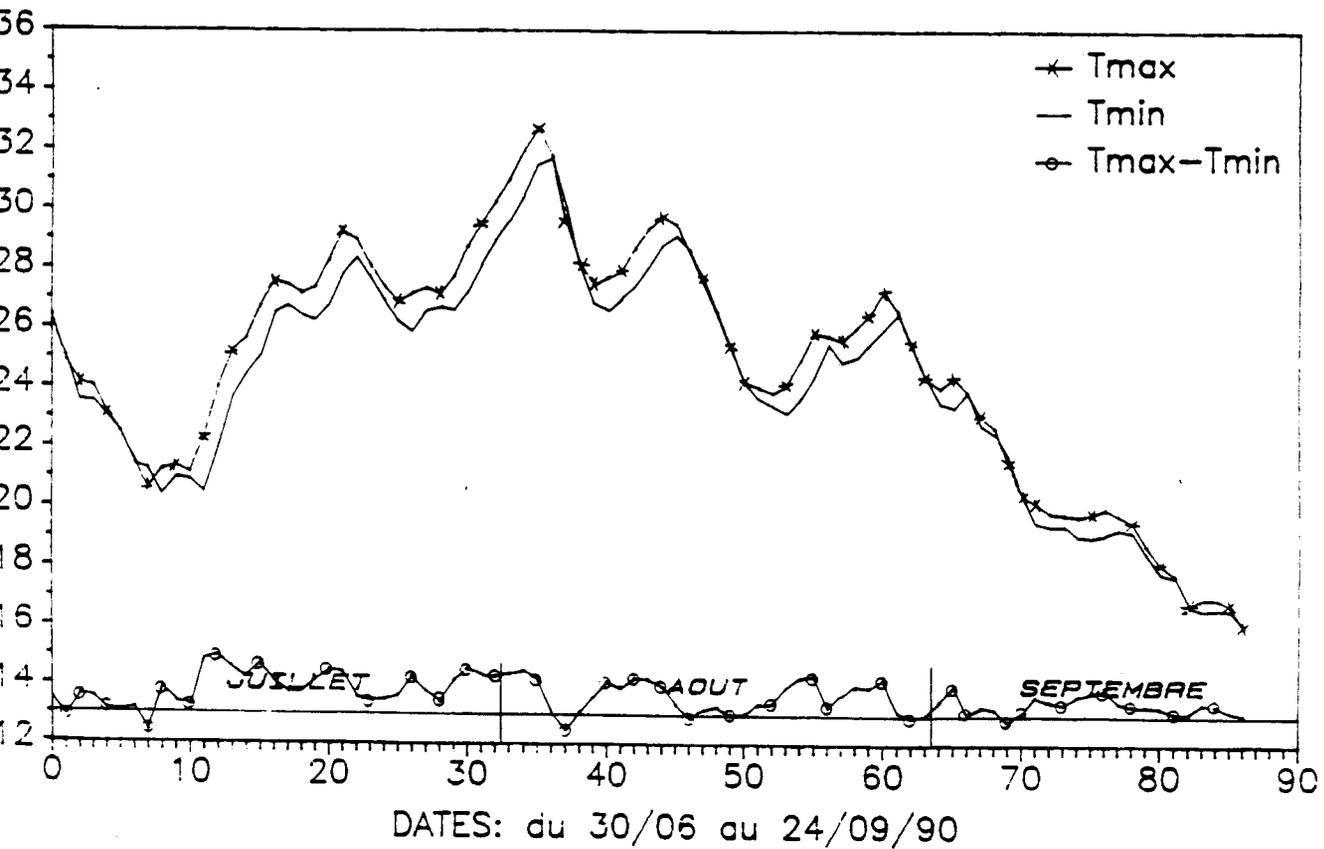


fig. 3.78

3.7. Comparaison des mesures sur les différents ouvrages

Les mesures, ininterrompues du 30 juillet au 24 septembre, sont faites simultanément sur :

- le pont de Beaumont sur Oise
- l'ouvrage n° 6 à Calais
- le PS 32

Les trois ouvrages ayant des géométries différentes, cette campagne de mesures permettra de comparer les résultats obtenus sur chacun d'eux.

Le pont de Beaumont sur Oise n'a pas été équipé de solarimètre pour l'enregistrement de l'intensité du rayonnement solaire.

C'est la station météorologique de Roissy (proche de l'ouvrage) qui nous a communiqué les valeurs de l'ensoleillement.

Pour les trois ponts, nous avons comparé :

- les gradients thermiques
- les températures moyennes de l'ouvrage
- les températures moyennes ambiantes
- les températures maximales
- les différences des températures entre le jour et la nuit.

3.7.1. Gradients maximaux

Ces gradients sont représentés par la figure 3.79.

Les gradients de températures les plus élevés sont obtenus sur le pont de Beaumont sur Oise. En général, ces gradients sont supérieurs à ceux mesurés pour le PS 32 et pour le pont de Calais qui ont des valeurs légèrement différentes.

L'amplitude de variation des gradients sur le PS 32 est très faible.

3.7.2. Gradients minimaux

Les trois graphiques sont donnés à la figure 3.80. On remarque que le graphe des gradients obtenus au PS 32 est nettement au dessus des deux autres graphes. Pour les 87 mesures, de juillet à août, aucune des valeurs du gradient n'atteint 0°C.

Pour le pont de Calais, on enregistre plusieurs valeurs en dessous de 0°C, on atteint même la valeur de - 2°C.

GRADIENTS MAXIMAUX

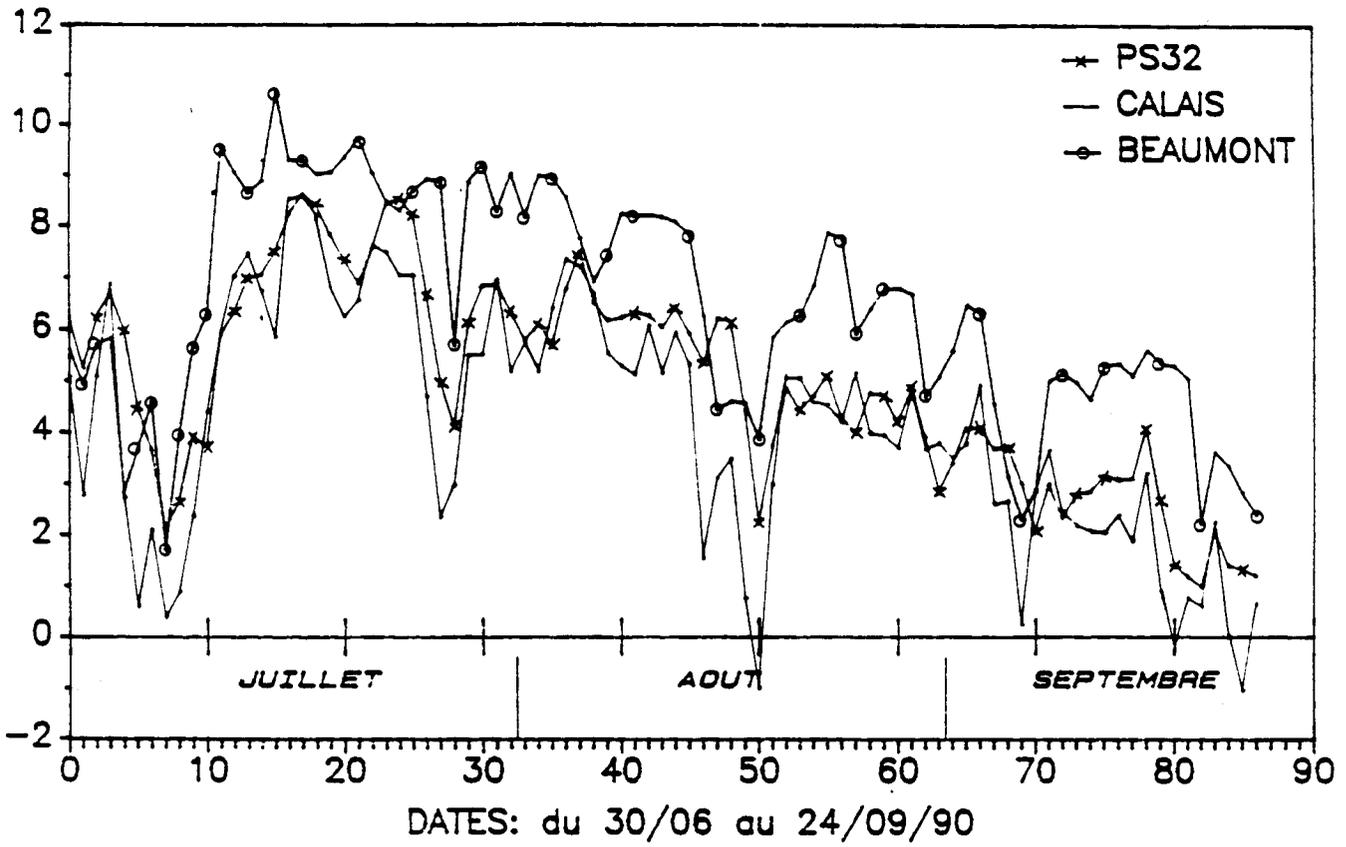


fig. 3.79

GRADIENTS MINIMAUX

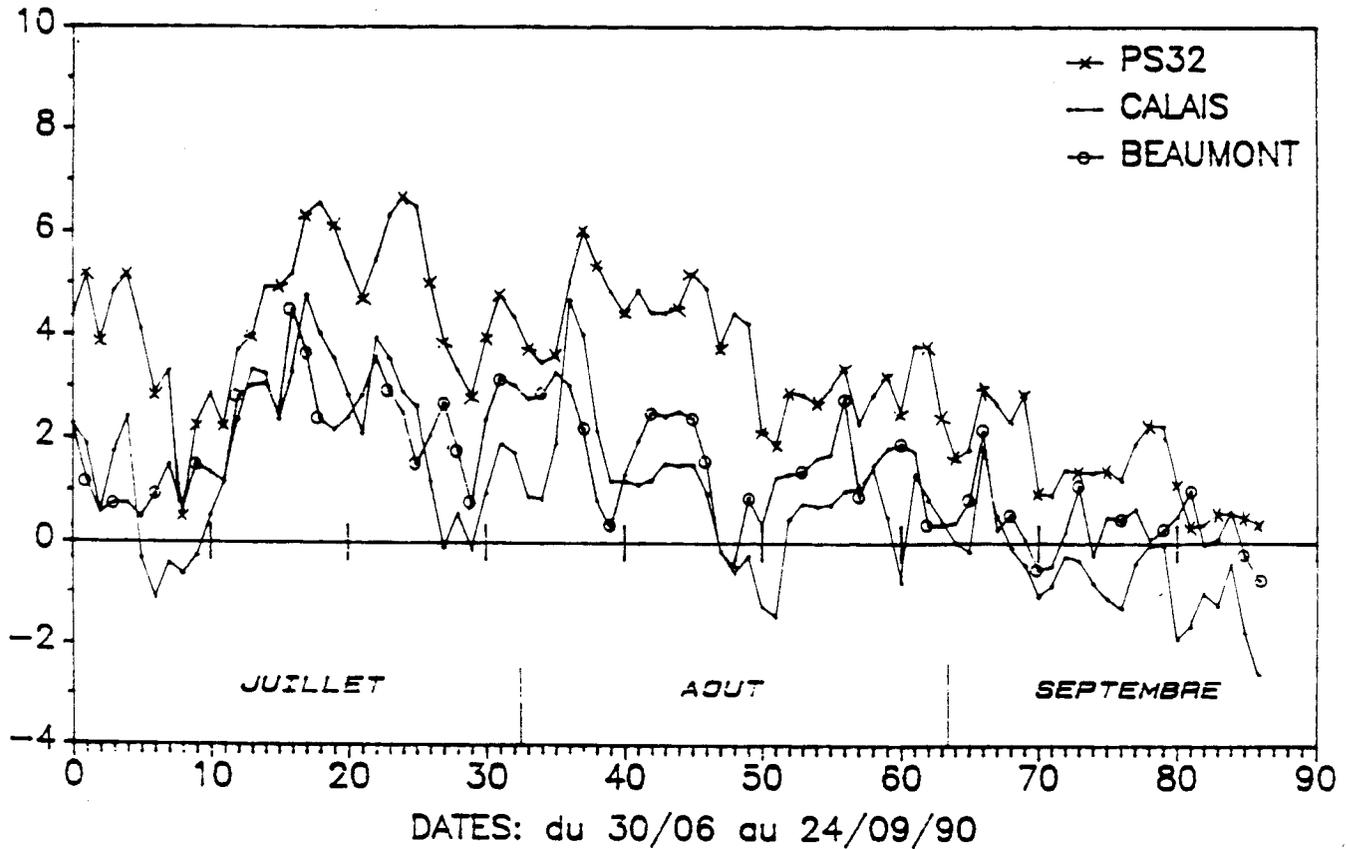


fig. 3.80

3.7.3. Températures moyennes extérieures

Les graphiques représentant ces températures sont donnés par la figure 3.81.

Les températures moyennes extérieures mesurées sur les trois ponts sont, dans l'ensemble, assez voisines.

Lorsque ces températures décroissent, pour se situer aux alentours de 20°C, les mesures enregistrées sur le pont de Calais sont légèrement supérieures à celles obtenues sur les deux autres ponts.

On peut expliquer cette différence car le pont de Calais est situé à proximité de la mer.

3.7.4. Températures moyennes de l'ouvrage

Les températures moyennes, représentées par la figure 3.82, sont très distinctes pour les trois ponts.

C'est au PS 32 que nous enregistrons les intensités les plus élevées et au pont de Calais les valeurs les plus faibles.

Au cours de la journée, la température moyenne au PS 32 varie très peu, ce qui explique la supériorité par rapport aux autres ouvrages.

3.7.5. Températures moyennes maximales sur ouvrage

Les températures les plus élevées sont enregistrées sur le pont de Beaumont sur Oise. Les valeurs les plus faibles sont obtenues à Calais. Voir figure 3.83.

Pour la journée la plus chaude, le 4 août, on mesure :

- 32,7°C à 22 heures, au PS 32
- 32,2°C à 23 heures, au pont de Calais
- 34,5°C à 21 heures 30, à Beaumont sur Oise

On remarque que pour le pont de Beaumont, la température moyenne de l'ouvrage a varié d'environ 10°C en l'espace d'une semaine (25°C le 29/7 et 34,5°C le 4/8).

3.7.6. Températures moyennes minimales sur ouvrage

Les graphes de ces températures sont représentés par la figure 3.84. Comme pour les températures maximales, c'est sur le pont de Calais que l'on enregistre les températures les plus basses. Ceci à cause de la faible inertie, relative, du pont. Par contre les valeurs les plus élevées sont obtenues au PS 32 à cause de la dalle qui est très massive.

3.7.7. Différence entre température moyenne du jour et température moyenne de la nuit

Cette différence, lorsqu'elle est importante, couplée à un ensoleillement intense donne, généralement un gradient de températures élevé.

TEMPERATURES MOYENNES EXTERIEURES

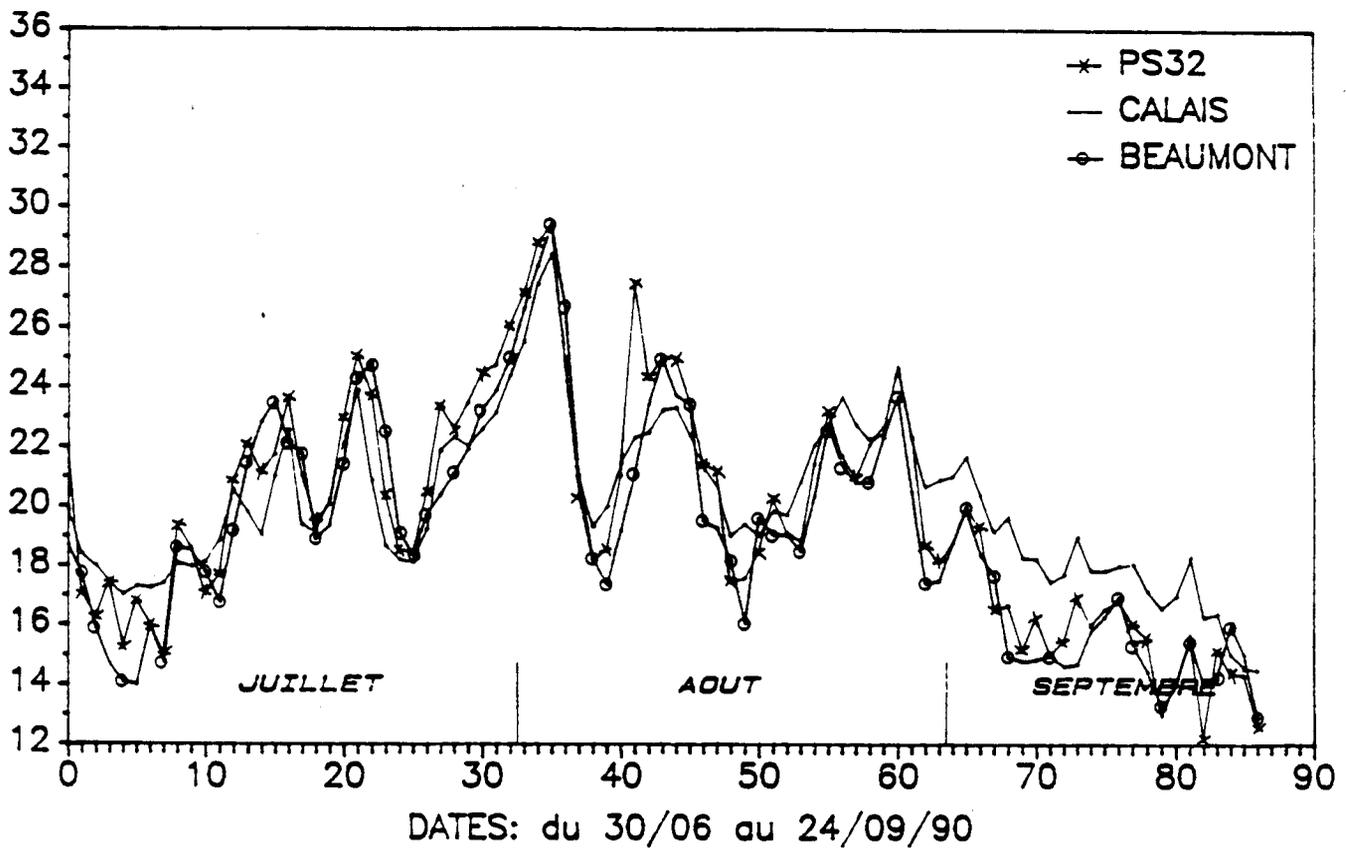


fig. 3.81

TEMPERATURES MOYENNES DE L'OUVRAGE

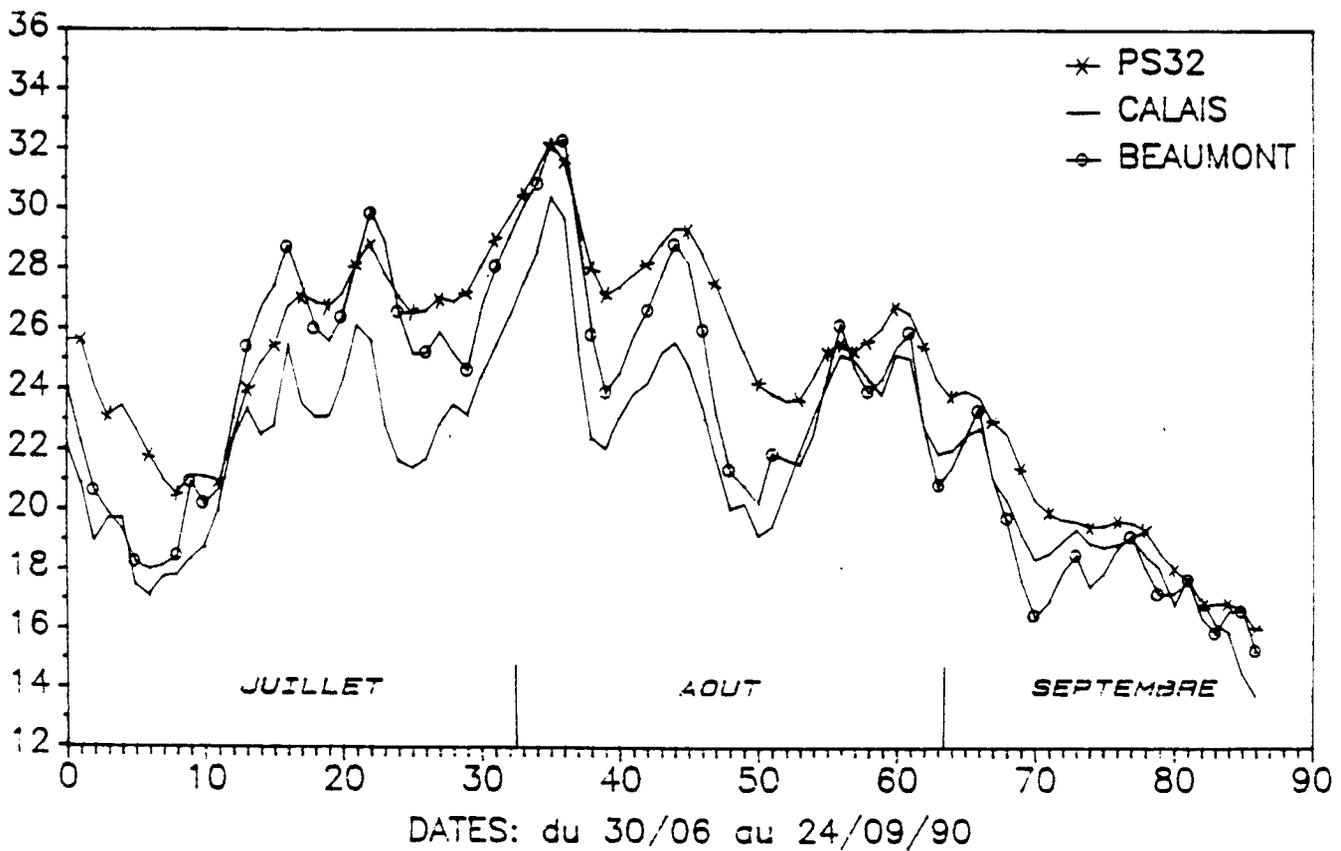


fig. 3.82

TEMPERATURES MAXIMALES DE L'OUVRAGE

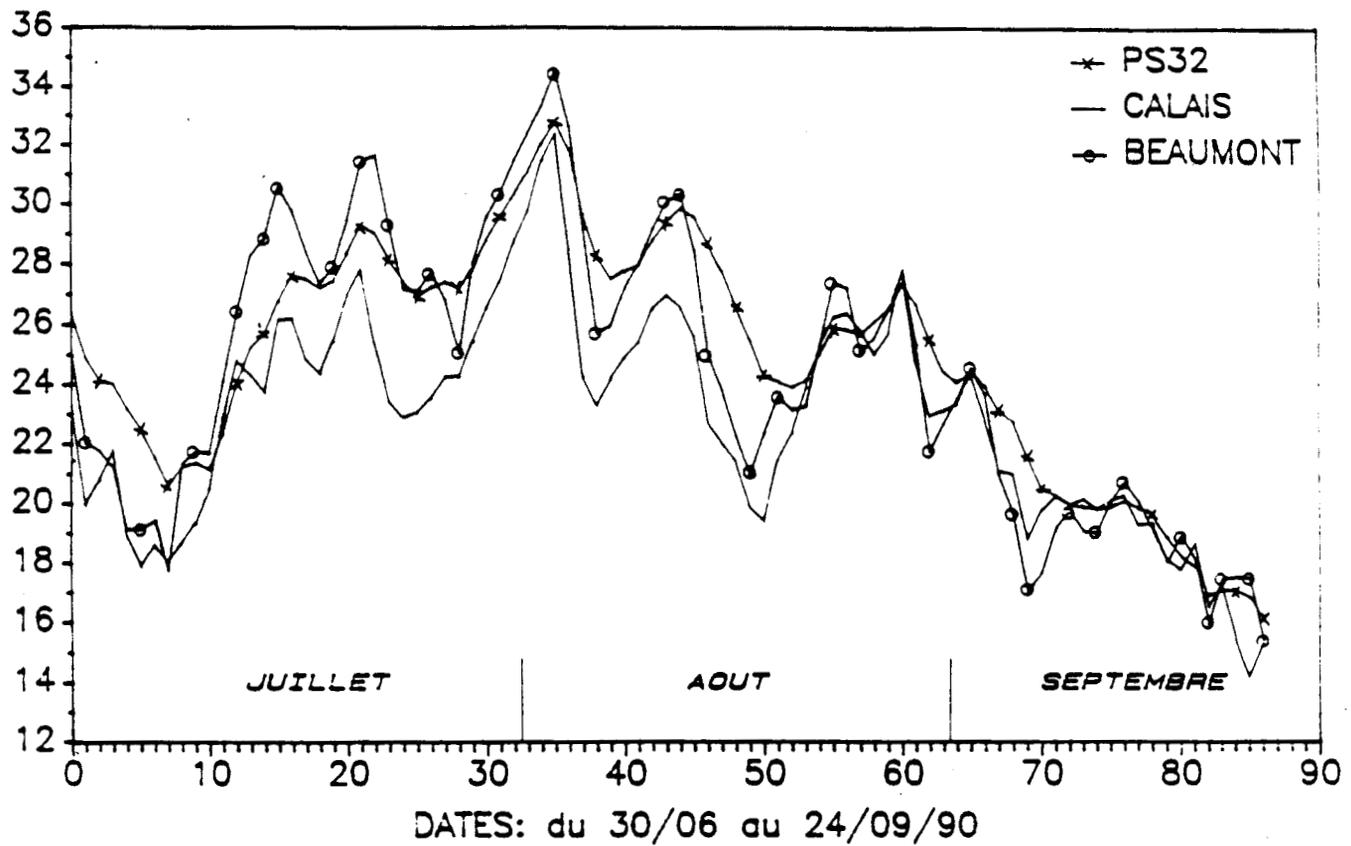


fig. 3.83

TEMPERATURES MINIMALES DE L'OUVRAGE

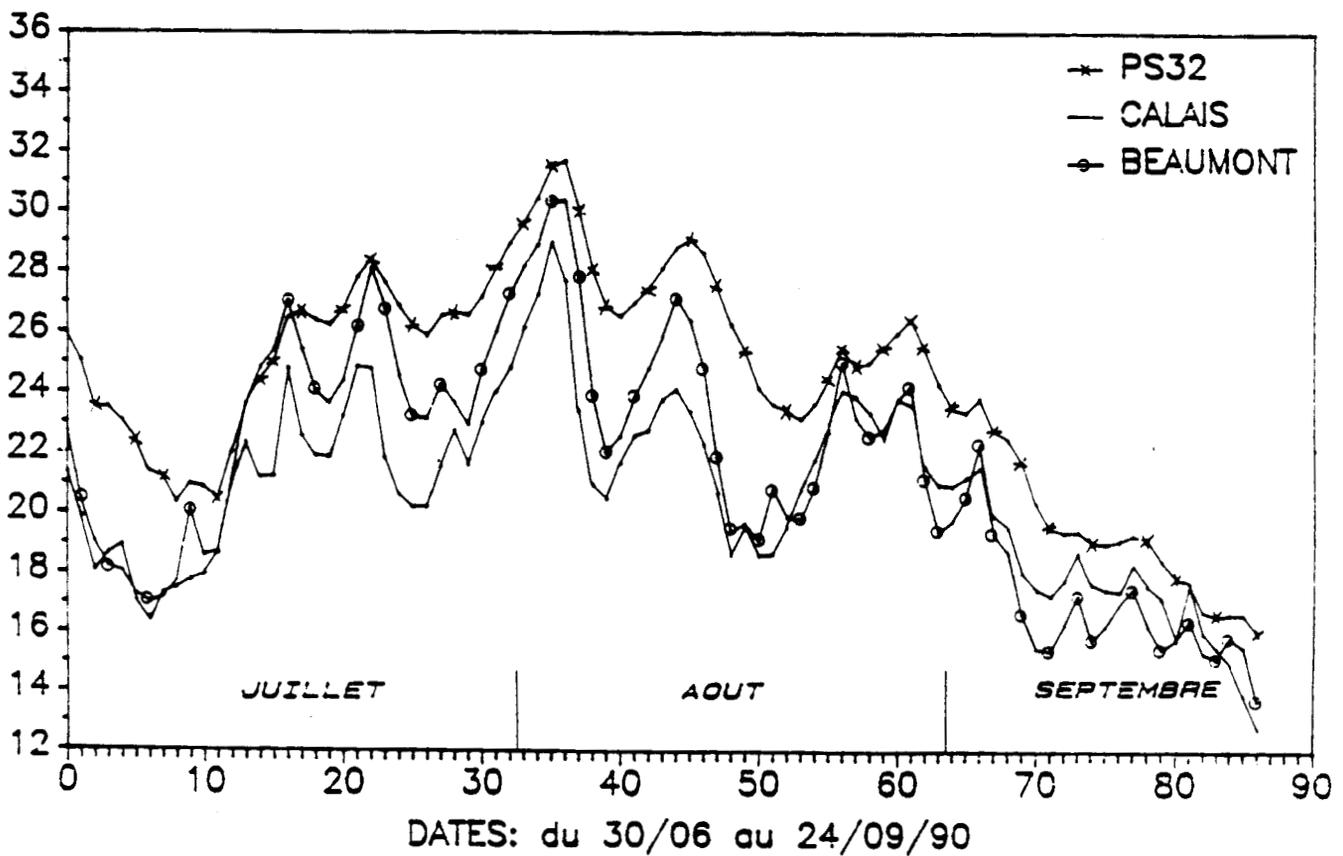


fig. 3.84

C'est au pont de Beaumont que l'amplitude de variation est la plus forte. Les valeurs les plus basses sont enregistrées au pont de Calais.

Les trois graphiques sont représentées par la figure 3.85.

3.7.8. Températures maximales relevées à la station météo de Lille-Lesquin

Une étude portant sur la comparaison des températures mesurées au PS 32 et à la station météorologique de Lille Lesquin (station la plus proche du site) a été faite pour les valeurs enregistrées du 30 juin au 24 septembre 1990.

Les graphiques représentant ces températures sont donnés par la figure 3.86.

Les températures mesurées sur l'ouvrage sont, en général, toujours supérieures à celles enregistrées à la station météo. L'écart type, calculé pour les 87 jours, est de 0,3°C.

La différence entre les deux températures est due, probablement, au fait que la sonde soit au voisinage de la dalle du pont et qui est de ce fait perturbée par le flux d'air créé par le déplacement des véhicules sous l'ouvrage.

DIFFERENCE ENTRE T° Jour et T° Nuit

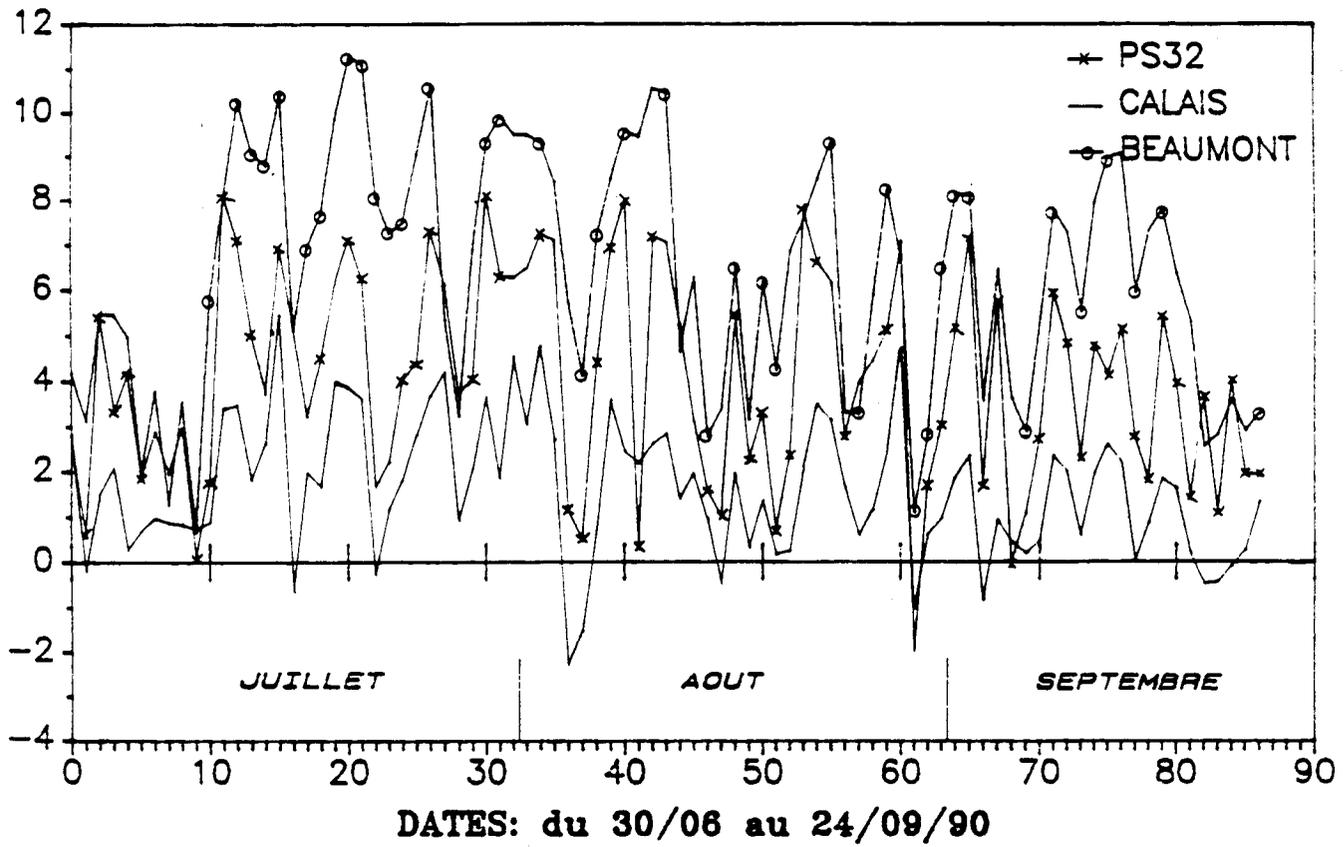


fig. 3.85

TEMPERATURES MAXIMALES

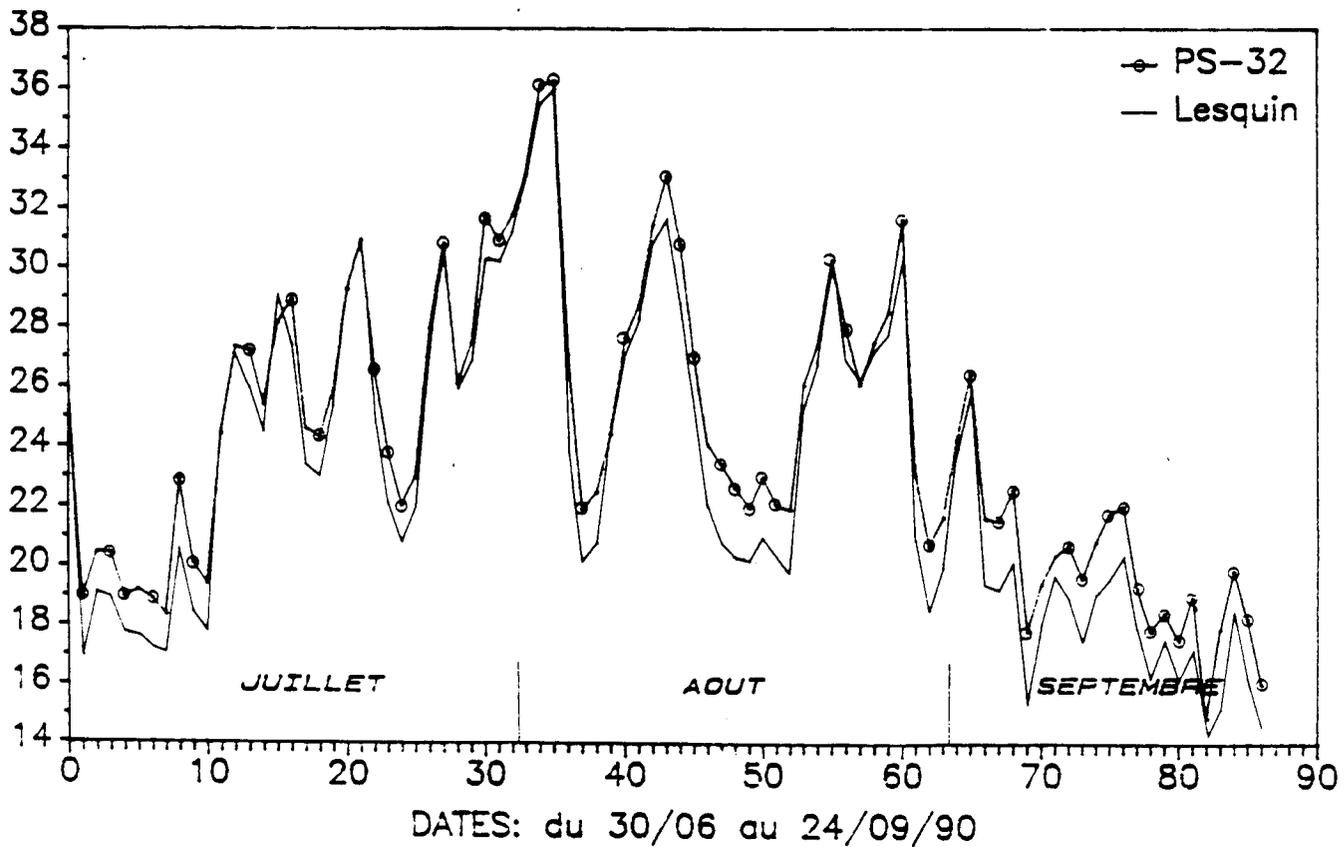


fig. 3.86

3.7.9. Evolution des gradients au cours de la journée

La figure 3.87 montre comment évoluent les gradients de températures au cours de la journée du 17.07.90 sur les trois ponts.

On remarque sur le PS 32 une faible amplitude de variation.

Beaumont sur Oise et le pont de Calais évoluent de la même façon mais avec un déphasage de trois heures environ.

Les deux ouvrages ont reçu la même énergie : 7220 Wh/m² pour Calais et 7250 Wh/m² pour Beaumont. Le déphasage est certainement dû à la différence des géométries des deux ponts et à leur orientation par rapport au soleil.

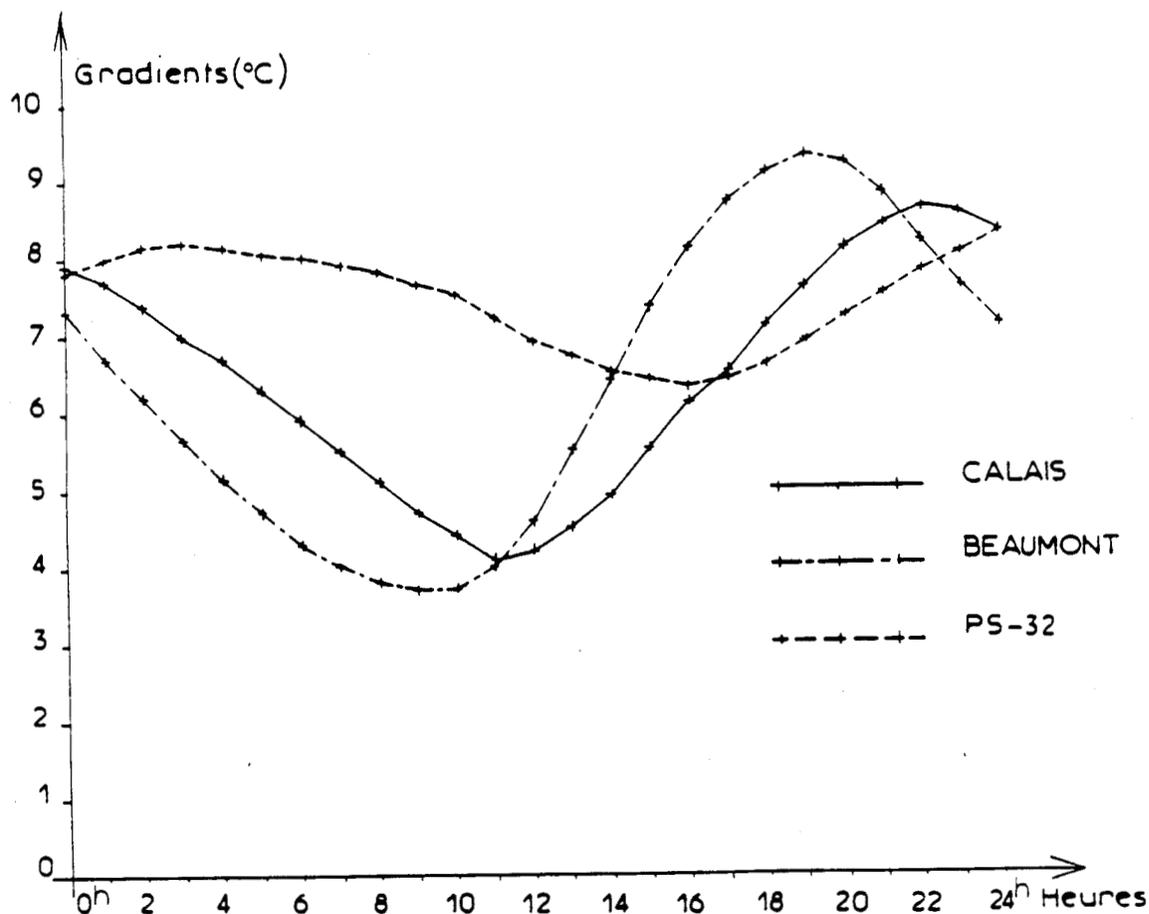


Fig. 3.87 - Evolution des gradients au cours de la journée du 17.07.90. .../...

3.8. Evolution des températures moyennes dans l'ouvrage au cours de la journée du 17 juillet 1990

Les graphiques de la figure 3.88 montrent que pour le PS 32 la variation de la température au cours de la journée est quasiment nulle.

Les températures des ponts de Beaumont et de Calais varient dans le même sens. Comme pour les gradients, on constate un déphasage de 4°C environ pour les températures. C'est le pont de Beaumont qui atteint les températures les plus élevées.

3.9. Etudes annexes

Plusieurs études qui portent sur les points suivants ont été réalisées :

1) Corrélations gradient thermique - effets météo

Des tentatives de corrélation entre le gradient thermique et certains paramètres météorologiques ont été réalisées (ensoleillement, température moyenne du jour, de la nuit). Les coefficients de corrélation obtenus sont peu satisfaisants : ils ne permettent pas la prévision précise des gradients thermiques à partir des paramètres météorologiques.

2) Validation d'un profil type

Le profil "idéal" serait donné par une courbe dont l'équation est de la forme :

$$T(y) = \Delta\theta(y/H)^n$$

H est la hauteur totale de la section

n est le coefficient qui permet de lisser au mieux la courbe.

Les différents résultats obtenus ainsi que les corrélations entre (T1-T3) et le gradient maximal nous ont conduit à opter pour un profil plus simplifié constitué uniquement par trois tronçons de droites.

3) Les différents enregistrements des déformations et des déplacements sur le viaduc Jules Verne ont montré que le coefficient de dilatation apparent du béton (α) est variable au cours de la journée.

Un extrait de ces résultats est donné en annexe.

4) Une étude sur les hourdis ventilés (tel le pont de Calais) a été envisagée. Elle devrait déboucher sur la proposition d'un profil valable, également, pour les ponts mixtes.

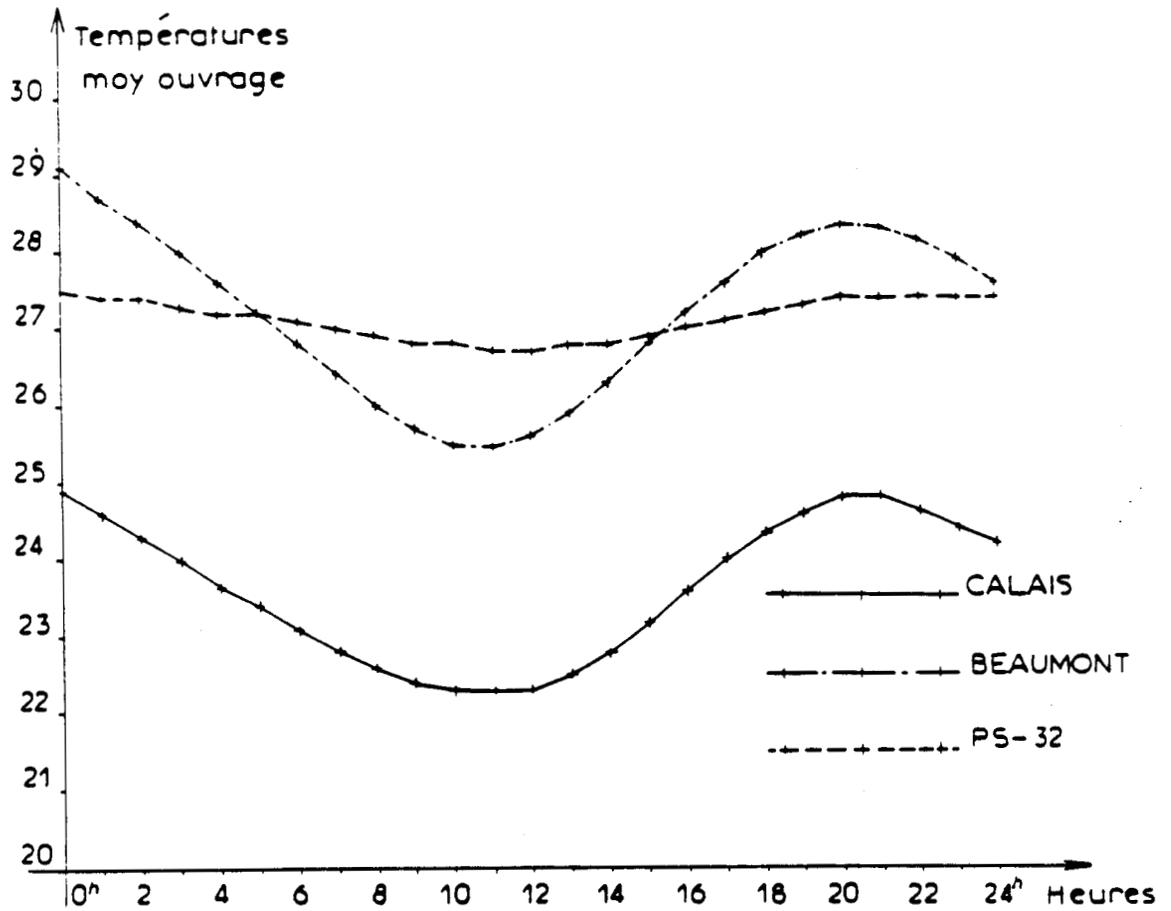


Fig. 3.88- Evolution des températures moyennes dans l'ouvrage (17.07.90)

MODELISATION PAR LA METHODE DES DIFFERENCES FINIES

Cette méthode, appliquée au hourdis supérieur du pont caisson de Beaumont sur Oise, va nous permettre de construire un modèle numérique qui servira, notamment, à étudier l'effet de certains paramètres, thermiques, géométriques et météorologiques.

Pour valider le modèle, nous avons réalisé plusieurs simulations comportant des conditions initiales différentes : les profils des températures initiales étaient, soit uniformes soit quelconques (tels qu'enregistrés à 8 heures in-situ).

Les conditions aux limites ont été les suivantes :

- Face supérieure du hourdis : on considère un flux de chaleur rentrant et des échanges par convection et par rayonnement
- Face inférieure du hourdis : nous avons considéré uniquement les échanges par convection, car les échanges par rayonnement sont minimes, du fait des faibles écarts de température entre le béton d'intrados et l'air ambiant.

L'utilisation du modèle soigneusement calé a pu donner d'intéressants résultats, en particulier sur l'influence de l'épaisseur des enrobés et de celle du hourdis.

4.1. Diffusion de la chaleur

L'équation de diffusion de la chaleur, en régime transitoire, est donnée par :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div} (\lambda \text{ grad } T) - r = 0$$

T = température

t = temps

ρ = masse volumique

C = coefficient de conductivité thermique

r = taux de production de chaleur interne

4.1.1. Echanges de chaleur

Dans un pont dalle, l'expérience montre que les températures dépendent essentiellement de l'ordonnée y. L'équation de la diffusion s'écrira donc :

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

4.1.2. Bilan solaire à la surface d'un pont

La chaleur reçue par rayonnement solaire n'est pas absorbée en totalité par le pont. Le bilan à la surface est schématisé par la figure 4.12a.

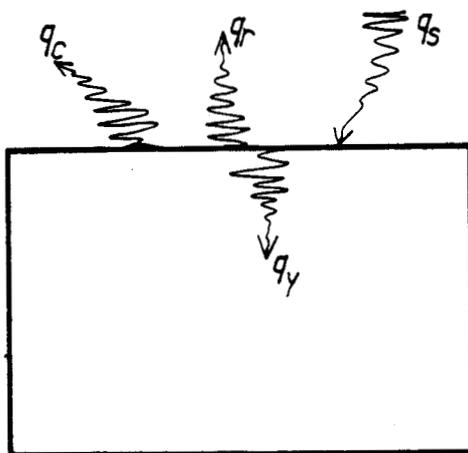


fig. : 4.12a - Bilan solaire

q_s = chaleur reçue par rayonnement solaire

q_y = chaleur transmise au pont

q_r = chaleur perdue par rayonnement du pont

q_c = chaleur perdue par convection.

.../...

4.1.2.1. Chaleur reçue par rayonnement solaire (q_s)

La quantité de chaleur reçue par rayonnement solaire est donnée par la relation :

$$q_s = \beta I_n$$

β = coefficient

I_n = intensité du rayonnement solaire.

La variation de l'intensité du rayonnement solaire pour une journée d'été ensoleillée est approximée par la fonction :

$$I(t) = \frac{2S}{T} \sin^2 a$$

$I(t)$ = intensité du rayonnement solaire au temps t (W/m^2)

S = rayonnement solaire global pour la journée (Wh/m^2)

T = longueur de la journée (heures)

a = $\frac{\pi t}{T}$

t = temps

En été, les différentes mesures effectuées montrent que l'ensoleillement débute à 6 heures et finit à 22 heures ce qui donne 16 heures pour la longueur de la journée.

Le graphe de la figure 4.12b montre un exemple d'enregistrement de l'intensité du rayonnement solaire pour la journée du 9.6.88 au viaduc Jules Verne à Amiens.

4.1.2.2. Chaleur perdue par convection (q_c)

La loi de Newton donne la quantité de chaleur échangée par unité de temps :

$$q_c = hc (T_p - T_a)$$

T_p = température de surface du pont

T_a = température de l'air hors couche limite

hc = coefficient d'échange par convection

Dans le cas où le vent est faible ou nul :

$$hc \approx 6W/m^2.k$$

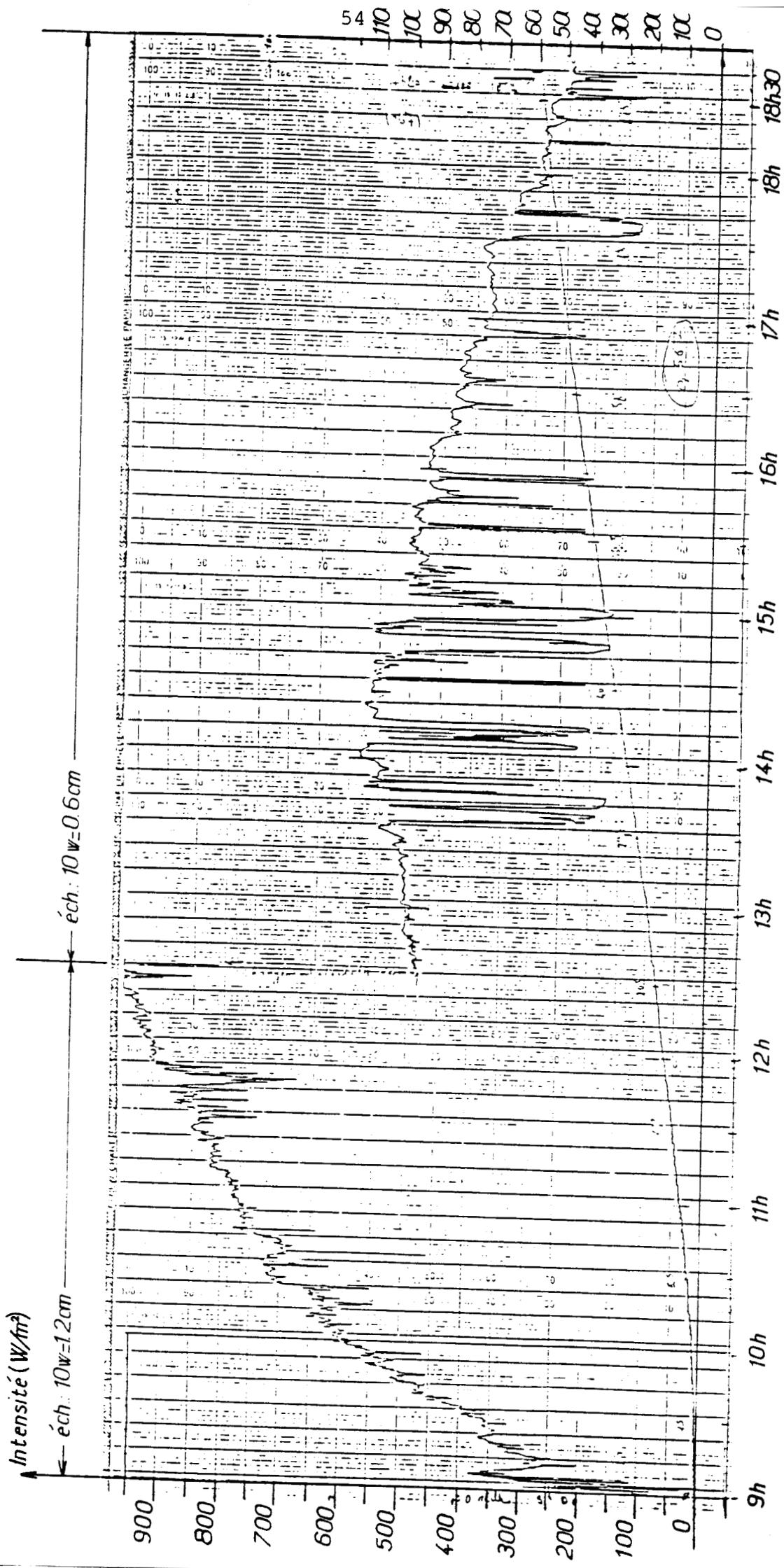


fig. 4-12b—Enregistrement de l'intensité du rayonnement solaire

4.1.2.3. Chaleur perdue par rayonnement de l'ouvrage

La quantité de chaleur échangée par rayonnement par unité de temps et de surface a pour expression :

$$q_r = \sigma \epsilon_p (T_p^4 - T_c^4)$$

T_p = température absolue de surface du pont ($^{\circ}K$)

T_c = température absolue de l'air ($^{\circ}K$)

ϵ_p = facteur d'émission du pont ($\epsilon_p = 0,9$)

σ = constante de Stéphan Boltzman ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$).

pour $T_c \neq T_p$, $q_r \neq A \times (T_p - T_c)$

Si nous faisons le bilan à la surface du pont, on aura :

face supérieure : $q_s - q_c - q_r + q_y = 0$

Soit $\alpha I_n - h_c (T_s - T_a) - \sigma \epsilon_p (T_p^4 - T_c^4) + \lambda \frac{\partial T}{\partial y} = 0$

face inférieure : $h_c (T_p - T_a) + \lambda \frac{\partial T}{\partial y} = 0$

4.2. Résolution par la méthode des différences finies

L'ouvrage à étudier est le hourdis supérieur du pont de Beaumont sur Oise. Le schéma 4.2a montre une coupe transversale du hourdis, les cotes sont en centimètres :

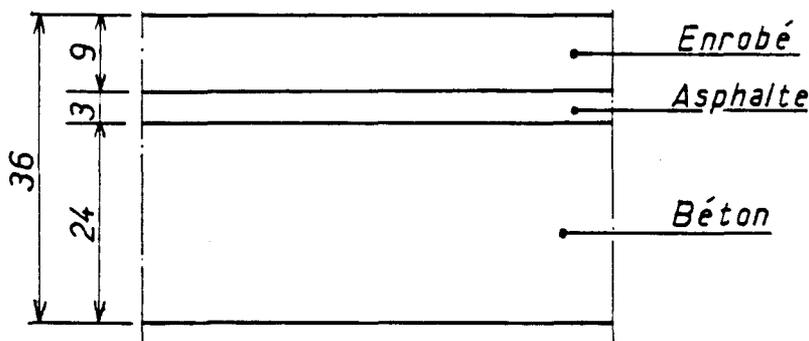


fig: 4-2a_coupe sur hourdis

4.2.1. Caractéristiques des matériaux

4.2.1.1. Dalle béton

$$\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda = 1 \text{ W/m}^{\circ}C$$

$$c = 800 \text{ J/kg}^{\circ}C$$

4.2.1.2. *Enrobé*

$$\begin{aligned} \rho &= 2500 \text{ kg/m}^3 \\ \lambda &= 1,2 \text{ W/m}^\circ\text{C} \\ c &= 936 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

4.2.1.3. *Asphalte*

$$\begin{aligned} \rho &= 2200 \text{ kg/m}^3 \\ \lambda &= 1 \text{ W/m}^\circ\text{C} \\ c &= 864 \text{ J/kg}^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

4.2.2. Calcul des températures dans le hourdis

Dans la résolution des équations différentielles par la méthode des différences finies, on remplace les dérivés par les différences correspondantes :

$$\frac{\partial T(y, t)}{\partial y} \approx \frac{T(y+h, t) - T(y, t)}{h}$$

$$\frac{\partial^2 T(y, t)}{\partial y^2} \approx \frac{T(y+h, t) - 2T(y, t) + T(y-h, t)}{h^2}$$

de même :

$$\frac{\partial T(y, t)}{\partial t} \approx \frac{T(y, t+1) - T(y, t)}{1}$$

En considérant une grille formée par des droites, on détermine les valeurs approchées des solutions aux noeuds de cette grille. Introduisons les notations :

$$\begin{aligned} y &= ih & i &= 1, 2, \dots \\ t &= kl & k &= 1, 2, \dots \\ T(ih, kl) &= T_{i, k} \end{aligned}$$

Pour le point (ih, kl) , l'équation :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$$

devient :

$$\frac{T_{i, k+1} - T_{i, k}}{1} = a^2 \frac{T_{i+1, k} - 2T_{i, k} + T_{i-1, k}}{h^2}$$

$$a^2 = \frac{\lambda}{\rho c} = \text{diffusivité}$$

.../...

Soit :

$$T_{i,k+1} = \left(1 - \frac{2a^2 l}{h^2}\right) T_{i,k} + a^2 \frac{l}{h^2} (T_{i+1,k} + T_{i-1,k})$$

avec :

$$l \leq \frac{h^2}{2a^2} \text{ (domaine de validité de la méthode)}$$

4.2.2.1. Application au hourdis supérieur du pont de Beaumont

Le hourdis est subdivisé en couches de 3 centimètres d'épaisseur. La figure 4.2 b schématise le hourdis avec les différentes couches.

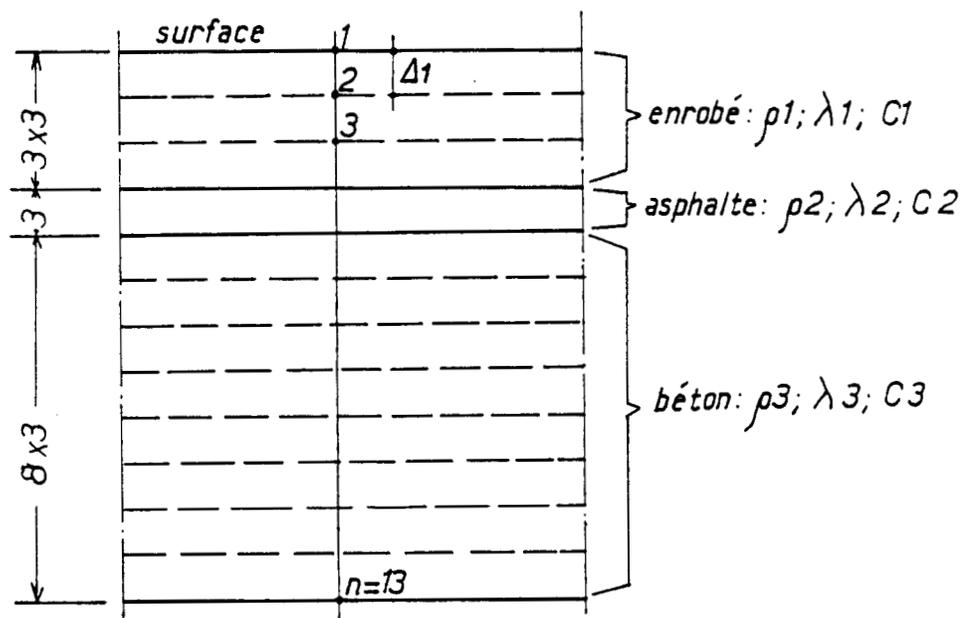


fig. : 4.2b - Subdivision du hourdis en couches

Les équations à résoudre sont :

Première couche :

$$\beta In - hc_1 (T_p - T_a) - \sigma \epsilon_p (T_p^4 - T_c^4) + \lambda_1 \frac{(4 T_2 - T_3 - 3 T_1)}{2 \Delta_1} = 0$$

Dernière couche :

$$hc_3 (T_m - T_a) + \lambda_3 \frac{(4 T_{n-1} - T_{n-2} - 3 T_n)}{2 \Delta_m} = 0$$

.../...

Point j à l'interface de la couche i et de la couche i + 1

$$\lambda_i \frac{T_{j-2} - 3 T_j - 4 T_{j-1}}{2 \Delta_i} = \lambda_{i+1} \frac{4 T_{j+1} - 3 T_j - T_{j+2}}{2 \Delta_{i+1}}$$

Noeud i de la couche j

$$\frac{\lambda_j}{2 \Delta_j^2} \left[(T_{i+1} + T_{i-1} - 2 T_i) + (T_{Ni+1} + T_{Ni-1} - 2 T_{Ni}) \right] - \frac{\rho_j c_j}{\Delta t} (T_i - T_{Ni}) = 0$$

Δ_i = épaisseur des couches

$\Delta_{\text{béton}} = 3 \text{ cm}$ - $\Delta_{\text{enrobé}} = 2,58 \text{ cm}$ - $\Delta_{\text{asphalte}} = 2,63 \text{ cm}$

TN = température du noeud pour $t = 0$

Δt = incrément de temps : $t = 300$ secondes.

Hypothèse 1 :

Les 2 couches constituées par l'enrobé et l'asphalte ne comportent pas de sondes de température. Au temps $t = 0$ (soit à 8 heures), nous avons dû extrapoler les valeurs des températures à partir du champ régnant dans la dalle de béton.

Hypothèse 2 :

Les coefficients thermiques des matériaux (λ et c) ainsi que les coefficients d'échanges avec le milieu extérieur sont choisis parmi des valeurs courantes utilisées dans les calculs thermiques.

Le coefficient d'échange par convection est, par exemple, calculé en supposant la vitesse du vent nulle (cas le plus défavorable).

Hypothèse 3 :

Au cours de la journée, l'évolution de la température extérieure n'est pas facile à simuler par une courbe simple. Nous avons, là aussi, apporté quelques simplifications au problème en considérant que la température varie linéairement de 8 H à 20 H.

Hypothèse 4 :

Plusieurs simulations avec la méthode des différences finies ont permis d'évaluer la valeur du coefficient β qui détermine la quantité non immédiatement réfléchie de la chaleur reçue par rayonnement solaire

($q_s = \beta I_n$). Cette valeur est estimée à environ 0,63 pour le cas du pont de Beaumont sur Oise.

Les graphiques représentant l'évolution des températures au cours du temps sont donnés par les figures 4.2c et 4.2d pour les journées du 8.07.90 et du 15.07.90.

Au temps $t = 0$, le champ de température imposé est celui mesuré in-situ sur l'ouvrage.

La journée du 8.07.90 a été choisie car au temps $t = 0$ (8 heures du matin) le champ de température est uniforme sur la hauteur du hourdis.

Pour la journée du 15.07.90 (gradient thermique maximum) le champ de température initial est quelconque (celui effectivement mesuré à 8 heures).

Les valeurs des températures aux 13 noeuds sont données par les tableaux 4.1 et 4.2. Le pas de temps pour les calculs est $t = 300$ secondes. Les tableaux affichent les valeurs des températures de 8 heures à 20 heures et ce toutes les demi-heures. En dernière colonne, le chiffre exprime le bilan des flux reçus par la surface des enrobés (en W/m^2) au cours de la dernière demi-heure considérée.

4.3. Comparaison des résultats

Les graphes des figures 4.2c et 4.2d montrent que la modélisation donne de bons résultats pour les régimes de 17 heures et de 20 heures. Pour les régimes avant 17 heures les valeurs données par la méthode numérique sont légèrement différentes des valeurs mesurées.

On peut expliquer ces décalages par l'approximation faite sur certains paramètres (les coefficients λ et C des différents matériaux) et surtout, par l'incertitude sur le champ de température initial dans les enrobés (non instrumentés).

4.4. Application du modèle à l'étude des effets de quelques paramètres

Les graphiques de ces résultats sont donnés en annexe 4. Pour l'épaisseur du hourdis on constate qu'au delà de 30 cm, elle n'influe plus sur la différence ($T_1 - T_3$).

Par contre, l'épaisseur des enrobés a une influence très importante sur ($T_1 - T_3$).

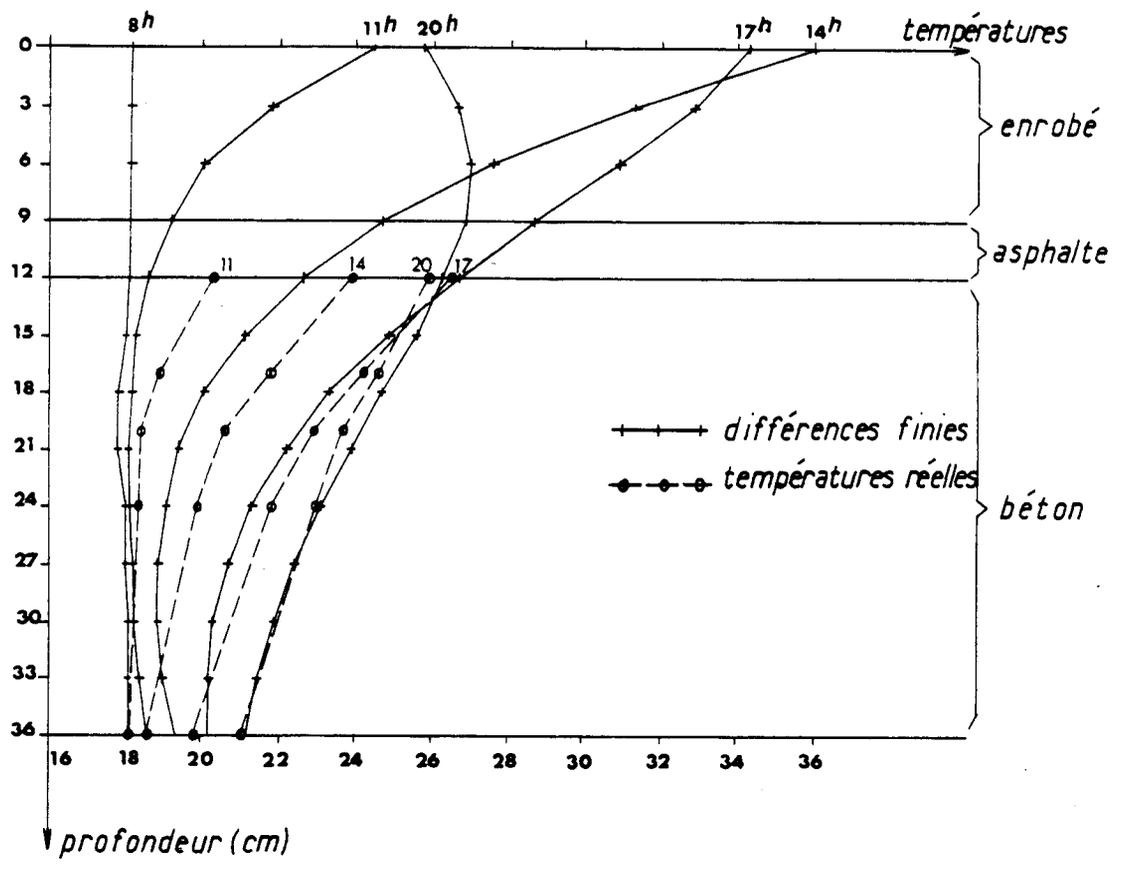


fig. 4 - 2c - Evolution des températures. Journée du 8/7/90

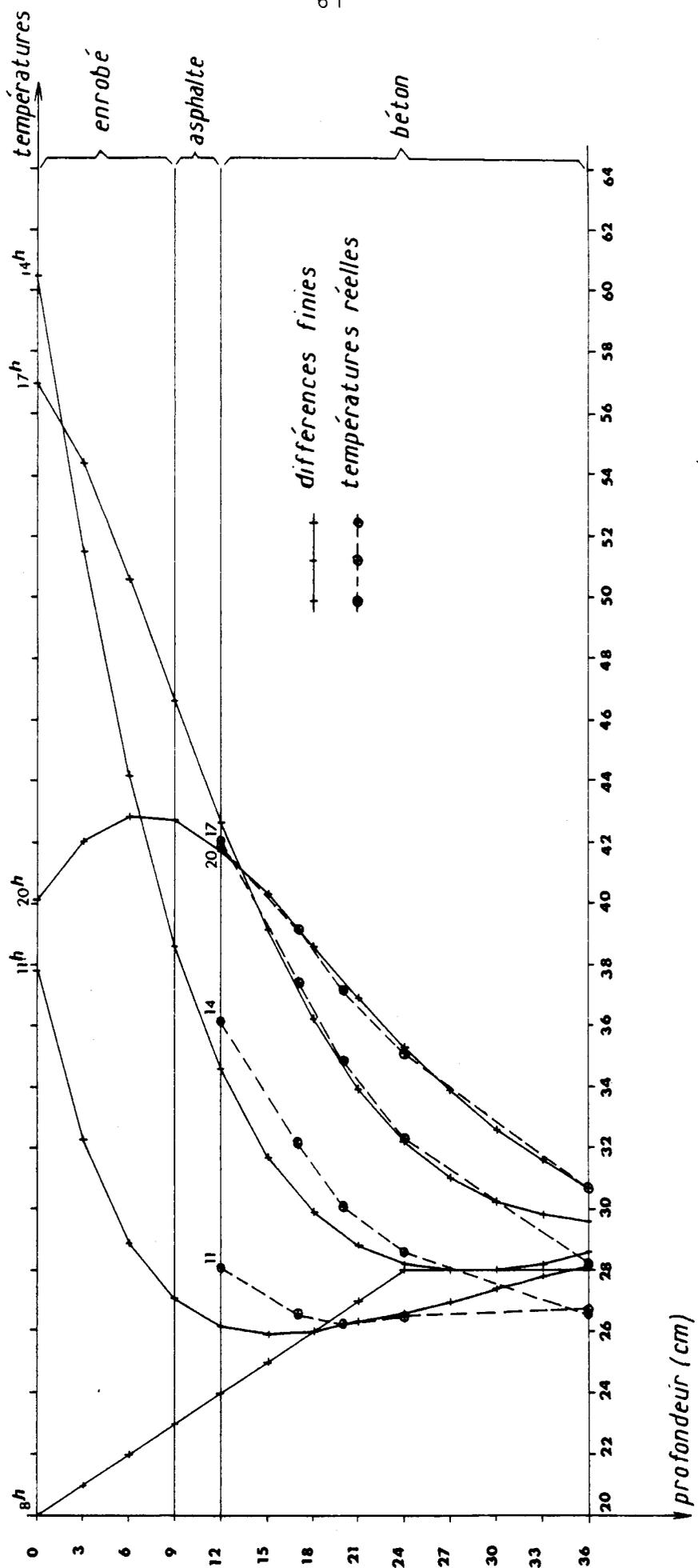


fig. 4-2d — Evolution des températures . Journée du 15/7/90

TABLEAU 4.1

18.1	18.1	18.1	18.1	18.1	18.0	17.8	17.8	18.0	18.0	18.1	18.1	18.1	18.1	
18.2	18.1	18.1	18.1	18.0	18.0	17.9	17.9	18.0	18.0	18.1	18.1	18.1	18.2	7
18.7	18.3	18.2	18.1	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.1	18.1	18.2	18.4	24
19.6	18.8	18.3	18.2	18.1	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.1	18.2	18.3	18.5	49
20.9	19.5	18.7	18.3	18.2	18.1	18.0	18.0	18.0	18.1	18.1	18.2	18.4	18.6	80
22.5	20.5	19.3	18.7	18.3	18.2	18.1	18.1	18.1	18.1	18.2	18.3	18.5	18.7	114
24.5	21.8	20.1	19.2	18.6	18.3	18.2	18.1	18.1	18.2	18.2	18.4	18.6	18.9	148
26.6	23.3	21.2	19.8	19.0	18.6	18.3	18.2	18.2	18.2	18.3	18.5	18.7	19.0	180
28.8	24.9	22.3	20.6	19.5	18.9	18.5	18.4	18.3	18.3	18.4	18.6	18.8	19.1	207
30.9	26.7	23.6	21.6	20.2	19.3	18.8	18.5	18.4	18.4	18.5	18.7	18.9	19.2	228
32.9	28.4	25.0	22.6	20.9	19.8	19.2	18.8	18.6	18.6	18.6	18.8	19.0	19.4	240
34.6	29.9	26.3	23.6	21.7	20.4	19.6	19.1	18.8	18.7	18.8	18.9	19.1	19.5	243
36.0	31.3	27.6	24.7	22.6	21.1	20.1	19.4	19.1	18.9	18.9	19.0	19.3	19.6	237
36.9	32.5	28.7	25.7	23.5	21.8	20.6	19.8	19.4	19.1	19.1	19.2	19.4	19.7	221
37.3	33.3	29.7	26.7	24.3	22.5	21.2	20.3	19.7	19.4	19.3	19.4	19.6	19.9	196
37.2	33.7	30.4	27.5	25.1	23.2	21.8	20.7	20.1	19.7	19.5	19.6	19.7	20.0	165
36.6	33.8	30.8	28.1	25.7	23.8	22.3	21.2	20.5	20.0	19.8	19.8	19.9	20.1	129
35.6	33.5	31.0	28.5	26.3	24.4	22.9	21.7	20.9	20.3	20.1	20.0	20.0	20.2	91
34.3	32.9	30.9	28.7	26.7	24.9	23.3	22.2	21.3	20.7	20.3	20.2	20.2	20.4	53
32.7	32.0	30.5	28.8	27.0	25.2	23.8	22.6	21.7	21.0	20.6	20.4	20.4	20.5	17
31.0	30.9	30.0	28.6	27.1	25.5	24.1	23.0	22.0	21.3	20.9	20.6	20.6	20.6	-14
29.4	29.8	29.3	28.3	27.0	25.7	24.4	23.3	22.4	21.7	21.2	20.9	20.7	20.7	-37
27.9	28.6	28.5	27.9	26.9	25.7	24.6	23.5	22.6	21.9	21.4	21.1	20.9	20.9	-53
26.7	27.6	27.7	27.4	26.6	25.7	24.7	23.7	22.9	22.2	21.7	21.3	21.1	21.0	-58
25.8	26.7	27.0	26.9	26.3	25.6	24.7	23.9	23.1	22.4	21.9	21.5	21.2	21.1	-54

TABLEAU 4.2

20.0	21.0	22.0	23.0	24.0	25.0	26.0	27.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	
23.4	22.5	22.5	23.1	24.0	25.0	25.9	26.7	27.4	27.7	27.9	28.0	28.0	28.1	67
25.2	23.8	23.4	23.6	24.2	25.0	25.8	26.5	27.1	27.5	27.8	27.9	28.0	28.2	89
27.5	25.3	24.3	24.2	24.5	25.0	25.7	26.3	26.9	27.3	27.6	27.9	28.1	28.3	130
30.3	27.2	25.5	24.9	24.9	25.2	25.7	26.2	26.7	27.2	27.5	27.8	28.1	28.3	183
33.8	29.5	27.1	25.9	25.4	25.5	25.8	26.2	26.7	27.1	27.4	27.8	28.1	28.4	244
37.8	32.3	28.9	27.1	26.2	25.9	26.0	26.3	26.6	27.0	27.4	27.8	28.1	28.5	306
42.0	35.4	31.1	28.5	27.1	26.5	26.3	26.4	26.7	27.0	27.4	27.8	28.2	28.6	365
46.4	38.8	33.6	30.3	28.3	27.2	26.8	26.7	26.8	27.1	27.4	27.8	28.2	28.7	415
50.7	42.2	36.2	32.2	29.6	28.1	27.3	27.0	27.0	27.2	27.5	27.9	28.3	28.8	452
54.6	45.6	39.0	34.3	31.2	29.2	28.1	27.5	27.3	27.4	27.6	28.0	28.4	28.8	473
57.9	48.7	41.7	36.5	32.8	30.4	28.9	28.1	27.7	27.6	27.8	28.1	28.5	28.9	477
60.5	51.5	44.2	38.6	34.5	31.7	29.9	28.8	28.2	28.0	28.0	28.2	28.6	29.0	462
62.2	53.7	46.4	40.6	36.3	33.1	30.9	29.5	28.7	28.3	28.3	28.4	28.7	29.1	430
63.0	55.2	48.3	42.5	37.9	34.5	32.0	30.4	29.3	28.8	28.6	28.6	28.8	29.2	381
62.8	56.1	49.7	44.1	39.4	35.8	33.1	31.3	30.0	29.3	28.9	28.9	29.0	29.3	319
61.6	56.2	50.5	45.3	40.7	37.1	34.2	32.2	30.7	29.8	29.3	29.2	29.2	29.3	248
59.6	55.6	50.9	46.1	41.8	38.2	35.3	33.0	31.5	30.4	29.8	29.5	29.4	29.4	172
57.0	54.4	50.6	46.6	42.6	39.1	36.2	33.9	32.2	31.0	30.2	29.8	29.6	29.5	96
53.9	52.6	50.0	46.6	43.1	39.8	37.0	34.7	32.9	31.6	30.7	30.1	29.8	29.6	26
50.6	50.5	48.9	46.3	43.3	40.3	37.6	35.4	33.5	32.1	31.1	30.4	30.0	29.7	-35
47.3	48.2	47.5	45.6	43.2	40.6	38.1	35.9	34.1	32.7	31.6	30.8	30.2	29.8	-81
44.3	45.9	45.9	44.8	42.9	40.7	38.5	36.4	34.6	33.1	32.0	31.1	30.4	29.8	-112
41.9	43.8	44.3	43.7	42.4	40.6	38.6	36.7	35.0	33.5	32.3	31.3	30.6	29.9	-123
40.1	42.0	42.8	42.7	41.7	40.3	38.6	36.9	35.3	33.9	32.6	31.6	30.7	30.0	-116

Températures dans les noeuds de 8 heures à
20 heures, toutes les 30 minutes (8/7/90).

PROPOSITION D'UN PROFIL DE CALCUL

L'exploitation des résultats enregistrés nous a permis de distinguer deux grands types d'ouvrages :

- 1) Les ponts dalles
- 2) Les ponts à hourdis

La distribution des températures au moment du gradient maximal dans les ponts dalles peut être considérée comme linéaire. La différence de température entre les deux faces de la dalle est plus importante pour les dalles minces (hourdis supérieurs des caissons) que pour les dalles massives.

Pour les ponts à hourdis (ponts caissons, ponts à poutres et ponts à nervures), la distribution correspondant au gradient maximal n'est pas linéaire.

C'est pour ce type d'ouvrages que nous proposons un profil de calcul, simple mais réaliste. En effet, contrairement au profil préconisé par la réglementation en vigueur, le profil de calcul que nous proposons permet de mettre en évidence les déformations gênées.

Les résultats obtenus permettent d'envisager les points suivants :

- Abandon de la prescription d'un gradient forfaitaire et unique ($\Delta\theta = 12^\circ\text{C}$).
- Adoption d'un profil de températures type, très simple.
- Calcul par le bureau d'études du gradient efficace correspondant, dépendant de la géométrie de la section.
- Estimation des effets thermiques sur la base d'un module de déformation tenant compte de la superposition de deux gradients : le gradient installé et le gradient journalier, ou "instantané".

5.1. Profil de température type

On distingue deux catégories d'ouvrages :

- les ponts-dalles
- les ponts à hourdis (ponts en caisson, ponts à poutres ou à nervures).

5.1.1. Ponts-dalles

Les mesures réalisées au PS 32 ont montré que les gradients maximaux correspondent à une distribution quasi-linéaire sur la hauteur de la section. Dans ce cas, il est inutile de calculer le gradient efficace, puisque égal à la différence de température entre la fibre supérieure et la fibre inférieure de la dalle.

5.1.2. Pont à hourdis

Le profil des températures le plus simple, mais qui reste réaliste est représenté par la figure 5.12a. Il est construit à partir de deux différences de température : (T1-T2) qui est la différence de température entre les faces du hourdis et (T1-T3), qui est la différence de température totale sur la hauteur de la section.

La figure 5.12c représente 2 graphes :

- le graphe des gradients thermiques calculés à partir des températures données par toutes les sondes implantées dans l'ouvrage.
- le graphe des gradients thermiques calculés à partir, seulement, des valeurs des températures données par trois sondes : la sonde en face supérieure du pont, la sonde en face inférieure du hourdis supérieur et la sonde en face inférieure du hourdis supérieur et la sonde en face inférieure du pont.

Les écarts entre les valeurs données par les deux graphes sont très faibles (la moyenne des écarts est nulle). Notre option de conserver (T1-T3) et (T1-T2) comme seuls paramètres caractérisant le champ de température est justifiée par ces résultats.

5.1.2.1. *Evaluation des paramètres h1 et h2*

Les paramètres h1 et h2 représentent, respectivement, l'épaisseur du hourdis et la hauteur du gousset supérieur de la section (voir schéma de la figure 5.12a).

Il conviendrait cependant de limiter ces deux paramètres à des fourchettes de valeurs raisonnables, par exemple :

h1 est l'épaisseur du hourdis, sans dépasser 30 cm
 h2 est la hauteur du gousset,
 avec : $50 \text{ cm} \leq h1 + h2 \leq 70 \text{ cm}$.

5.2. Echelle du profil de température

Les valeurs à donner à (T1-T3) et à (T1-T2) sont différentes selon qu'il s'agit d'un pont dalle ou d'un pont à hourdis.

5.2.1. Ponts-dalles

La valeur maximale, de (T1-T3), mesurée pendant l'été 1990 est de 8,6°C. Un complément d'étude analytique est à faire, pour cerner les conditions les plus défavorables vis à vis du gradient. Il semble dès à présent qu'il soit difficile de mesurer plus de 10°C.

5.2.2. Ponts à hourdis

La valeur maximale de (T1-T3), mesurée pour Beaumont, est de 18,5°C et ce dans des conditions relativement exceptionnelles (température maximale de 44,8°C mesurée dans le béton et température moyenne dans la section s'élevant à 34,5°C). Un calcul analytique systématique ultérieur est nécessaire pour caractériser cette valeur, mais on imagine difficilement pouvoir dépasser 20°C dans les pires conditions.

.../...

PROFIL TYPE POUR PONTS A HOURDIS

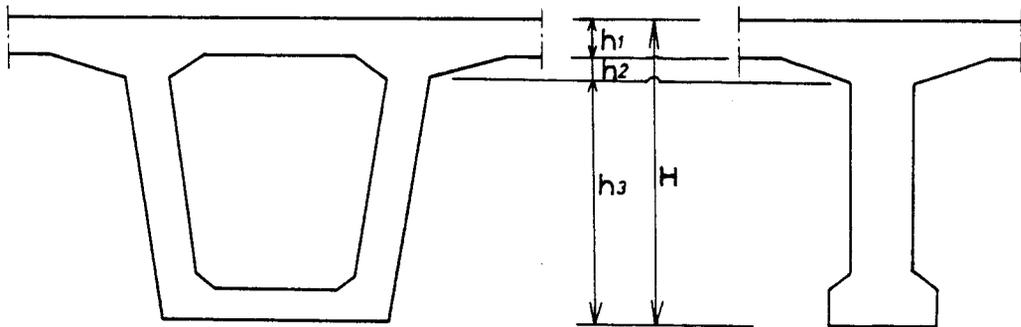
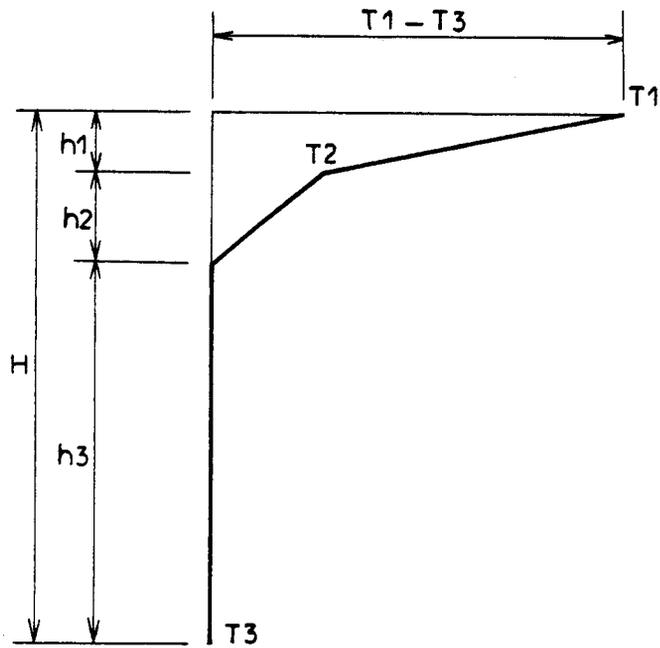


fig. 5-12a

PROFIL DE CALCUL POUR PONTS A HOURDIS

BEAUMONT sur OISE
Gradients et différences de températures

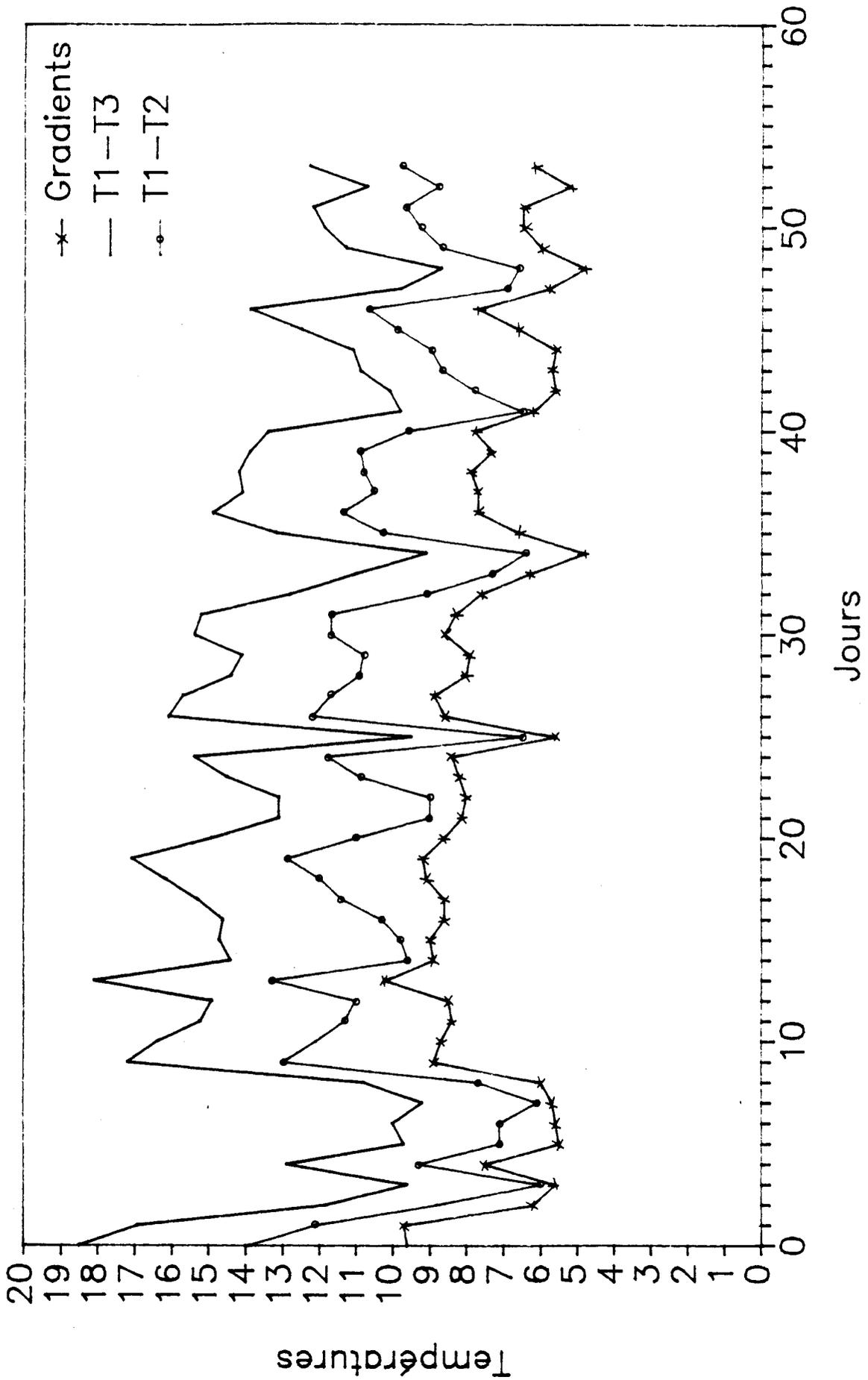


fig. 5-12b

Gradient	T1-T3	T1-T2	Estimatio	Difference
9.60	18.50	13.90	10.16	0.56
9.70	16.90	12.10	9.69	-0.01
8.20	11.80	8.80	8.52	0.32
5.60	9.60	6.00	6.10	0.50
7.50	12.90	9.30	7.35	-0.15
5.50	9.70	7.10	5.45	-0.05
5.60	10.00	7.10	5.77	0.17
5.70	9.20	6.10	5.60	-0.10
6.00	10.80	7.70	6.21	0.21
8.90	17.20	13.00	9.39	0.49
8.70	16.40	12.10	9.16	0.46
8.40	15.20	11.30	8.43	0.03
8.50	14.90	11.00	8.32	-0.18
10.20	18.10	13.30	10.15	-0.05
8.90	14.40	9.60	8.75	-0.15
9.00	14.70	9.80	8.93	-0.07
8.60	14.60	10.30	8.48	-0.12
8.60	15.30	11.40	8.47	-0.13
9.10	16.20	12.00	9.02	-0.08
9.20	17.10	12.90	9.36	0.16
8.60	14.90	11.00	8.32	-0.28
8.10	13.10	9.00	7.77	-0.33
8.00	13.10	9.00	7.77	-0.23
8.20	14.50	10.90	7.96	-0.24
8.40	15.40	11.80	8.30	-0.10
5.60	9.50	6.50	5.65	0.05
8.60	16.10	12.20	8.77	0.17
8.90	15.70	11.70	8.69	-0.21
8.00	14.40	10.90	7.85	-0.15
7.90	14.10	10.80	7.60	-0.30
8.60	15.40	11.70	8.37	-0.23
8.30	15.20	11.70	8.15	-0.15
7.60	12.80	9.10	7.38	-0.22
6.30	11.00	7.30	6.70	0.40
4.80	9.10	6.40	5.29	0.49
6.60	13.20	10.30	6.98	0.38
7.70	14.90	11.40	8.04	0.34
7.70	14.10	10.50	7.81	0.11
7.90	14.20	10.80	7.71	-0.19
7.30	13.90	10.90	7.32	0.02
7.80	13.40	9.60	7.68	-0.12
6.20	9.80	6.50	5.97	-0.23
5.60	10.10	7.80	5.39	-0.21
5.70	10.90	8.70	5.63	-0.07
5.60	11.10	9.00	5.64	0.04
6.60	12.50	9.90	6.51	-0.09
7.70	13.90	10.70	7.46	-0.24
5.80	9.80	6.90	5.69	-0.11
4.80	8.70	6.60	4.73	-0.07
6.00	11.30	8.70	6.06	0.06
6.50	11.90	9.30	6.28	-0.22
6.50	12.20	9.70	6.33	-0.17
5.20	10.70	8.80	5.35	0.15
6.20	12.30	9.80	6.37	0.17

Gradient

REGRESSION LINEAIRE MULTIPLE

Variable dépendante:

Variable	Paramètre Standard T pour H0:		
	Moyenne Estimation	Erreur	paramètre=0
Intercepte	-0.02	0.18	-0.10
T1-T3	13.27	1.07	19.77
T1-T2	9.83	-0.69	-10.16

Source	DF	Somme de Carrés	Moyenne Carrée	F-Valeur
Modèle	2.00	104.98	52.49	884.30
Erreur	51.00	3.03	0.06	
Total	53.00	108.01		

7.39

Moyenne dépendante

Erreur par moindres carrés

0.24

Coefficient de variation

3.30

Racine-carrée

0.972

R-carrée ajustée

0.971

REATION:

$$\text{Gradient} = -0.02 + 1.07(T1-T3) - 0.69(T1-T2)$$

BEAUMONT sur OISE--REGRESSION LINEAIRE

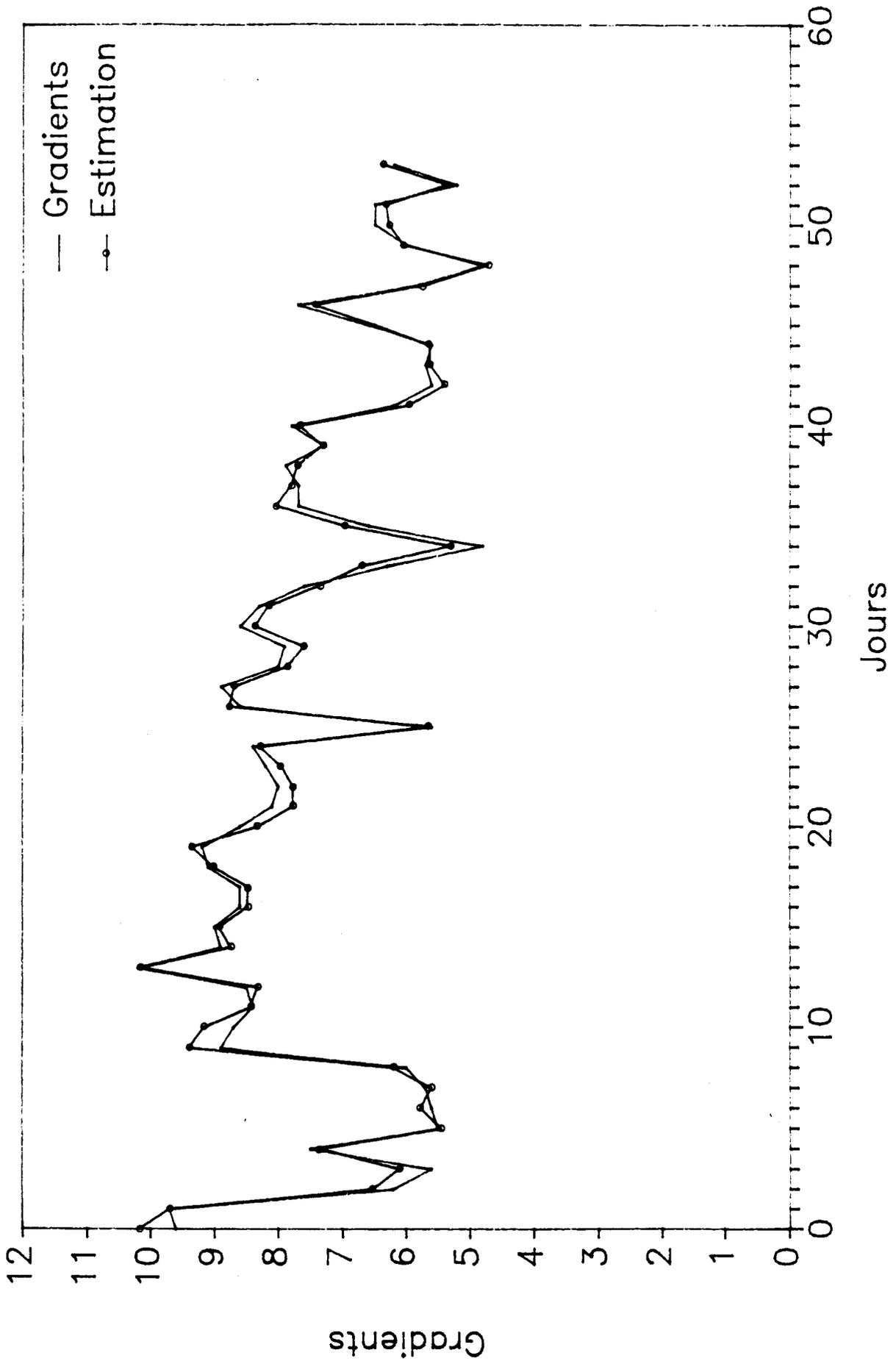


fig. 5-12c

Une corrélation a montré par ailleurs que la valeur de (T_1-T_2) pouvait être estimée à partir de (T_1-T_3) . Nous avons obtenu pour le pont de Beaumont sur Oise un rapport de $(T_1-T_2)/(T_1-T_3)$ égal à 0,85. Ainsi, dès lors que (T_1-T_3) est fixé, c'est l'ensemble de la distribution de température simplifiée qui est connue.

5.3. Calcul des effets thermiques - Module de déformation

5.3.1. Béton non traditionnel

Il s'agit essentiellement du béton "léger" de structure ($\rho \neq 1800 \text{ kg/m}^3$).

Jusqu'alors, on prêtait à ce matériau des caractéristiques propres à engendrer des gradients thermiques supérieurs à ceux du béton de granulats traditionnels. Un examen attentif des paramètres couramment admis pour le béton léger (λ, ρ, C), ainsi que les résultats de la modélisation montrent que finalement, béton léger et béton traditionnel sont le siège de gradients très peu différents.

Les résultats obtenus, en comparant les répartitions des températures correspondant aux deux matériaux béton, sont donnés par la figure 5.31.

5.3.2. Gradient installé - Gradient journalier

On définit par gradient installé le gradient de température minimal obtenu au cours de la journée : les variations au cours du temps du gradient installé sont très lentes.

Le gradient journalier est donné par la différence entre ce gradient minimal et le gradient maximal obtenu au cours de la journée.

Le tableau des pages 73 et 74 indique les valeurs de ces deux gradients ($P =$ gradient installé ; $S =$ gradient journalier). Si nous considérons, pour le calcul des effets thermiques, un module de déformation instantané pour le gradient journalier et un module "différé" pour le gradient installé on obtient ce que l'on pourrait appeler le gradient "instantané équivalent" :

$$\text{soit } G \text{ équiv.} = G_{\text{min}}/3 + S$$

Pour être dans la sécurité on pourrait prendre :

$$G \text{ équiv.} = G_{\text{min}}/2 + S$$

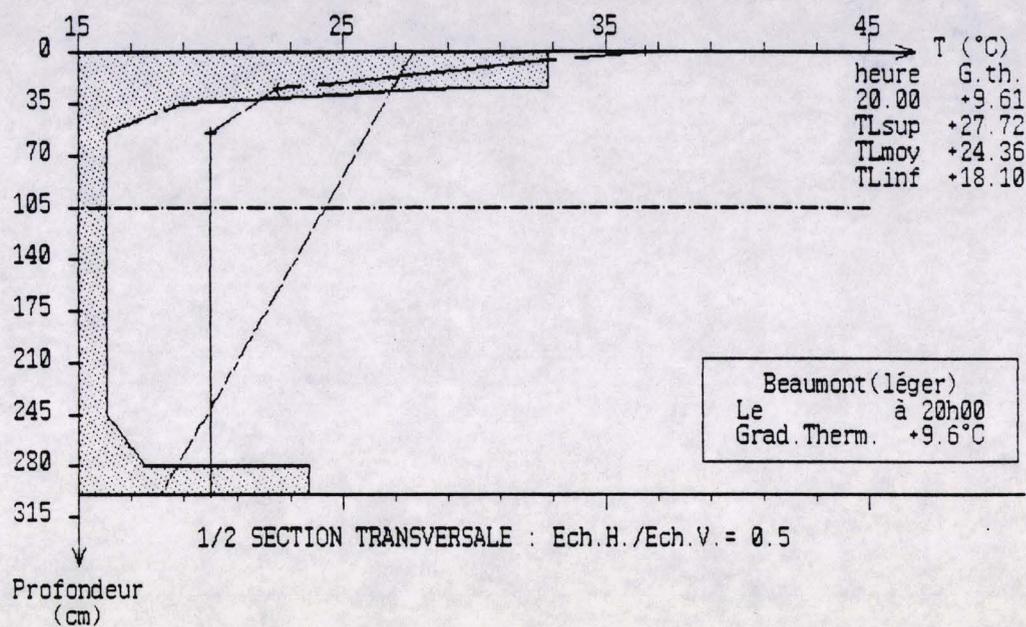


fig: 5-31a - DISTRIBUTION POUR UN BETON LEGER

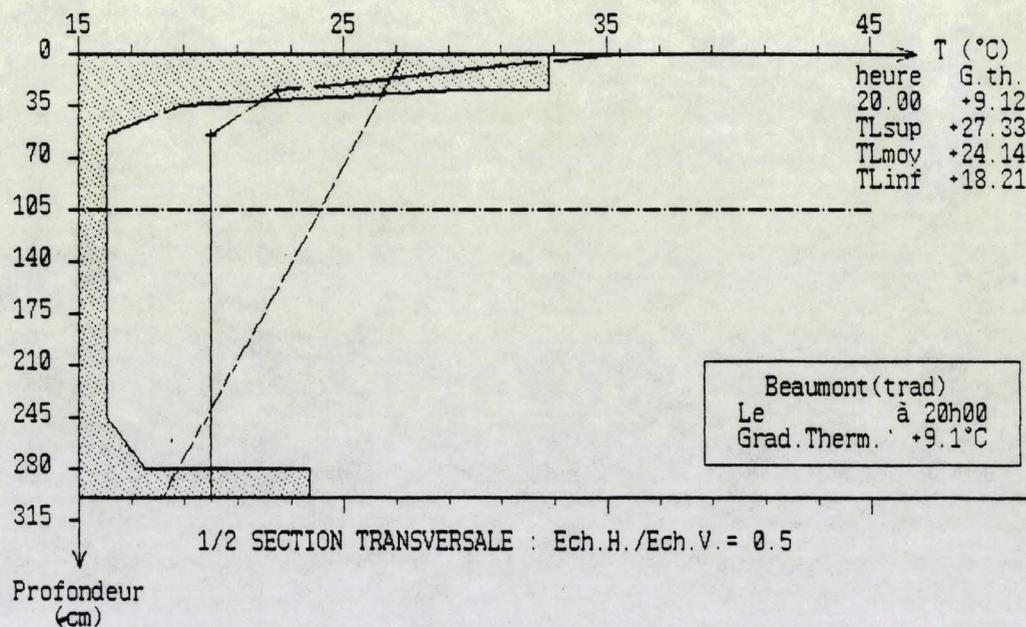


fig: 5-31 b - DISTRIBUTION POUR UN BETON TRADITIONNEL

---BEAUMONT---

Date	P	S	P/3+S	P/2+S	
29/06/90	3.86	6.03	7.32	7.96	
	3.03	3.35	4.36	4.87	
	1.87	4.65	5.27	5.59	
	2.45	5.30	6.12	6.53	
	2.24	3.37	4.12	4.49	
	1.19	3.72	4.12	4.32	
	0.55	5.18	5.36	5.46	
	0.74	5.08	5.33	5.45	
	0.74	2.09	2.34	2.46	
	0.46	3.21	3.36	3.44	
	0.90	3.70	4.00	4.15	
	1.49	0.21	0.71	0.96	
	0.60	3.34	3.54	3.64	
	1.51	4.15	4.65	4.91	
	1.34	4.92	5.37	5.59	
	1.15	8.41	8.79	8.99	
	15/07/90	2.81	6.23	7.17	7.64
		3.03	5.61	6.62	7.13
		3.08	5.79	6.82	7.33
		2.47	8.18	9.00	9.42
4.50		4.77	6.27	7.02	
3.66		5.61	6.83	7.44	
2.37		6.62	7.41	7.81	
2.15		6.89	7.61	7.97	
2.41		6.93	7.73	8.14	
2.83		6.90	7.84	8.32	
3.57		5.45	6.64	7.24	
2.91		5.55	6.52	7.01	
2.49		5.78	6.61	7.03	
1.50		7.19	7.69	7.94	
2.04		6.87	7.55	7.89	
30/07/90	2.69	6.17	7.07	7.52	
	1.77	3.90	4.49	4.79	
	0.71	8.15	8.39	8.51	
	2.38	6.83	7.62	8.02	
	3.16	5.10	6.15	6.68	
	3.02	6.00	7.01	7.51	
	2.76	5.39	6.31	6.77	
	2.84	6.13	7.08	7.55	
	3.28	5.64	6.73	7.28	
	3.02	5.52	6.53	7.03	
	2.18	5.55	6.28	6.64	
	0.79	6.10	6.36	6.50	
	0.27	7.14	7.23	7.28	
	1.33	6.89	7.33	7.56	
	1.96	6.21	6.86	7.19	
	2.52	5.68	6.52	6.94	
	2.43	5.72	6.53	6.94	
	2.54	5.51	6.36	6.78	
	2.40	5.41	6.21	6.61	
	1.53	4.71	5.22	5.48	
	-0.18	4.61	4.55	4.52	
	-0.46	5.05	4.90	4.82	

	0.88	3.66	3.95	4.10
	0.33	3.52	3.63	3.69
	1.26	4.57	4.99	5.20
24/08/90	1.34	4.79	5.24	5.46
	1.38	4.87	5.33	5.56
	1.63	5.20	5.74	6.02
	1.71	6.15	6.72	7.01
	2.79	4.95	5.88	6.35
	0.88	5.02	5.31	5.46
	1.51	4.87	5.37	5.63
01/09/90	1.82	4.96	5.57	5.87
	1.91	4.87	5.51	5.83
	1.75	4.90	5.48	5.78
	0.34	4.34	4.45	4.51
	0.34	4.73	4.84	4.90
	0.39	5.18	5.31	5.38
	0.79	5.67	5.93	6.07
	2.16	4.14	4.86	5.22
	0.24	4.29	4.37	4.41
	0.55	2.57	2.75	2.85
	0.06	2.23	2.25	2.26
	-0.55	3.44	3.26	3.17
	-0.47	5.47	5.31	5.24
	0.21	4.93	5.00	5.04
	1.10	3.86	4.23	4.41
15/09/90	-0.26	4.89	4.80	4.76
	0.50	4.79	4.96	5.04
	0.45	4.88	5.03	5.11
	0.67	4.41	4.63	4.75
	0.06	5.54	5.56	5.57
	0.25	5.08	5.16	5.21
	0.52	4.75	4.92	5.01
	1.01	4.03	4.37	4.54
	-0.05	2.27	2.25	2.25
	0.07	3.56	3.58	3.60
	0.61	2.73	2.93	3.04
	-0.27	3.09	3.00	2.96
27/09/90	-0.75	3.14	2.89	2.77

Les graphiques des figures 5.2 montrent le résultat du calcul du gradient équivalent pour les trois ponts.

On remarque une différence très nette entre le PS 32 et les deux autres ouvrages : les gradients minimaux (gradients installés) sont plus élevés pour le PS 32, mais le supplément de gradient qui constitue le gradient journalier, est bien plus faible que pour les deux autres ponts.

Finalement, le gradient "instantané équivalent" est peu élevé sur cet ouvrage. L'examen du graphe correspondant montre que la valeur de ce gradient se situe autour de 5°C, au maximum.

Pour les ponts à hourdis, comme Beaumont et Calais, cette valeur est nettement supérieure. On atteint ainsi 9°C dans le cas du pont de Beaumont.

Le rapport entre ces gradients "instantanés équivalents" et les gradients estimés à partir de (T1-T3) et (T1-T2) est compris entre 0,8 et 0,9 pour le pont de Beaumont. Il est de 0,6, environ dans le cas du PS 32.

Des études ultérieures sont cependant nécessaires pour affiner les valeurs de ces coefficients qui permettent de pondérer le gradient maximal en gradient réellement efficace du point de vue de ses effets mécaniques.

GRAPHES DES GRADIENTS
"INSTANTANES" EQUIVALENTS

BEAUMONT-----GRADIENTS THERMIQUES

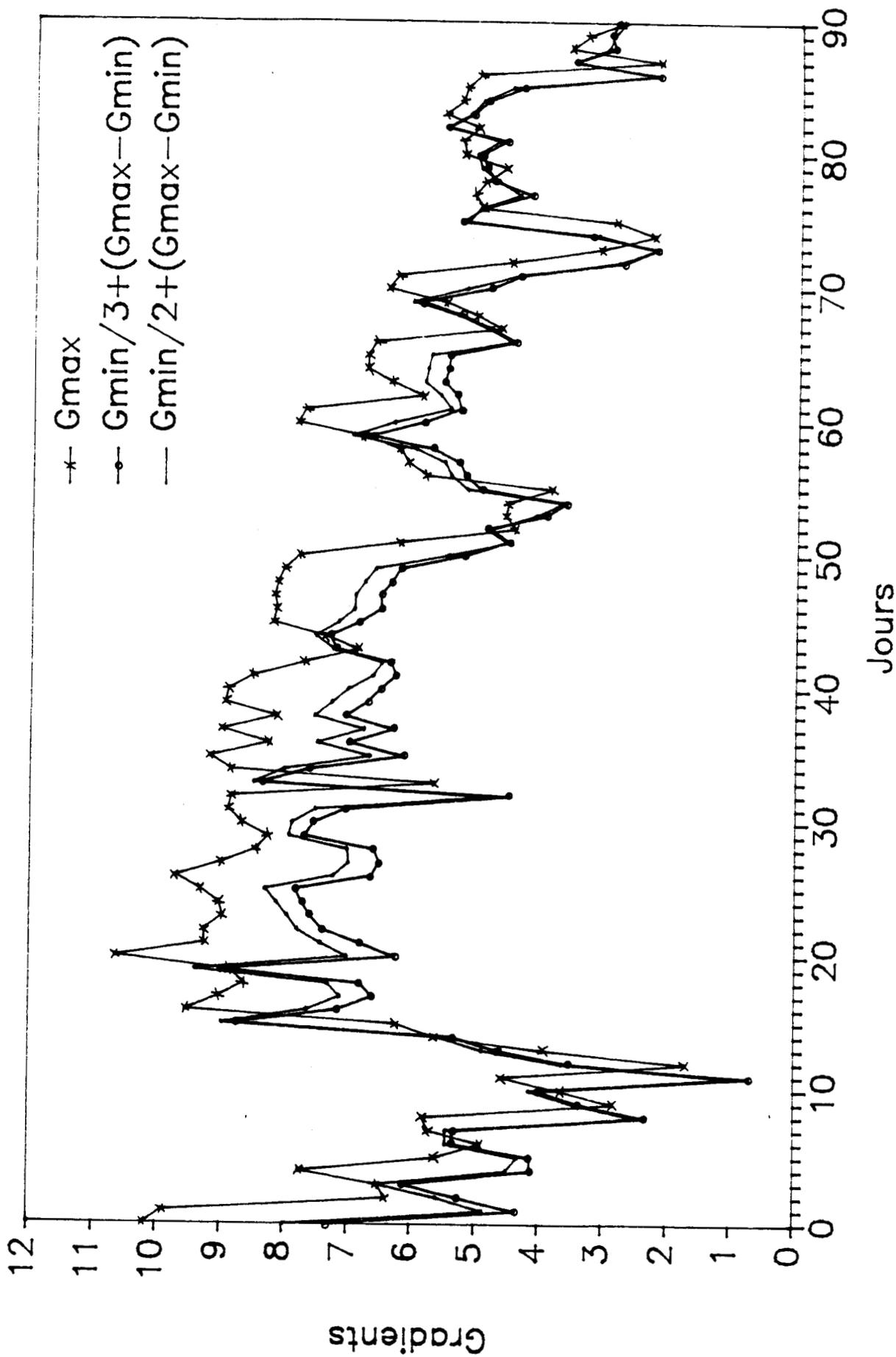


fig.: 5-32a

CALAIS --- GRADIENTS THERMIQUES

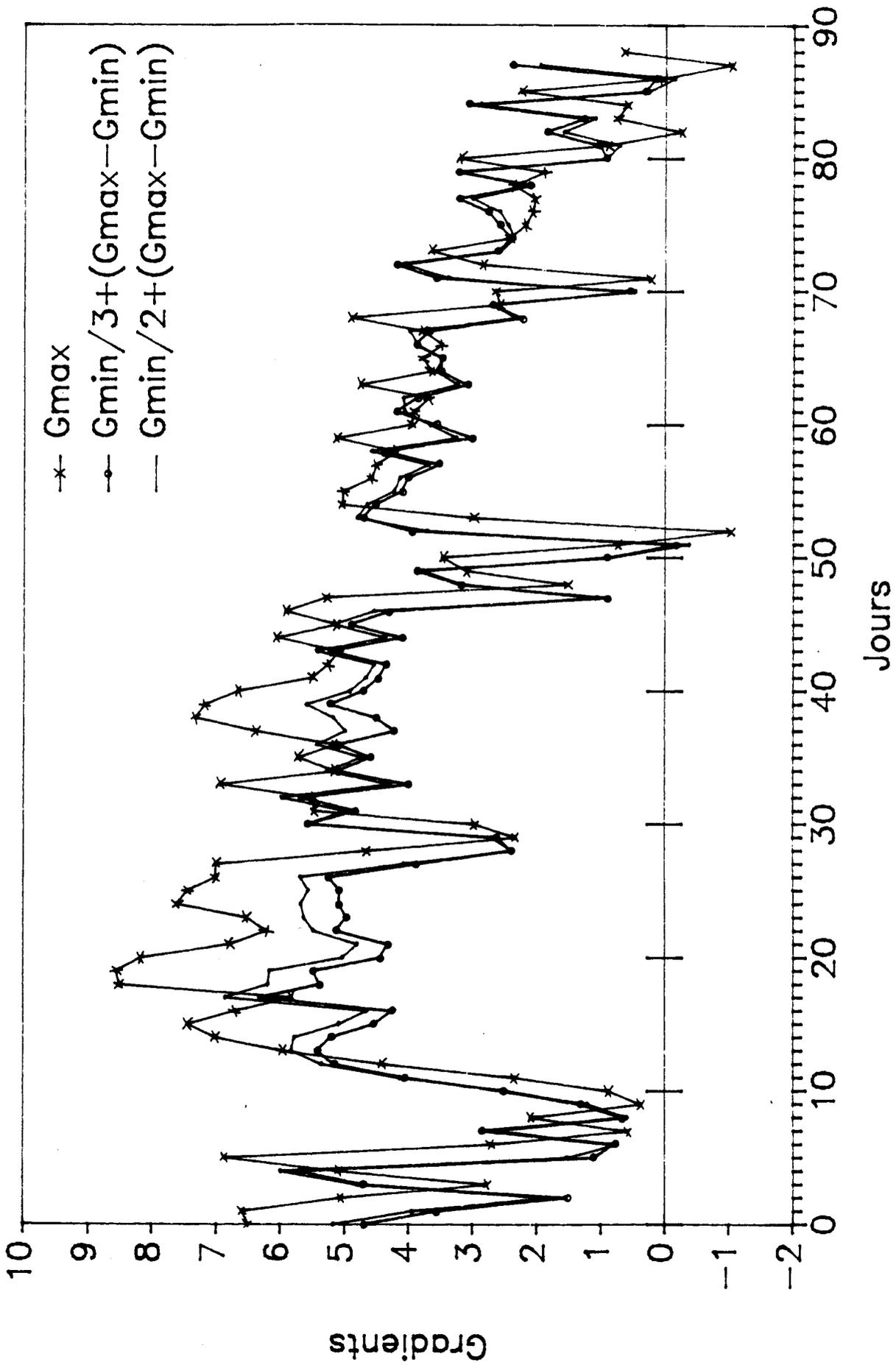


fig. 5-32b

PS-32 GRADIENTS THERMIQUES

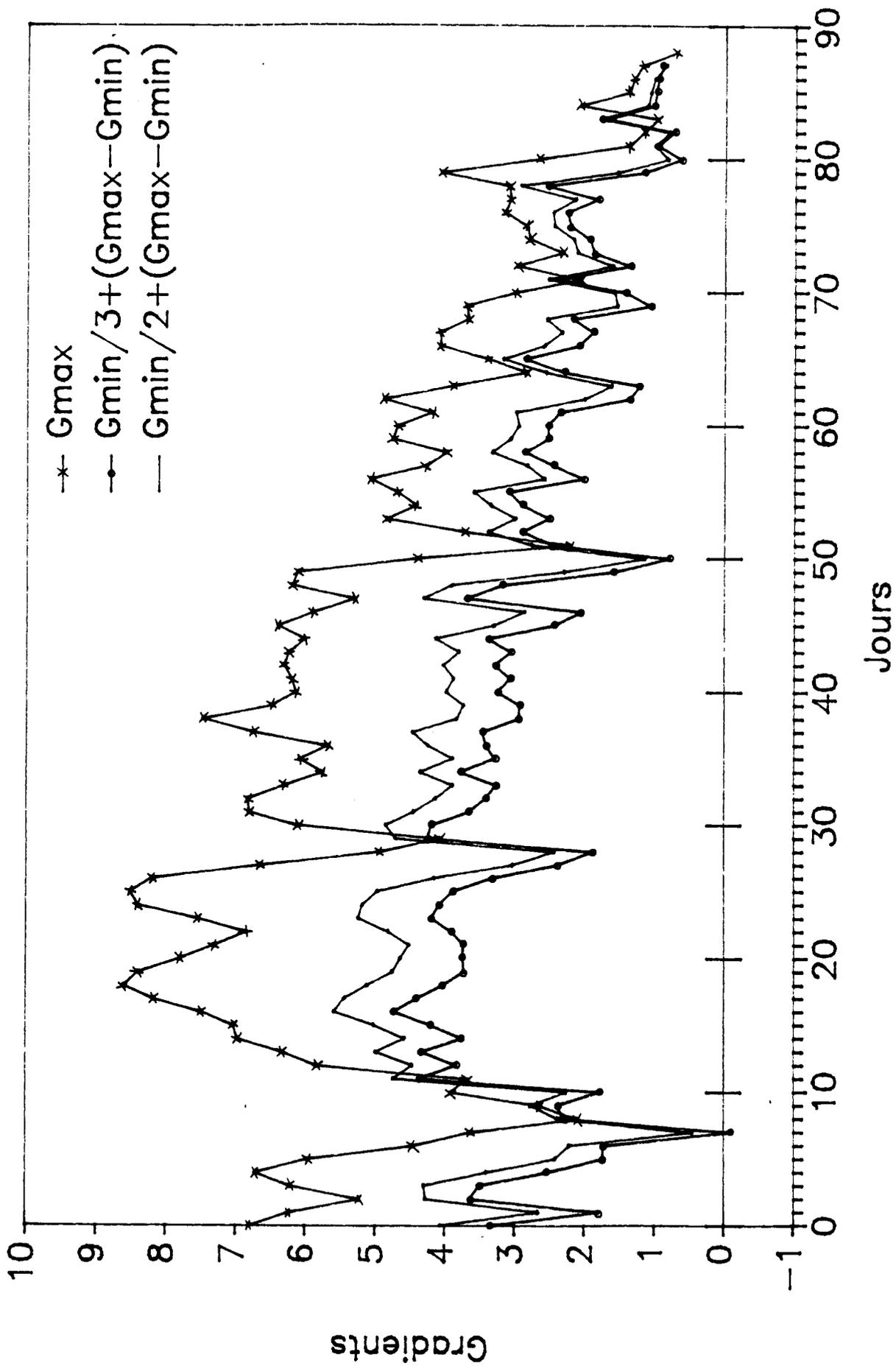


fig. 5-32d

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'étude de l'effet des gradients thermiques sur les ouvrages d'art est un travail qui a été engagé de longue date dans le réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées. Ainsi, plusieurs ouvrages, de géométrie et de site d'implantation différents, ont été instrumentés il y a quelques années et sont encore suivis par les laboratoires régionaux d'Angers, de Bordeaux, Clermont-Ferrand, Lille et Nancy.

La première étape de notre étude a consisté à rassembler les dossiers existants et à constituer une bibliothèque de données.

La deuxième étape a été d'exploiter toutes ces données afin de déboucher sur des modèles de calcul simples mais réalistes des effets des gradients thermiques sur les ouvrages.

Alors que le règlement Français ne prévoit qu'un seul et unique profil de calcul et ce pour tout type de pont, certaines normes étrangères, comme celles de la Grande-Bretagne ou de la Nouvelle Zélande, en proposent plusieurs : ces différents règlements ont été examinés.

Principaux résultats obtenus

- deux grands types d'ouvrages ont pu être distingués de par leur comportement thermique :

les profils de températures sont en effet fort différents selon qu'il s'agit d'un pont à hourdis ou d'un pont-dalle : ainsi, la distribution des températures correspondant au gradient thermique maximal, sur la hauteur de la section transversale de l'ouvrage est quasi-linéaire pour un pont dalle. Elle est plutôt de forme parabolique pour les ponts à hourdis.

On constate également que les ponts-dalles sont moins vulnérables vis à vis des gradients thermiques que les ponts à hourdis, car l'amplitude de variation des gradients au cours d'une même journée y est moins grande. Au contraire, la température moyenne des ponts à hourdis varie rapidement et l'amplitude de variation y est également plus importante

- le coefficient de dilatation apparent du béton, qui permet de passer du champ des températures aux déformations potentielles, est variable au cours d'une journée, mais également au cours de l'année

- les ouvrages en béton de granulats légers ne sont pas plus sollicités que les ouvrages en béton traditionnel, comme le souligne cependant le règlement actuel français
- la modélisation nous a par ailleurs montré l'importance que revêt l'épaisseur des enrobés et nous a donné la possibilité d'évaluer précisément certains coefficients thermiques (par exemple λ et C).
- Enfin, nous avons validé deux profils de température prévisionnels, simples pour être exploités par les bureaux d'études mais caractérisant au mieux le champ de température dans un ouvrage :
 - . un profil linéaire pour les ponts dalles représenté par la différence de température entre les fibres extrêmes de la dalle
 - . un profil, constitué par trois tronçons de droites, pour les ponts à hourdis. Ce profil est défini par les températures en fibres extrêmes, supérieure et inférieure du caisson ou de la poutre et par la température en fibre inférieure du hourdis.

Perspectives

L'étude n'est pas complètement achevée et quelques points restent à travailler :

- Extension des mesures à d'autres ouvrages implantés dans des sites différents
- Poursuite du suivi des ouvrages du Nord de la France (PS 32, Calais, Beaumont sur Oise et viaduc Jules Verne)
- Utilisation plus systématique de la modélisation pour l'étude analytique des distributions de température, et des effets des paramètres influençant la réponse thermique d'un pont.

Toutefois, les outils de l'étude sont maintenant créés et largement éprouvés, et, en particulier, la méthodologie de calcul des effets thermiques et les programmes de dépouillement (et de modélisation).

Certaines valeurs seront précisés par plusieurs études complémentaires qui auront lieu en 1991.

ANNEXES

ANNEXE 1

- Réglementation Française
- Réglementation Anglaise
- Réglementation Suisse
- Réglementation Néo-Zélandaise

Règles de calcul sous actions de la température climatique

Il convient de distinguer les variations uniformes de température et les gradients de température, phénomènes qu'on peut, par simplification, considérer comme indépendants l'un de l'autre :

a) Variations uniformes de températures

L'annexe 8 du B.P.E.L. définit, pour les écarts de température par rapport à la température de construction, les valeurs caractéristiques suivantes :

T max = + 30 °C dont 10 °C sont considérés comme rapidement variables

T min = - 40 °C dont 10 °C sont considérés comme rapidement variables

Les effets des 10 °C correspondant aux variations journalières sont à calculer à partir du module instantané E_i du béton (tout au moins lorsqu'on est en phase de comportement élastique de la structure) ; ceux de la partie complémentaire qui correspond aux variations saisonnières sont à évaluer à partir du module à long terme E_v .

b) Gradients thermiques

1. Béton traditionnel

La circulaire du 8 octobre 1983 transmettant les règles BPEL précise la valeur caractéristique de la différence de température à prendre en compte entre fibres extrêmes des tabliers hyperstatiques :

$$\Delta\theta = 12 \text{ °C}$$

étant entendu qu'on suppose l'extrados plus chaud que l'intrados, la variation de température linéaire sur la hauteur du tablier et les effets du gradient calculables à partir du module instantané puisque correspondant à des cycles journaliers.

Le tableau de la figure A.1 résume les coefficients à prendre en compte dans les différents cas de sollicitations.

2. Béton léger

Le béton léger ayant une plus grande inertie thermique que le béton traditionnel, le gradient de température dont il y a lieu de tenir compte dans les calculs, selon les prescriptions de la circulaire du 2 avril 1975, doit être majoré.

En attendant que des mesures in-situ permettent de conclure de façon définitive, il est prudent de tenir compte, en même temps que des surcharges, d'un gradient de température de $7,5^{\circ}\text{C}$, au lieu de 6°C dans le cas du béton traditionnel. Le gradient de température de longue durée, non cumulable avec les surcharges, est porté quant à lui de 12 à 15°C .

Cette précaution n'est pas une grosse sujétion, compte tenu de la faiblesse du coefficient de dilatation du béton léger (8.10^{-6}) et surtout de sa grande déformabilité instantanée. Globalement, les efforts introduits par ce gradient de température majoré seront environ deux fois plus faibles qu'avec du béton traditionnel.

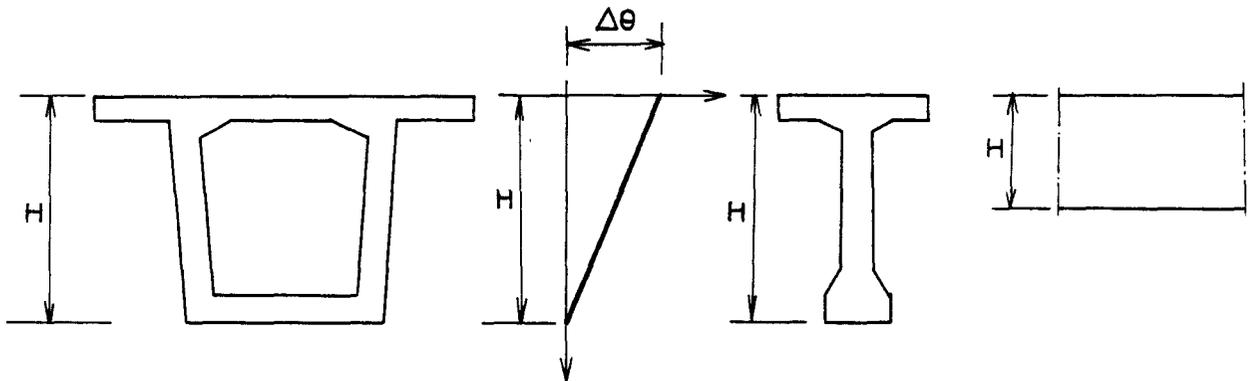


fig. : A.0 - Profil de calcul pour tout type de section

fig. A-1

	Con combinaisons en situation d'exploitation								
	P	G _{max}	G _{min}	Q _r	Q _t	Q _{rp}	ΔT	Δθ	W
E L U	P _m	1.35	1	1.6	1.6	0	0	0	0
	P _m	1.35	1	0	0	1.35	0	0	0
	P _m	1.35	1	0	0	0	0	0	1.5
E L S rare	P _d	1	1	1.2	1	0	0.6	0.5	0
	P _d	1	1	0	0	1	0.6	0.5	0
	P _d	1	1	0	0	0	0.6	1	0
	P _d	1	1	ψ _s	ψ _s	0	1	0.5	0
	P _d	1	1	0	0	0	0.6	0.5	1
E L S fréquent	P _d	1	1	0.72	0.6	0	0	0	0
	P _d	1	1	0	0	0	0	0.5	0
	P _d	1	1	0	0	0	0.5	0	0
	P _d	1	1	0	0	0	0	0	0.2

G_{max} : valeur caractéristique maximale de l'ensemble des charges permanentes défavorables

G_{min} : " " minimale " " " favorables

Q_r : valeur nominale des charges de chaussée sans caractère particulier

Q_t : valeur nominale des charges de trottoir

Q_{rp} : valeur caractéristique des charges d'exploitation de caractère particulier

ΔT : valeur caractéristique des variations uniformes de température

Δθ : valeur caractéristique du gradient thermique

Profils types utilisés par certains pays

1) Norme anglaise

La norme anglaise a fixé 2 types de profils pour le calcul du gradient thermique et des contraintes d'origine thermique.

a) Ponts en béton

Le profil à considérer est différent selon qu'il s'agit d'un pont dalle, d'un pont à poutres ou d'un pont caisson. L'allure générale est donnée par la figure A.2.

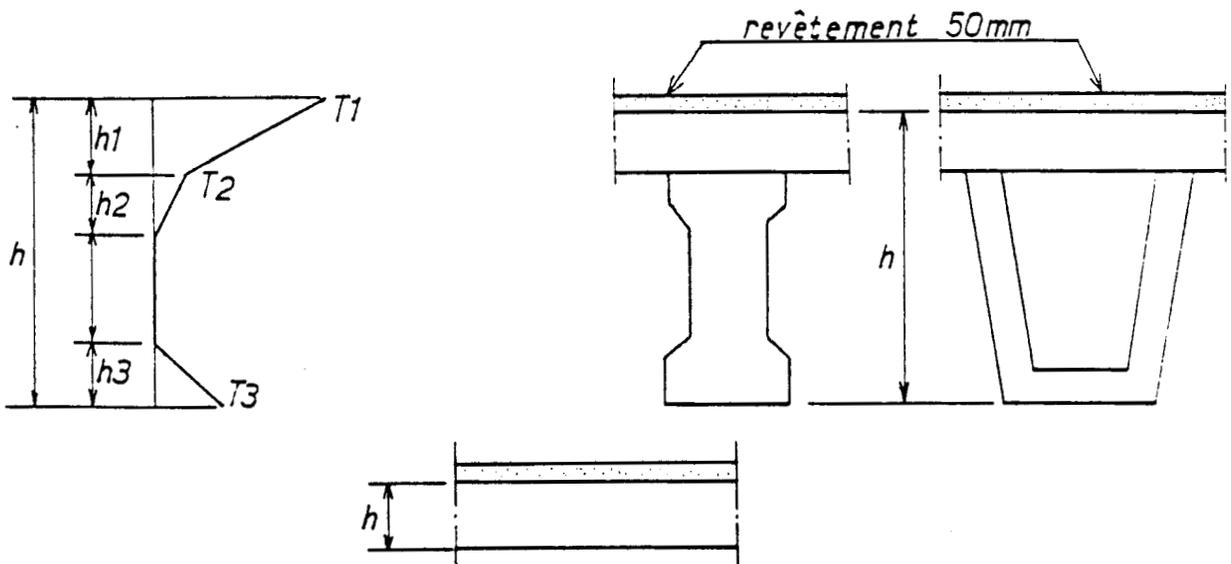


fig. : A.2 - Profil de calculs pour un pont en béton

$h(m)$	$T1(^{\circ}C)$	$T2(^{\circ}C)$	$T3(^{\circ}C)$
≤ 0.2	13.2	4.9	0.3
0.4	17.2	4.6	1.4
0.6	17.6	4.0	1.8
≥ 0.8	17.8	4.0	2.1

$$h1 = 0.3h \geq 0.15m$$

$$h2 = 0.3h \geq 0.10m$$

$$\leq 0.25m$$

$$h3 = 0.3h \leq 0.15m$$

b) Ponts mixtes

Pour les ponts mixtes, seule l'épaisseur de la dalle est considérée comme variable. La figure A.3 indique le profil à considérer.

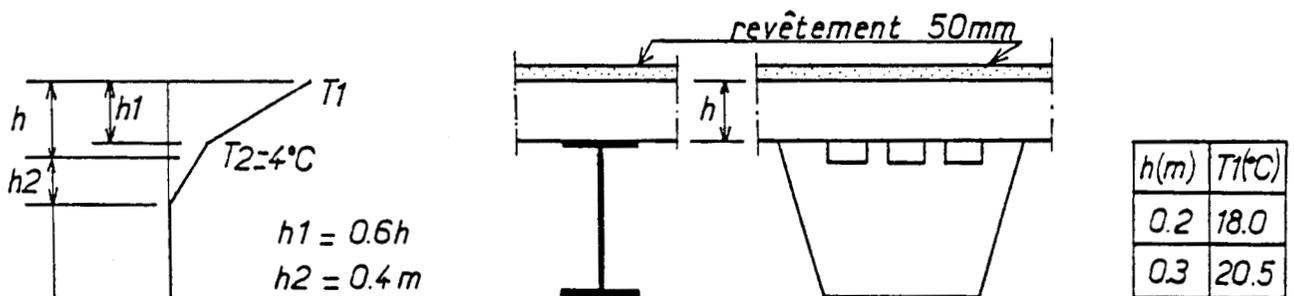


fig. : A.3 - Profil de calculs pour un pont mixte

2) Norme suisse

La norme suisse demande à tenir compte, pour les ponts en béton, d'un gradient variable de $+ 0,5^{\circ}C$ (respectivement $- 0,25^{\circ}C$ dans le cas d'un gradient négatif) par centimètre d'épaisseur, jusqu'à une profondeur égale à l'épaisseur de la dalle ou au plus égale à 20 cm à partir de laquelle la température est constante jusqu'à la face inférieure.

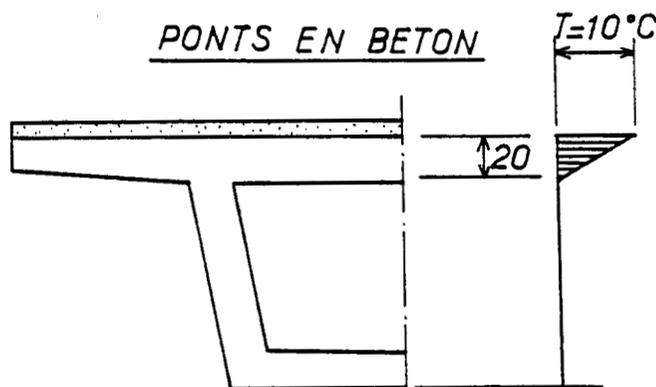


fig. : A.4 - Distributions des températures dans le béton

Pour les constructions mixtes acier-béton à l'air libre, cette norme indique qu'il faut admettre une différence de température de $\pm 10^\circ\text{C}$ entre le béton et l'acier.

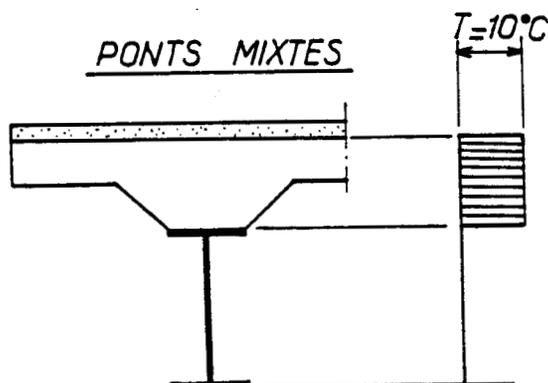


fig. : A.5 - Distribution des températures dans un pont mixte

3) Norme néo-zélandaise

Comme la norme anglaise, le code néo-zélandais distingue 3 types de sections transversales :

- . Ponts à poutres
- . Ponts dalle
- . Ponts caisson

La figure A.4 résume en un seul schéma les profils à adopter.

On remarque que cette norme tient compte de l'épaisseur du revêtement noir du tablier.

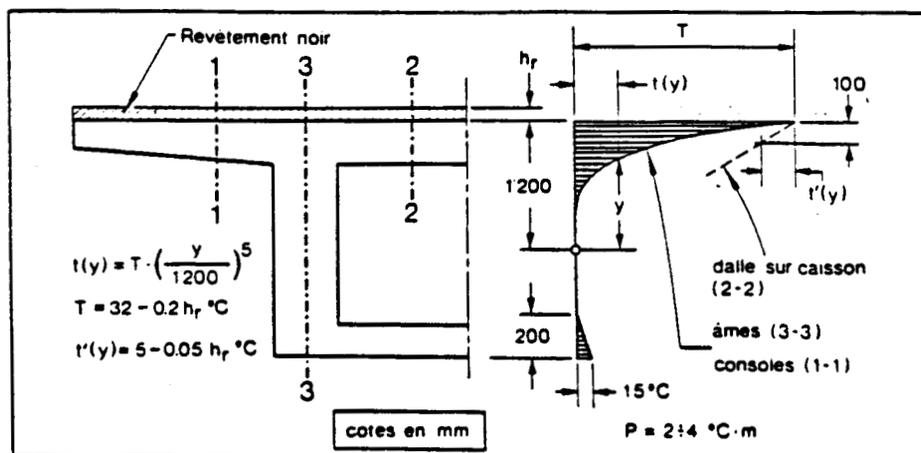


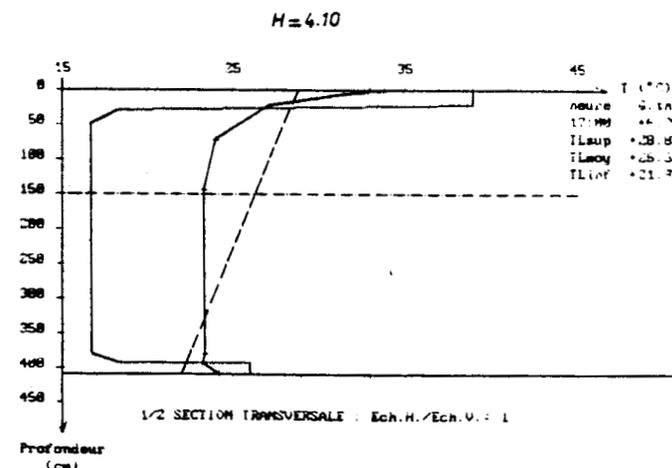
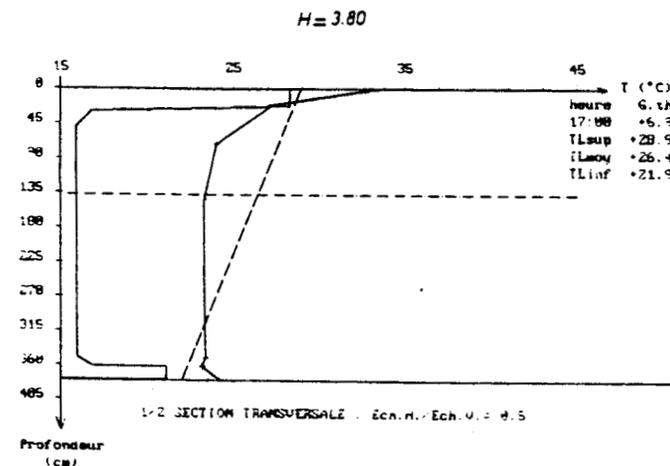
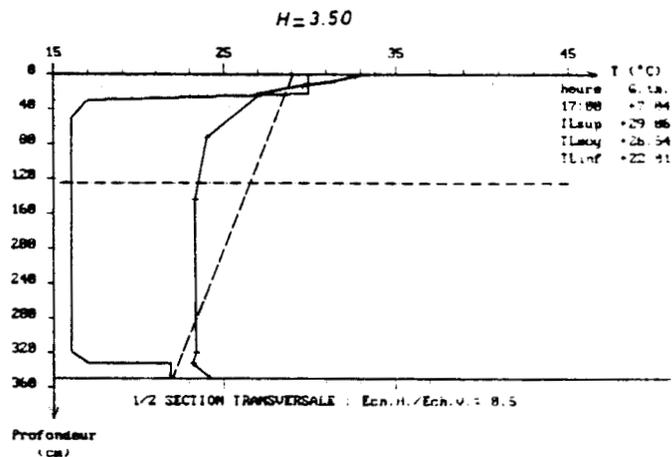
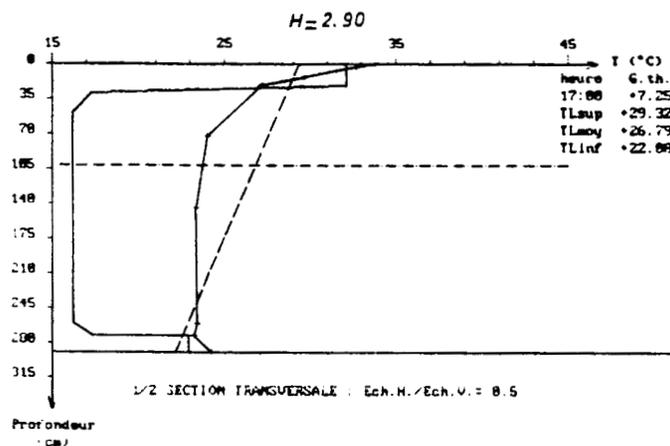
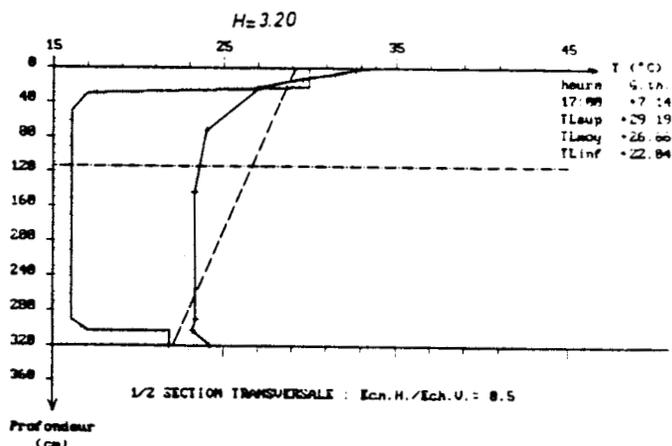
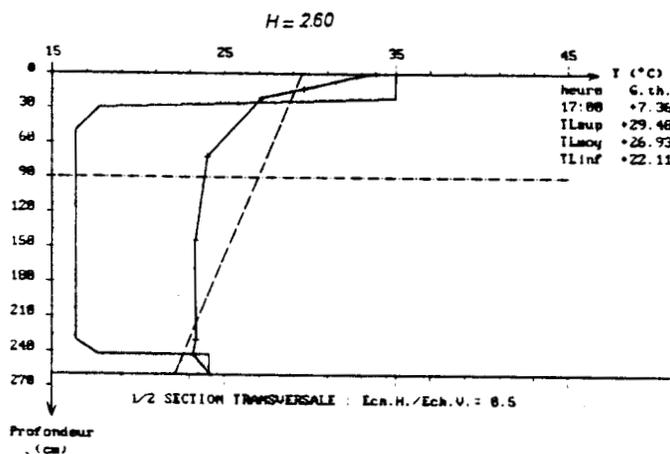
fig : A.6 - Distribution des températures

ANNEXE 2

- Evolution du gradient thermique en fonction de la hauteur de la section

- Evolution du gradient thermique avant la pose des enrobés sur le pont de Calais

EVOLUTION DU GRADIENT THERMIQUE EN FONCTION DE LA HAUTEUR DE LA SECTION TRANSVERSALE



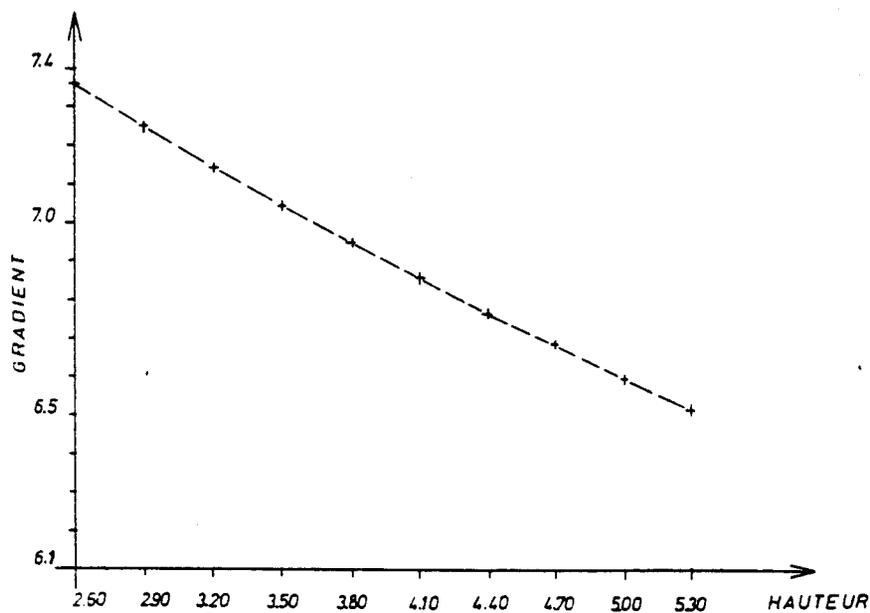
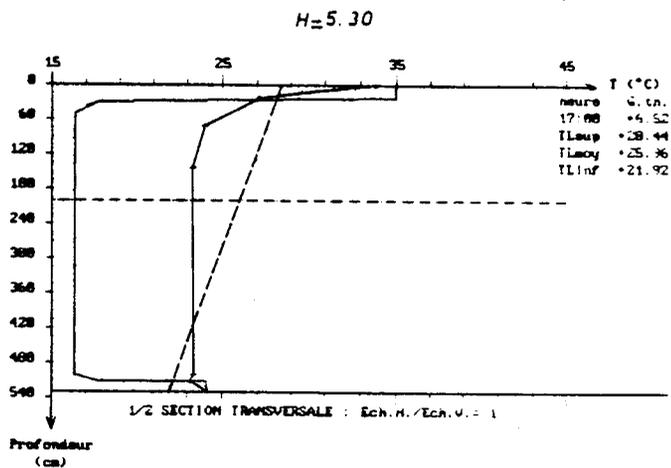
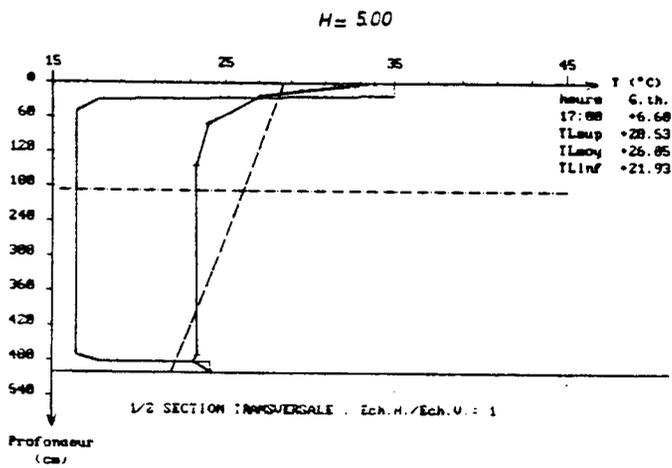
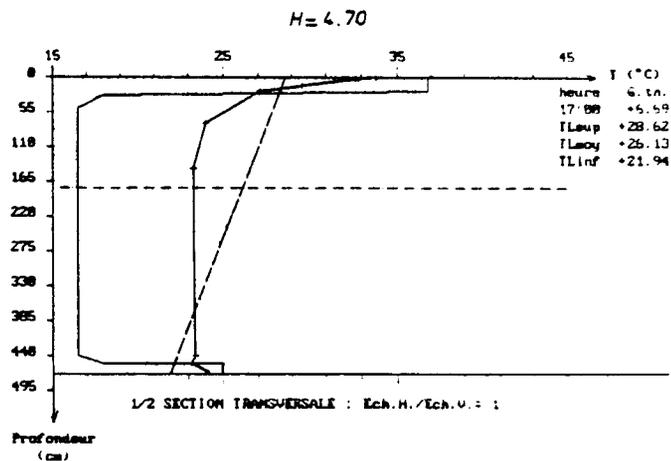
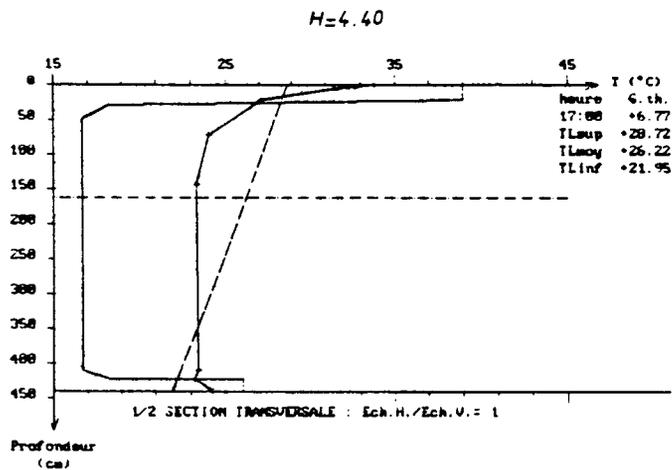
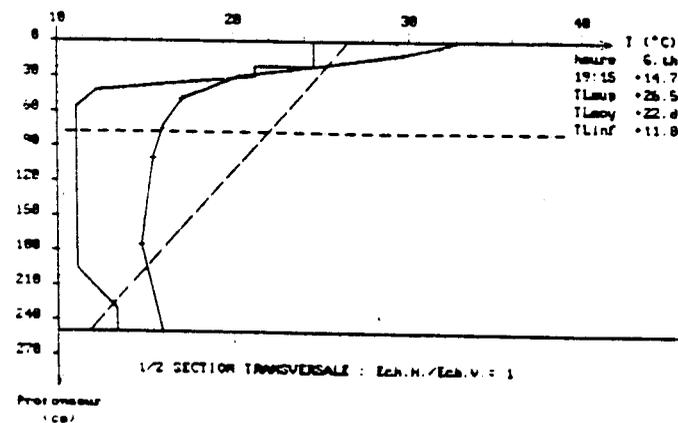
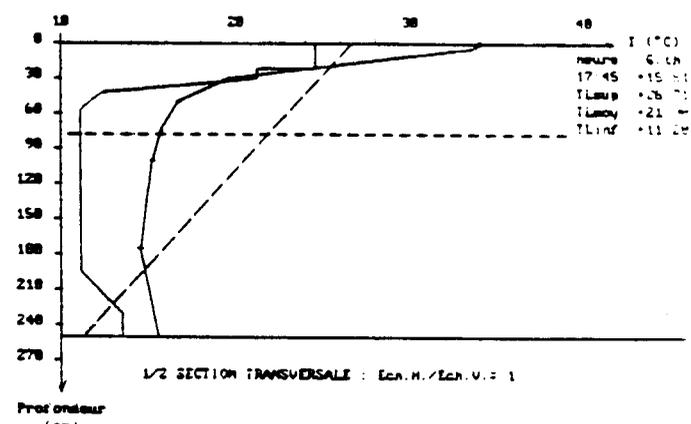
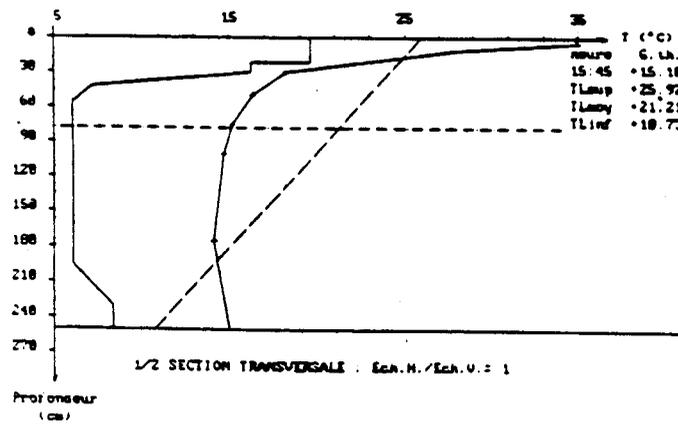
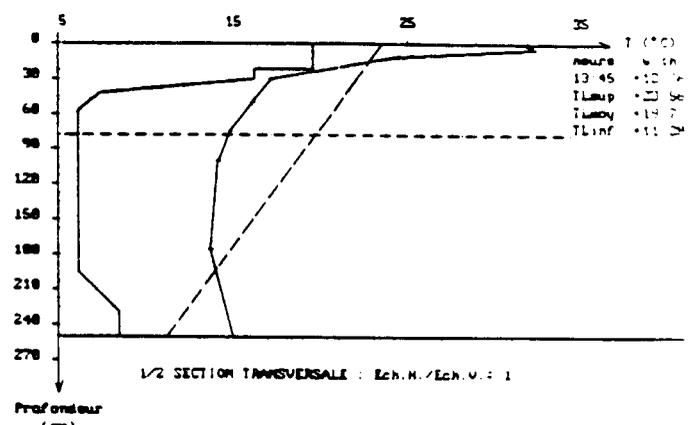
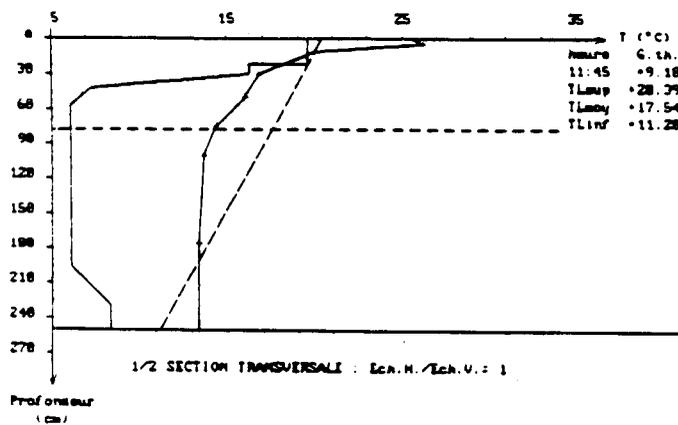
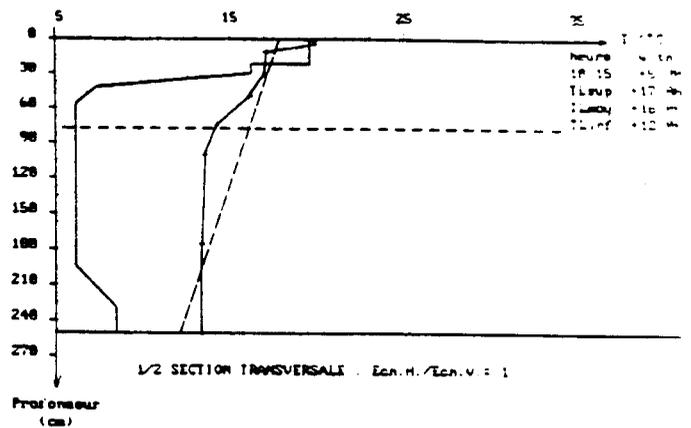
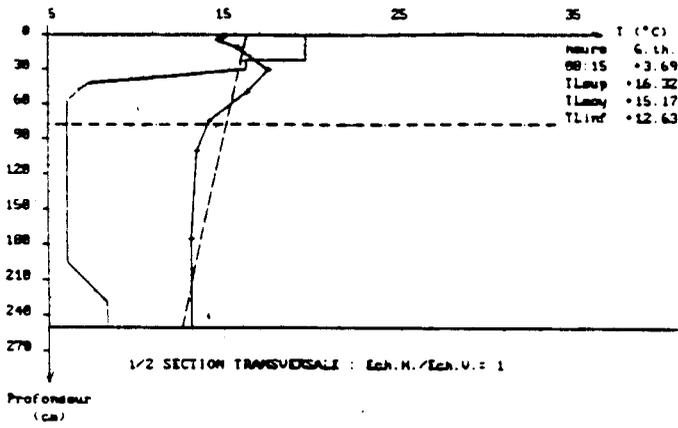


fig. A-7 GRADIENT EN FONCTION DE LA HAUTEUR

90
OUVRAGE N°6 A CALAIS

Evolution du gradient au cours de la journée du 30-5-78

(Avant la pose des enrobés)



La dalle de béton est directement exposée au rayonnement solaire. Les gradients obtenus sont très élevés (15,51°C à 17H45).

ANNEXE 3

Viaduc Jules Verne

- Mesure des déplacements
- Estimation du module de déformation du béton

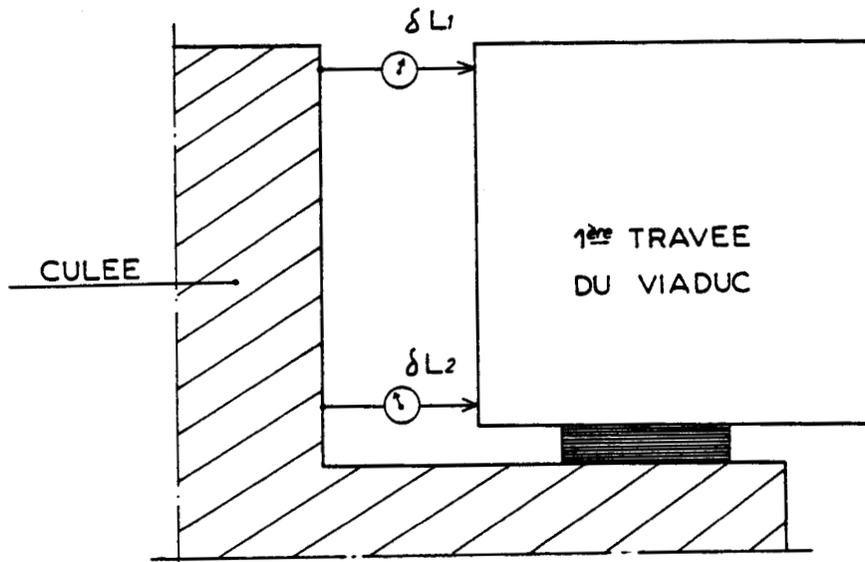
MESURE DES DEPLACEMENTSPosition des capteurs de déplacements

fig:A-8 - POSITION DES CAPTEURS

Les déplacements δL_1 et δL_2 mesurés par les capteurs doivent être corrigés du fait que l'about de la première et dernière travée subit une rotation importante. Ceci est dû au fait que les travées de rives ont une courbure plus importante à cause de la libre dilatation.

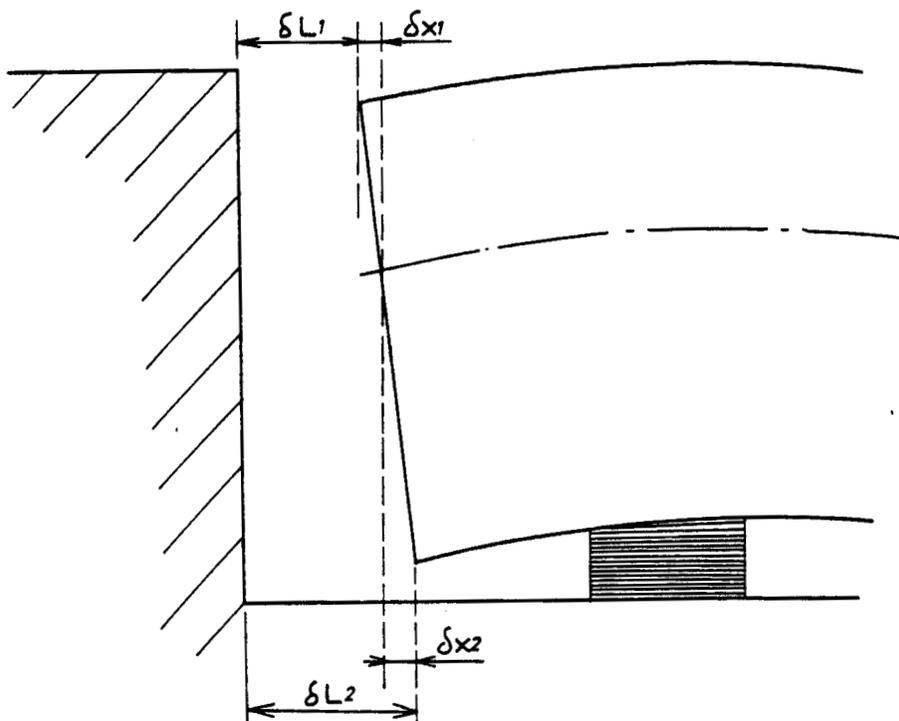
Déformation au niveau des appuis extrêmes

fig:A-9 - DEFORMATION DE L'EXTREME DU PONT

Calcul de ξ :

Ce terme correctif a été obtenu par un programme basé sur le "théorème des trois moments", d'utilisation courante pour le calcul des poutres continues.

- Courbure moyenne sur la lère travée

$$C \text{ moy} = \frac{1 + (-0,2769)}{2} = 0,362$$

- Correction sur ΔL : ξ

$$\xi = (TL \text{ sup} - TL \text{ moy}) * \alpha * L1 * C \text{ moy}$$

TL sup : Température face sup. du hourdis supérieur

TL moy : Température moyenne au centre de gravité de la section

TL inf : Température face inf. du hourdis inférieur

α : coefficient de dilatation

L1 : longueur de la lère travée = 42,30 m

ξ_1 : (TL sup - TL moy) * Cste

ξ_2 : (TL inf - TL moy) * Cste

La plus grande dilatation totale enregistrée lors de nos mesures fut de 86 mm, pour un ouvrage de 943 mètres de longueur.

Coefficient de dilatation - force de frottement

Lors de l'ensoleillement, on obtient 2 coefficients de dilatation, l'un correspondant au début de l'ensoleillement et l'autre à partir de 14H - 15H. Cette variation peut être expliquée par 2 phénomènes :

- 1) Frottement de l'ouvrage sur ses appuis. Le coefficient apparent est la soustraction du coefficient de dilatation réel et d'un coefficient induit par les forces de frottements.

.../...

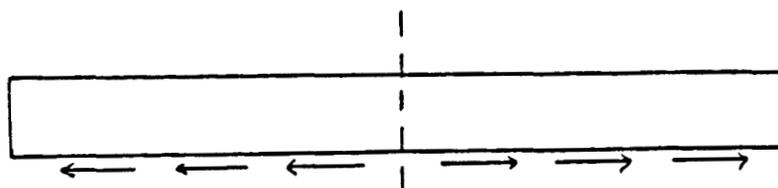
Phase de refroidissement : Compression de l'ouvrage

fig.A-10: Force de frottement (en traction) opposée au mouvement.

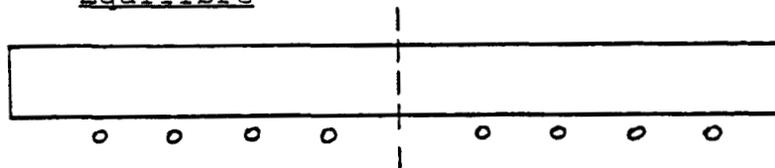
Equilibre

fig.A-11: Frottement nul augmentation de la dilatation et du coefficient de dilatation.

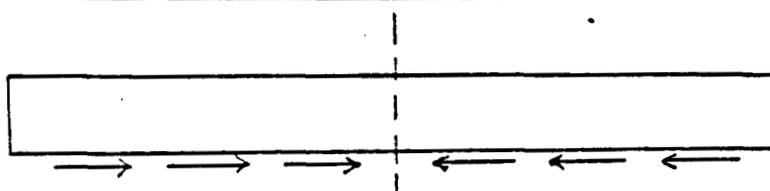
Phase d'ensoleillement : Dilatation

fig.A-12: Force de frottement en compression.

- 2) Le coefficient de proportionnalité entre déformation et température (appelé coefficient de dilatation apparent) dépend du régime de variation de la température, et donc, également de la distribution même des températures dans la section régime "quasi permanent" et régime transitoire donnent lieu à des coefficients de dilatation apparent différents ($\alpha_p < \alpha_t$).

HEURE	&L1 (mm)	&x1 (mm)	&L2 (mm)	&x2 (mm)	&L (mm)	T°moy (°C)	&Tmoy (°C)	Gr Th (°C)	Q W/m ² /h
8H30	0	+0.35	0	-0.20	0	18.29	0	+2.39	
9H30	0.85	+0.31	0.91	-0.17	1.75	18.32	+0.03	+2.11	364
10H30	3.06	+0.19	3.10	-0.11	6.09	18.84	0.55	+1.35	638
11H30	6.91	+0.15	7.09	-0.09	13.91	19.05	0.76	+1.08	711
12H30	11.62	+0.18	12.47	-0.10	24.02	19.79	1.50	+1.23	832
13H30	16.72	+0.28	18.87	-0.16	35.55	20.54	2.25	+1.96	806
14H30	22.68	+0.39	25.22	-0.22	47.92	21.37	3.08	+2.71	815
15H30	28.06	+0.51	30.39	-0.28	58.53	22.24	3.95	+3.48	727
16H30	32.88	+0.69	35.95	-0.31	69.06	23.06	4.77	+3.84	722.5
17H30	37.59	+0.62	40.52	-0.35	78.23	23.77	5.48	+4.26	543.6
18H30	41.67	+0.66	44.49	-0.37	86.30	24.40	6.11	+4.50	488.5

VIADUC JULES VERNE

REFERENCE :

- Date : 09/06/88
- Scrut. n° 1

MESURES :

- Date : 09/06/88
- Scrut. n° 11

N° Rot	NO (Hz)	TO (°C)	N (Hz)	T (°C)	Epsilon (10-6)
1	872.9	15.8	860.2	27.2	93.3
2	872.2	16.0	854.4	28.8	94.1
3	855.2	18.6	852.8	27.4	94.8
4	839.7	18.8	841.8	26.0	89.8
5	863.3	18.7	866.0	25.4	86.0
6	870.8	16.6	880.2	22.1	92.9
7	874.2	16.9	883.2	22.5	93.0
8	872.1	17.0	880.6	22.5	90.2
9	862.8	17.7	860.3	26.3	92.1
10	849.7	18.8	856.1	24.8	88.9
11	902.0	17.7	917.6	21.3	92.0
12	1116.4	17.5	1129.9	21.0	94.3
13	899.0	17.2	913.3	21.2	92.3
14	1498.1	17.8	1506.7	21.2	85.2
15	900.3	17.0	912.4	21.2	87.5
16	827.7	17.7	903.6	21.6	95.7
17	894.0	17.5	905.8	22.3	93.3
18	878.3	17.6	894.6	21.2	92.9
19	991.7	17.0	991.1	21.2	46.6
20	951.1	17.0	956.7	21.2	67.6
21	991.0	17.7	996.6	21.6	64.9
22	948.2	17.7	956.9	21.6	74.6
23	975.4	17.5	976.8	22.3	60.5
24	933.9	17.5	939.3	22.3	73.6
25	989.3	17.6	996.4	21.2	66.7
26	940.7	17.6	950.3	21.2	73.9
27	987.5	17.6	988.0	18.2	8.7
28	971.5	17.6	973.9	18.4	17.5

.../...

$$A(0) = 91.4 \quad A(1) = 0.2 \quad A(2) = -0.1$$

$$Y_P(I) = A(0) + A(1) * X(I,1) + A(2) * X(I,2)$$

POINT N°	X(I,1)	X(I,2)	Y(I)	Y_P(I)	DIFF.
1	0.090	-4.100	93.3	91.7	1.6
2	0.090	4.150	94.1	91.1	3.0
3	0.110	-1.500	94.8	91.5	3.3
4	0.110	1.500	89.8	91.3	-1.5
5	0.115	0.000	86.0	91.4	-5.4
6	3.100	-1.190	92.9	92.2	0.7
7	3.105	1.210	93.0	92.1	0.9
8	3.105	0.010	90.2	92.1	-2.0
9	0.140	-3.000	92.1	91.7	0.5
10	0.140	3.050	88.9	91.2	-2.3
11	0.810	-2.850	92.0	91.8	0.2
12	0.795	-2.855	94.3	91.4	2.9
13	1.515	-2.650	92.3	92.0	0.3
14	1.515	-2.645	85.2	91.6	-6.4
15	2.245	-2.445	87.5	92.1	-4.6
16	2.225	2.445	95.7	91.7	3.9
17	2.935	-2.245	93.3	92.3	1.0
18	2.900	2.250	92.9	91.9	1.0

— COORDONNEES DES CAPTEURS ET DEFORMATIONS CORRESPONDANTES —

— Y_P(I) : déformations linéarisées

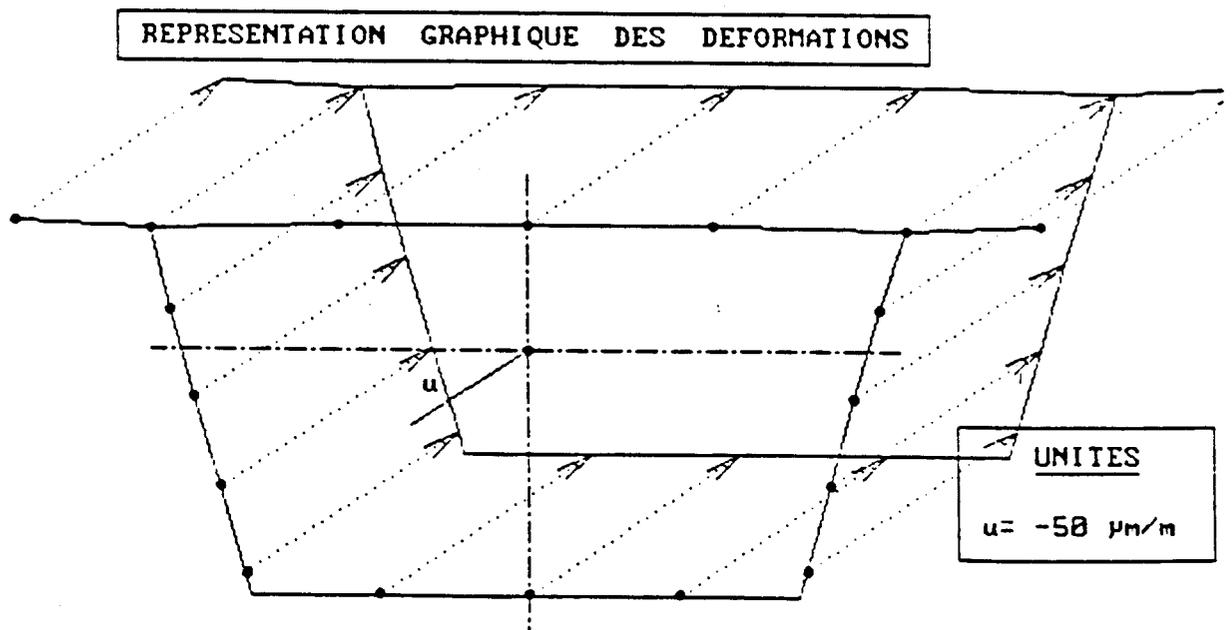
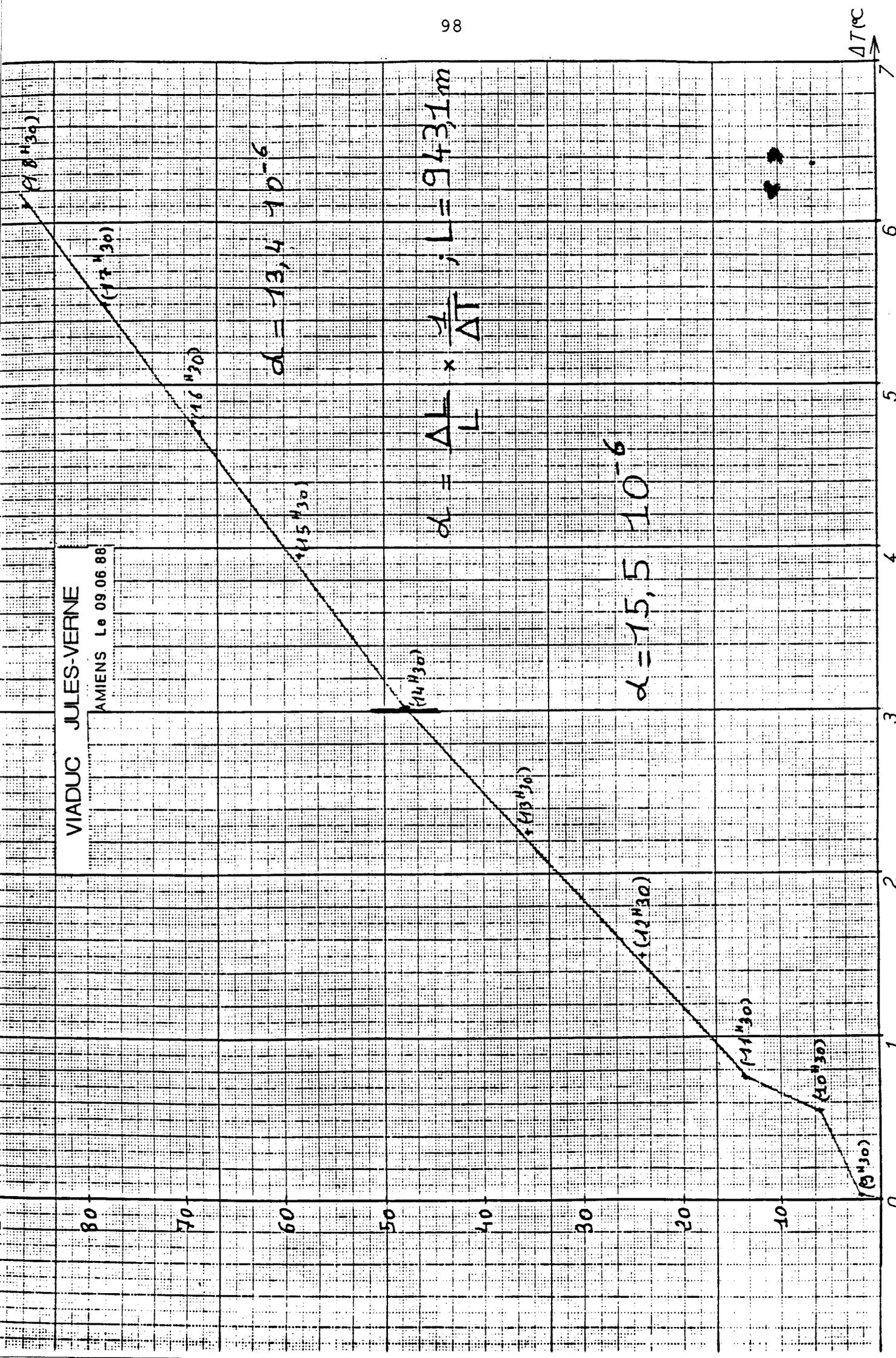


fig. A-13. REPRESENTATION DES DEFORMATIONS



fin A-13h estimation du coefficient de dilatation



ANNEXE 4

Modélisation par la méthode des différences finies

- Influence de l'épaisseur du hourdis sur T1-T3
- Influence de l'épaisseur de l'enrobé sur T1-T3
- Influence de l'ensoleillement sur T1-T3
- Comparaison des températures
- Programme en Turbo-basic de la méthode des différences finies

EPAISSEUR DU HOURDIS
Champ Initial uniforme

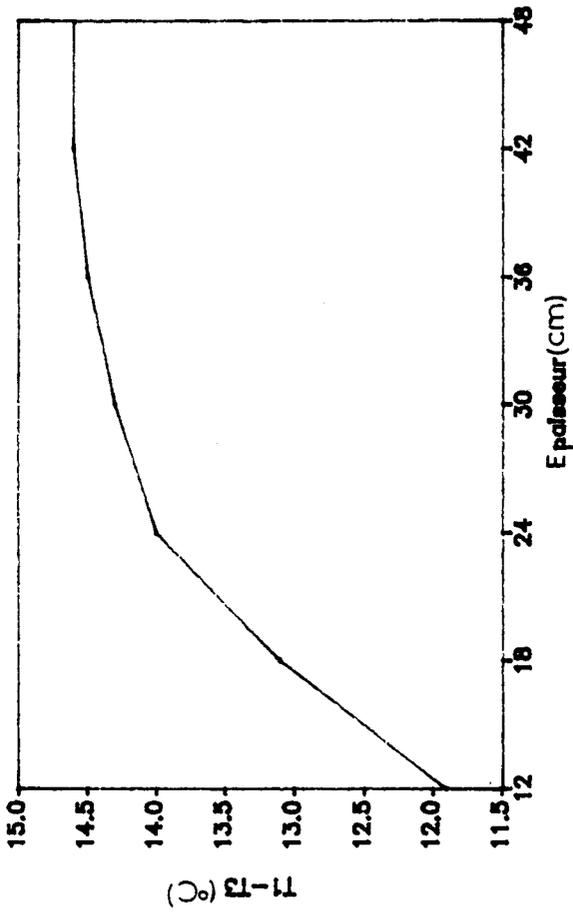


fig.:A-15

EPAISSEUR DU HOURDIS
Champ Initial non uniforme

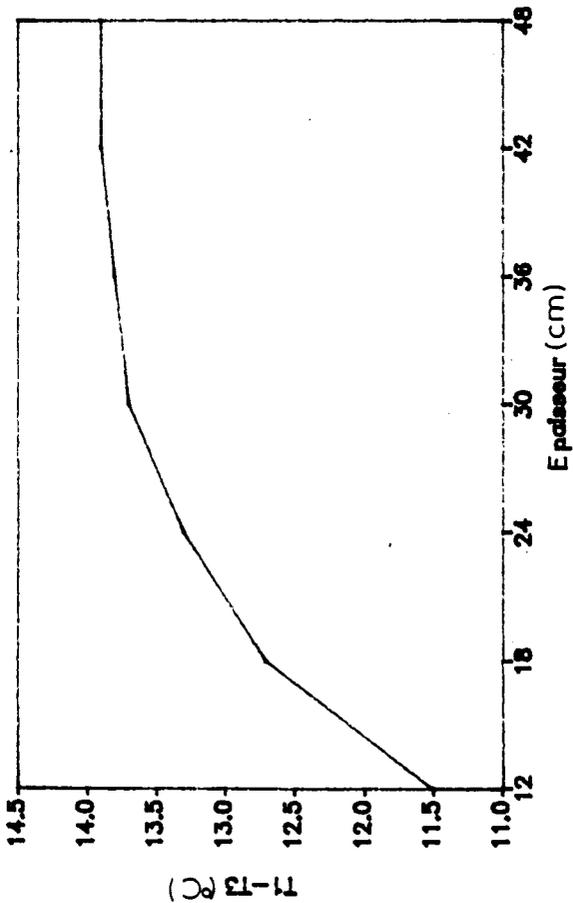


fig.:A-14

EPAISSEUR DE L'ENROBE

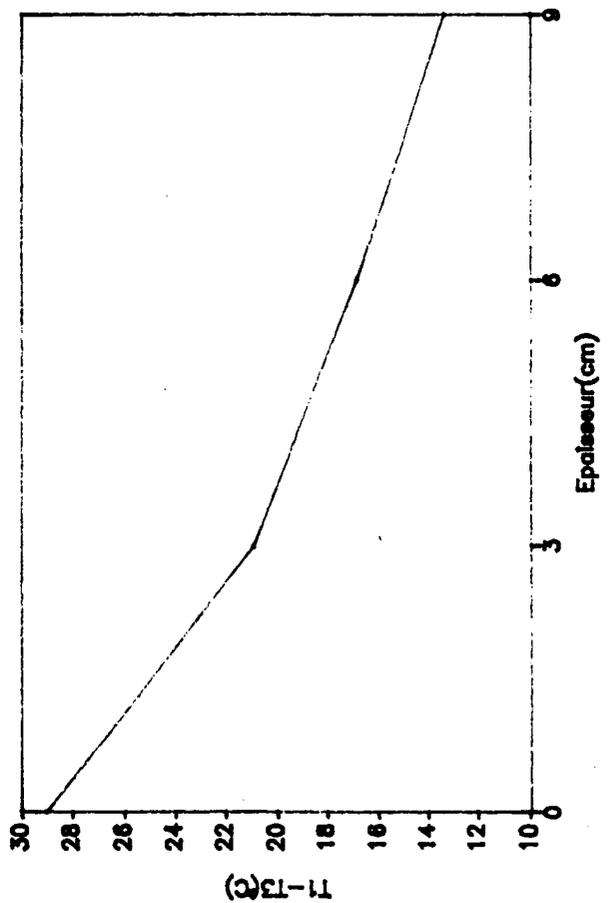


fig.:A-16

ENSOLEILLEMENT
Champ initial uniforme

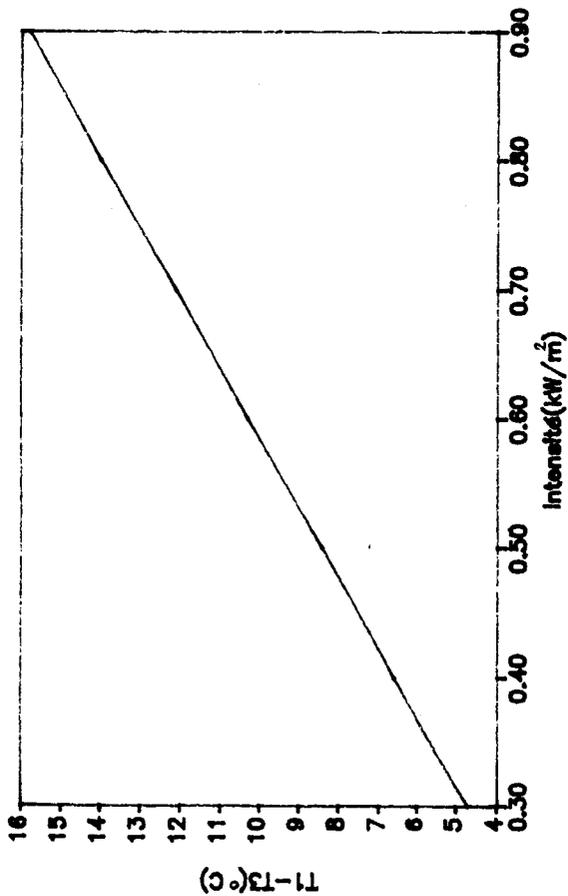


fig. A-17

ENSOLEILLEMENT
Champ initial non uniforme

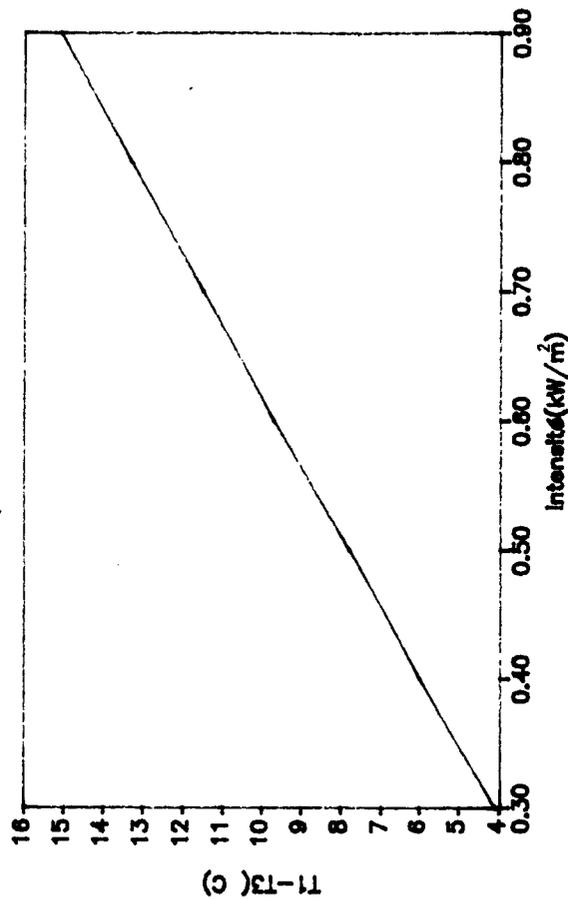
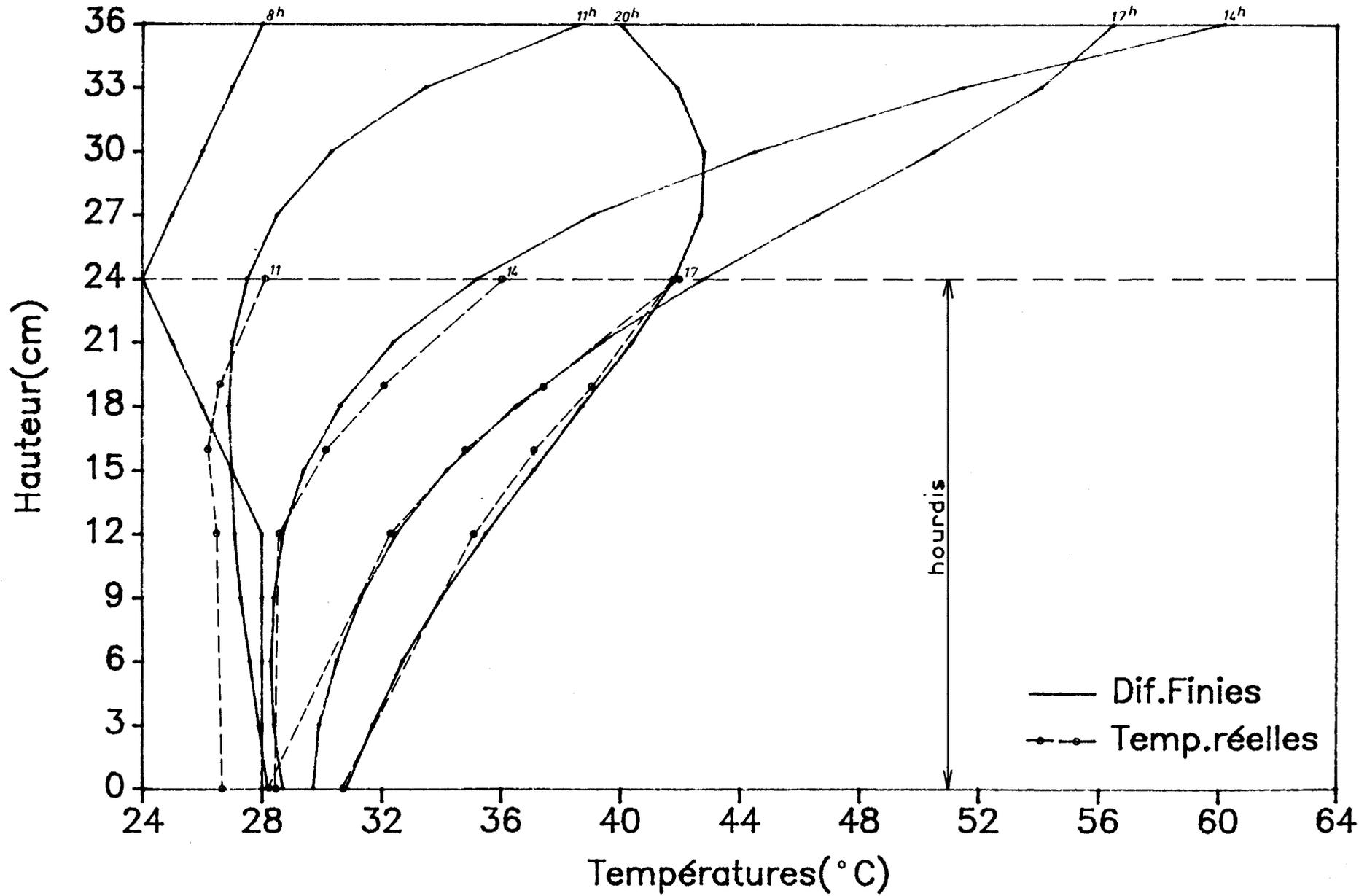
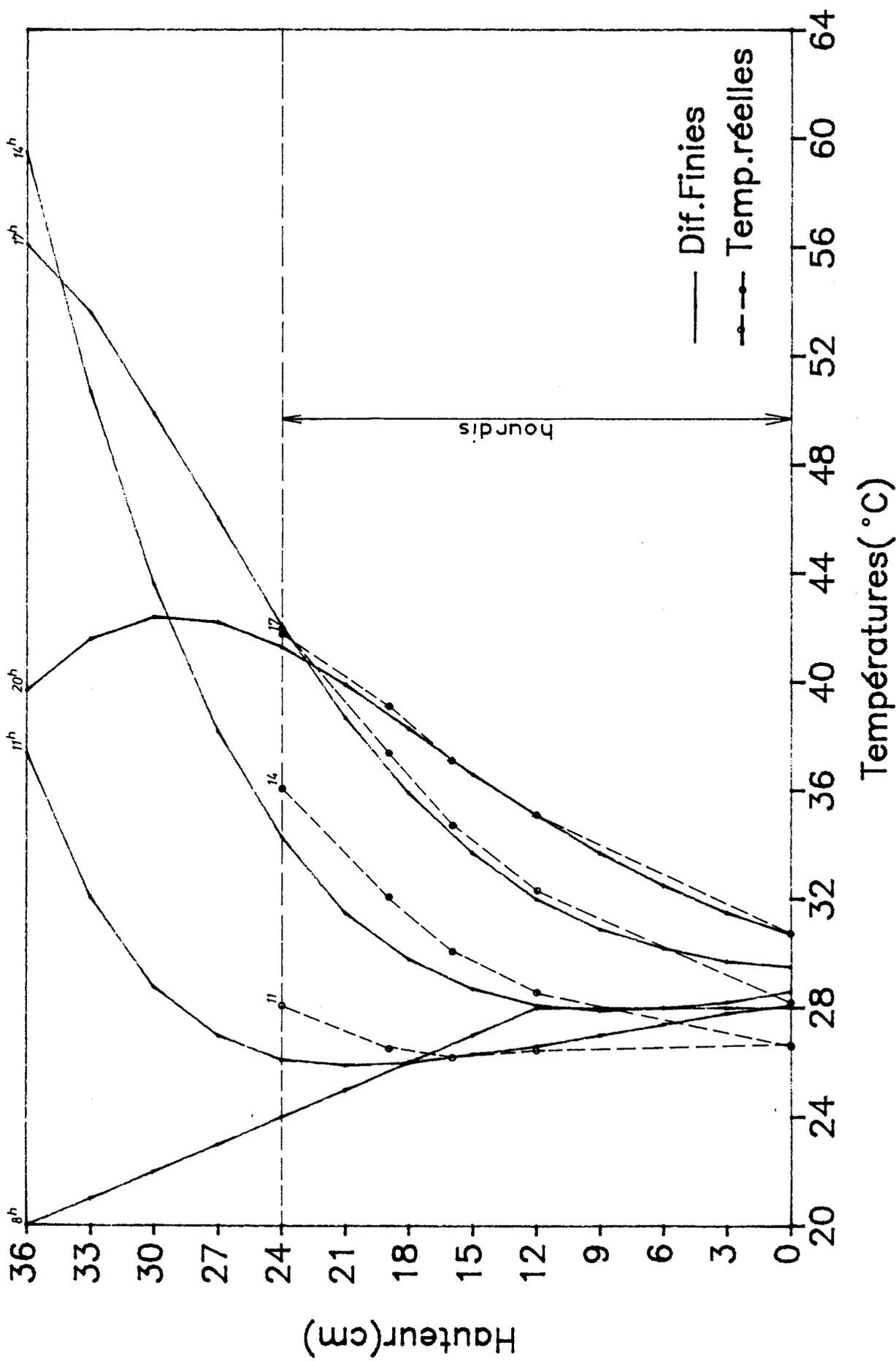


fig. A-18

COMPARAISON DES TEMPERATURES



COMPARAISON DES TEMPERATURES



CALCUL DE LA DISTRIBUTION DES TEMPERATURES DANS UN HOURDIS DE PO
PAR LA METHODE DES DIFFERENCES FINIES

```

cls
pi=3.141593
,
couches: '                               Nombre de couches de differents materiaux
nc=3:pr=1'                               ***
dim cond(nc),ro(nc),cm(nc),a2(nc)
dim ns(nc),dx(nc)
,
cather: '                                CARACTERISTIQUES THERMIQUES
data 1.2,1,1'                             ***          Conductivites
data 936,864,800'                         ***          Chaleurs massiques
data 2500,2200,1800'                      ***          Masses volumiques
data 11.5'                                 ***          Echanges extrados
restore cather
for i=1 to nc:read cond(i):next i
for i=1 to nc:read cm(i):next i
for i=1 to nc:read ro(i):next i
for i=1 to nc:a2(i)=cond(i)/ro(i)/cm(i):next i'
read rc
,
pasdetemps: '                             DISCRETISATIONS
jour=43200:dt=300:ndt=jour/dt'            Pas de temps
pasdedistance: '                          ***
ib=3'                                      Pas de distance
dx(ib)=.03'                                ***
for i=1 to nc:dx(i)=dx(ib)*sqr(a2(i)/a2(ib)):next i
subdi: '                                   Nombre de subdivisions
data 3,1,8'                                ***
restore subdi
ndx=0
for i=1 to 3:read ns(i):ndx=ndx+ns(i):next i
,
dim flux(ndt),flut(ndt),temp(ndx+1,ndt)   DONNEES ET PARAMETRES
init: '                                    Temperatures initiales
'data 20,21,22,23,24,25,26,27,28,28,28,28,28' ***
data 18.1,18.1,18.1,18.1,18.1,18.1,18.1,17.8,17.8,18,18,18.1,18.1,18.1,18.1'
***
restore init
for i=0 to ndx+1:read temp(i,0):next i
soleil: '                                  Météo du jour
fluxmax=425'                                ***
dtmax=3'                                    ***
for j=1 to ndt:temp(ndx+1,j)=temp(ndx+1,0)+dtmax*j/ndt:next j'(1-(1-2*j/3/ndt)^2):next j
for j=1 to ndt:flux(j)=fluxmax*(sin(pi*(1-j/ndt)))^2:next j

```

```

coeffs:
co2=a2(ib)*dt/(dx(ib)^2)
co1=1-2*co2
co3=2/cond(1)*dx(1)

```

DEBUT DES CALCULS

```

calcul:
qx=0:qt=0
if pr=0 then goto suite
for i=1 to nc:lprint using"####.##";cond(i);:next i:lprint
for i=1 to nc:lprint using"#####";cm(i);:next i:lprint
for i=1 to nc:lprint using"#####";ro(i);:next i:lprint
for i=1 to nc:lprint using"####.##";a2(i)*1000000;:next i:lprint
lprint using"#####";dt;dx(ib)*100;:lprint
lprint using"#####";fluxmax;:lprint using"####.##";dtmax
lprint
suite:
for i=0 to ndx+1
if pr=0 then print using"###.##";temp(i,0); else lprint using"###.##";temp(i,0);
next i
if pr=0 then print else lprint
for j=1 to ndt
for i=1 to ndx
temp(i,j)=co1*temp(i,j-1)+co2*(temp(i-1,j-1)+temp(i+1,j-1))
next i
temp(0,j)=((4*temp(1,j)-temp(2,j))+co3*(flux(j)+rc*temp(ndx+1,j)))/(3+co3*rc)
flut(j)=flux(j)-rc*(temp(0,j)-temp(ndx+1,j))
qx=qx+flux(j)*dt/3600
qt=qt+flut(j)*dt/3600
if j mod 6=0 then
if pr=0 then print else lprint
for i=0 to ndx+1
if pr=0 then print using"###.##";temp(i,j); else lprint using"###.##";temp(i,j);
next i
if pr=0 then print using"#####";flut(j); else lprint using"#####";flut(j);
end if
next j
if pr=0 then print else lprint
if pr=0 then print using"#####";qx,qt else lprint using"#####";qx,qt
while not instat:wend

```

ANNEXE 5

Tableaux des gradients thermiques :

- gradients installés
- gradients journaliers
- gradients instantanés équivalents
- gradients maximaux (Beaumont sur Oise)
- gradients estimés (Beaumont sur Oise)

---CALAIS---

Date	P	S	P/3+S	P/2+S	
29/06/90	2.84	3.75	4.70	5.17	
	2.26	2.80	3.55	3.93	
	1.86	0.91	1.53	1.84	
	0.56	4.53	4.72	4.81	
	1.74	5.12	5.70	5.99	
	2.42	0.29	1.10	1.50	
	-0.33	0.91	0.80	0.75	
	-1.12	3.21	2.84	2.65	
	-0.42	0.79	0.65	0.58	
	-0.64	1.52	1.31	1.20	
	-0.27	2.63	2.54	2.50	
	0.51	3.89	4.06	4.15	
	1.17	4.78	5.17	5.37	
	2.37	4.64	5.43	5.83	
	3.35	4.10	5.22	5.78	
	3.26	3.45	4.54	5.08	
	15/07/90	2.36	3.46	4.25	4.64
		3.30	5.21	6.31	6.86
		4.78	3.79	5.38	6.18
		4.02	4.15	5.49	6.16
3.53		3.26	4.44	5.03	
2.83		3.38	4.32	4.80	
2.09		4.44	5.14	5.49	
3.95		3.66	4.98	5.64	
3.54		3.91	5.09	5.68	
2.90		4.11	5.08	5.56	
2.62		4.38	5.25	5.69	
1.18		3.48	3.87	4.07	
-0.10		2.43	2.40	2.38	
0.55		2.42	2.60	2.70	
-0.15		5.63	5.58	5.56	
30/07/90	0.98	4.51	4.84	5.00	
	1.91	5.03	5.67	5.99	
	1.73	3.42	4.00	4.29	
	0.89	4.83	5.13	5.28	
	0.83	4.32	4.60	4.74	
	1.92	4.47	5.11	5.43	
	4.68	2.65	4.21	4.99	
	4.00	3.18	4.51	5.18	
	2.13	4.53	5.24	5.60	
	1.19	4.32	4.72	4.92	
	1.19	4.07	4.47	4.67	
	1.12	3.97	4.34	4.53	
	1.22	4.83	5.24	5.44	
	1.53	3.59	4.10	4.36	
	1.49	4.43	4.93	5.18	
	1.52	3.78	4.29	4.54	
	0.95	0.58	0.90	1.06	
	-0.16	3.26	3.21	3.18	
	-0.59	4.07	3.87	3.78	
	-0.25	0.99	0.91	0.87	
-1.25	0.24	-0.18	-0.39		
-1.45	4.44	3.96	3.72		

	0.47	4.58	4.74	4.82
	0.77	4.27	4.53	4.66
	0.71	3.87	4.11	4.23
24/08/90	0.75	3.76	4.01	4.14
	1.01	3.18	3.52	3.69
	1.11	4.03	4.40	4.59
	1.43	2.53	3.01	3.25
	0.50	3.42	3.59	3.67
	-0.79	4.47	4.21	4.08
	1.33	3.43	3.87	4.10
	0.84	2.81	3.09	3.23
01/09/90	0.43	3.36	3.50	3.58
	0.00	3.48	3.48	3.48
	-0.19	3.97	3.91	3.88
	1.84	3.07	3.68	3.99
	0.52	2.07	2.24	2.33
	-0.10	2.75	2.72	2.70
	-0.45	0.69	0.54	0.47
	-1.08	3.93	3.57	3.39
	-0.85	4.49	4.21	4.07
	-0.27	2.71	2.62	2.58
	-0.34	2.52	2.41	2.35
	-0.80	2.86	2.59	2.46
	-1.10	3.13	2.76	2.58
	-1.29	3.66	3.23	3.02
15/09/90	-0.38	2.25	2.12	2.06
	-0.03	3.24	3.23	3.23
	-0.05	0.94	0.92	0.92
	-1.91	1.66	1.02	0.71
	-1.65	2.41	1.86	1.59
	-1.00	1.59	1.26	1.09
	-1.25	3.50	3.08	2.88
	-0.42	0.46	0.32	0.25
	-1.78	0.74	0.15	-0.15
24/09/90	-2.61	3.27	2.40	1.97

Légende: P=Gmin S=Gmax-Gmi

---PS-32---

Date	P	S	P/3+S	P/2+S	
29/06/90	4.35	1.88	3.33	4.06	
	5.16	0.07	1.79	2.65	
	3.87	2.34	3.63	4.28	
	4.85	1.87	3.49	4.30	
	5.18	0.79	2.52	3.38	
	4.10	0.36	1.73	2.41	
	2.87	0.76	1.72	2.20	
	3.31	-1.21	-0.11	0.45	
	0.53	2.11	2.29	2.38	
	2.29	1.62	2.38	2.77	
	2.88	0.81	1.77	2.25	
	2.23	3.62	4.36	4.74	
	3.73	2.59	3.83	4.46	
	3.98	3.00	4.33	4.99	
	4.94	2.10	3.75	4.57	
	4.93	2.56	4.20	5.03	
	15/07/90	5.19	3.00	4.73	5.60
		6.33	2.28	4.39	5.45
		6.57	1.83	4.02	5.12
		6.12	1.68	3.72	4.74
5.36		1.95	3.74	4.63	
4.69		2.16	3.72	4.51	
5.46		2.08	3.90	4.81	
6.32		2.09	4.20	5.25	
6.67		1.85	4.07	5.19	
6.47		1.73	3.89	4.97	
5.02		1.64	3.31	4.15	
3.85		1.10	2.38	3.03	
3.31		0.77	1.87	2.43	
2.81		3.31	4.25	4.72	
3.94	2.88	4.19	4.85		
30/07/90	4.79	2.05	3.65	4.45	
	4.35	1.96	3.41	4.14	
	3.75	2.01	3.26	3.89	
	3.46	2.63	3.78	4.36	
	3.61	2.08	3.28	3.89	
	5.01	1.74	3.41	4.25	
	6.01	1.46	3.46	4.47	
	5.33	1.16	2.94	3.83	
	4.82	1.32	2.93	3.73	
	4.43	1.77	3.25	3.99	
	4.87	1.44	3.06	3.88	
	4.43	1.81	3.29	4.03	
	4.43	1.58	3.06	3.80	
	4.52	1.88	3.39	4.14	
	5.19	0.70	2.43	3.30	
	4.90	0.41	2.04	2.86	
	3.75	2.44	3.69	4.32	
	4.43	1.69	3.17	3.91	
4.23	0.17	1.58	2.29		
2.13	0.08	0.79	1.15		
1.90	1.82	2.45	2.77		
2.92	1.93	2.90	3.39		

	2.86	1.56	2.51	2.99
	2.68	2.01	2.90	3.35
	2.99	2.10	3.10	3.60
24/08/90	3.38	0.89	2.02	2.58
	2.29	1.69	2.45	2.84
	2.85	1.91	2.86	3.34
	3.25	1.44	2.52	3.07
	2.50	1.70	2.53	2.95
	3.80	1.09	2.36	2.99
	3.78	0.11	1.37	2.00
	2.43	0.41	1.22	1.63
01/09/90	1.64	1.75	2.30	2.57
	1.81	2.27	2.87	3.18
	3.00	1.09	2.09	2.59
	2.68	0.99	1.88	2.33
	2.31	1.40	2.17	2.56
	2.89	0.10	1.06	1.55
	0.97	1.10	1.42	1.59
	0.92	2.07	2.38	2.53
	1.43	0.89	1.37	1.61
	1.38	1.42	1.88	2.11
	1.37	1.48	1.94	2.17
	1.42	1.74	2.21	2.45
	1.22	1.86	2.27	2.47
	1.92	1.18	1.82	2.14
15/09/90	2.28	1.79	2.55	2.93
	2.25	0.42	1.17	1.55
	1.14	0.25	0.63	0.82
	0.31	0.86	0.96	1.02
	0.35	0.62	0.74	0.80
	0.58	1.50	1.69	1.79
	0.56	0.83	1.02	1.11
	0.49	0.83	0.99	1.08
	0.35	0.84	0.96	1.02
24/09/90	-0.29	0.99	0.89	0.85

BEAUMONT sur OISE

Gradient	T1	T2	T3	T1-T3	T1-T2
9.60	38.50	24.60	20.00	18.50	13.90
9.70	39.50	27.40	22.60	16.90	12.10
6.20	34.70	25.90	22.90	11.80	8.80
5.60	30.70	24.70	21.10	9.60	6.00
7.50	34.00	24.70	21.10	12.90	9.30
5.50	31.60	24.50	21.90	9.70	7.10
5.60	28.40	21.30	18.40	10.00	7.10
5.70	27.30	21.20	18.10	9.20	6.10
6.00	28.90	21.20	18.10	10.80	7.70
8.90	35.40	22.40	18.20	17.20	13.00
8.70	36.90	24.80	20.50	16.40	12.10
8.40	38.40	27.10	23.20	15.20	11.30
8.50	38.80	27.80	23.90	14.90	11.00
10.20	42.70	29.40	24.60	18.10	13.30
8.90	39.20	29.60	24.80	14.40	9.60
9.00	37.90	28.10	23.20	14.70	9.80
8.60	37.00	26.70	22.40	14.60	10.30
8.60	38.10	26.70	22.80	15.30	11.40
9.10	40.20	28.20	24.00	16.20	12.00
9.20	42.70	29.80	25.60	17.10	12.90
8.60	41.80	30.80	26.90	14.90	11.00
8.10	38.10	29.10	25.00	13.10	9.00
8.00	35.90	26.90	22.80	13.10	9.00
8.20	36.90	26.00	22.40	14.50	10.90
8.40	38.00	26.20	22.60	15.40	11.80
5.60	33.00	26.50	23.50	9.50	6.50
8.20	38.40	26.50	22.00	16.40	11.90
8.60	40.30	28.10	24.20	16.10	12.20
8.90	41.00	29.30	25.30	15.70	11.70
8.00	41.20	30.30	26.80	14.40	10.90
7.90	42.00	31.20	27.90	14.10	10.80
8.60	43.70	32.00	28.30	15.40	11.70
8.30	44.80	33.10	29.60	15.20	11.70
7.60	41.40	32.30	28.60	12.80	9.10
6.30	36.20	28.90	25.20	11.00	7.30
4.80	31.50	25.10	22.40	9.10	6.40
6.60	34.70	24.40	21.50	13.20	10.30
7.70	37.10	25.70	22.20	14.90	11.40
7.70	37.40	26.90	23.30	14.10	10.50
7.90	38.90	28.10	24.70	14.20	10.80
7.30	39.20	28.30	25.30	13.90	10.90
7.80	39.50	29.90	26.10	13.40	9.60
6.20	34.90	28.40	25.10	9.80	6.50
5.60	30.70	22.90	20.60	10.10	7.80
5.70	30.80	22.10	19.90	10.90	8.70
5.60	30.50	21.50	19.40	11.10	9.00
6.60	33.80	23.90	21.30	12.50	9.90
7.70	36.90	26.20	23.00	13.90	10.70
5.80	33.80	26.90	24.00	9.80	6.90
4.80	31.10	24.50	22.40	8.70	6.60
6.00	33.20	24.50	21.90	11.30	8.70
6.50	34.60	25.30	22.70	11.90	9.30
6.50	36.20	26.50	24.00	12.20	9.70

Gc-Gmax	Gcalcul	Gmax	Gradient	T1-T3
0.60	10.80	10.20	9.60	18.50
-0.10	9.80	9.90	9.70	16.90
0.50	6.90	6.40	6.20	11.80
-0.90	5.60	6.50	5.60	9.60
-0.30	7.50	7.80	7.50	12.90
0.10	5.70	5.60	5.50	9.70
0.10	5.80	5.70	5.60	10.00
-0.40	5.40	5.80	5.70	9.20
0.00	6.30	6.30	6.00	10.80
0.50	10.10	9.60	8.90	17.20
0.60	9.60	9.00	8.70	16.40
0.30	8.90	8.60	8.40	15.20
-0.20	8.70	8.90	8.50	14.90
-0.10	10.60	10.70	10.20	18.10
-0.90	8.40	9.30	8.90	14.40
-0.70	8.60	9.30	9.00	14.70
-0.50	8.50	9.00	8.60	14.60
-0.10	8.90	9.00	8.60	15.30
0.10	9.40	9.30	9.10	16.20
0.30	10.00	9.70	9.20	17.10
-0.30	8.70	9.00	8.60	14.90
-0.80	7.70	8.50	8.10	13.10
-0.60	7.70	8.30	8.00	13.10
-0.20	8.50	8.70	8.20	14.50
0.00	8.90	8.90	8.40	15.40
-0.20	5.50	5.70	5.60	9.50
0.70	9.60	8.90	8.20	16.40
0.20	9.40	9.20	8.60	16.10
-0.10	9.20	9.30	8.90	15.70
0.00	8.40	8.40	8.00	14.40
0.00	8.20	8.20	7.90	14.10
-0.10	8.90	9.00	8.60	15.40
0.20	8.90	8.70	8.30	15.20
-0.40	7.50	7.90	7.60	12.80
-0.50	6.50	7.00	6.30	11.00
0.00	5.30	5.30	4.80	9.10
0.30	7.70	7.40	6.60	13.20
0.50	8.70	8.20	7.70	14.90
0.20	8.20	8.00	7.70	14.10
0.10	8.30	8.20	7.90	14.20
0.50	8.10	7.60	7.30	13.90
-0.30	7.80	8.10	7.80	13.40
-0.70	5.70	6.40	6.20	9.80
0.10	5.90	5.80	5.60	10.10
0.20	6.30	6.10	5.70	10.90
0.20	6.50	6.30	5.60	11.10
0.50	7.30	6.80	6.60	12.50
0.20	8.10	7.90	7.70	13.90
-0.30	5.70	6.00	5.80	9.80
0.00	5.10	5.10	4.80	8.70
0.20	6.60	6.40	6.00	11.30
0.20	7.00	6.80	6.50	11.90
0.30	7.10	6.80	6.50	12.20
0.60	6.20	5.60	5.20	10.70
0.70	7.20	6.50	6.20	12.30

Moyenne: 0.01
 Ecart type: 0.04

BIBLIOGRAPHIE

- R. Ambrosino, A. Reny, JM. Galan : Effets des gradients thermiques.
Compte rendu de synthèse.
FAER N° 1.40.01.3, LRPC-
Bordeaux, décembre 1983
- M. Behr, P. Trouillet : Effets des gradients thermiques sur les ouvrages d'art. LRPC - Nancy, mars 1986
- Marc Borensztein : Application de la théorie des équivalences à la thermo-élasticité - Annales ITBTP N° 344, Novembre 1976
- H. Bosshart : Temperaturspannungen in Spannbetonbrücken. IVBH - Symposium, Madrid, 1970, Schlussbericht
- Chang Boon Seng : Températures et effets thermiques sur un pont en béton - Travail de fin d'études - ENTPE (1978-1979)
- AJ. Churchward : Thermal response in concrete bridges, Brisbane. Paper to 10th Australian Road Research Board Conference, Sydney, August 1980
- André Coin : Calcul élastique d'une poutre en béton dans un champ de température - Annales ITBTP N° 319, Juillet-Août 1974
- E. Collange, P. Jacques : Obtention des résistances élevées à court terme dans la réalisation de voussoirs d'ouvrages d'art. Répartition de la température dans les pièces, gradients thermiques. Annales ITBTP N° 387, Octobre 1980
- JH. Emanuel, JL. Husley : Temperature distributions in composite bridges. Journal of the Structural Division of ASCE, ST 1, 1978
- M. Emerson : Highways Design and Construction - Juillet 1977
- G. Fauchoux : Etude des gradients thermiques sur un pont dalle. FAER N° 40.01.3 - LRPC - Angers, Septembre 1985
- A. Grelat : Fissuration du béton sous gradient thermique - Annales ITBTP N° 360, Avril 1978

- JP. Jaccoud : Gradients thermiques dans les ponts.
Ingénieurs et architectes Suisses N° 23,
Novembre 1982
- F. Kehlbeck - Einfluss der Sonnenstrahlung bei Brückenbauwerken
Werner Verlag, 1975
- M. Piguet : Influence de la température dans les ouvrages d'art
lors de la pose de revêtements hydrocarbonés chauds
Ingénieurs et architectes Suisses N° 11, mai 1982
- P. Priestley : Ambient thermal Response of Concrete Bridges.
Bridge Seminar 1978, volume 2. Road Research
Unit, RRU Bulletin 42, 1979, New-Zealand
- I. Shahrour : Initiation aux méthodes numériques. Cours de
DEA Génie Civil, 1986
- B. Tonnoir : - Etude des effets des gradients thermiques sur
un modèle de poutre en béton précontraint -
LRPC Lille, mars 1981
- Viaduc Jules Verne - Suivi expérimental sur
site pendant la construction - Conférence
ITBTP - CESDA du 20 octobre 1987
- JH. Wood : In situ thermal measurements. In RRU Bulletin 42,
1979, New Zealand
- T. Zichner : Temperaturunterschied infolge witterungseinfluss
und Beheizung von massiven Brücken. Schriftenreihe
Forschung, Strassenbau und Strassenverkehrstechnik
BVM Bonn, Heft 212, 1976.



RESUME

L'étude de l'effet des gradients thermiques sur les ouvrages d'art est un travail qui a été engagé de longue date dans le réseau des laboratoires des ponts et chaussées.

L'étude a eu pour objectifs les points suivants :

- rassembler les dossiers existants et constituer une bibliothèque de données
- continuer les mesures sur sites en s'intéressant à d'autres paramètres : ensoleillement et effet du vent notamment
- déboucher sur des modèles de calcul prévisionnels simples mais réalistes.

Les principaux résultats obtenus sont :

- distinction de deux grands types d'ouvrages : les ponts à mesures et les ponts-dalles
- les ouvrages en béton léger ne sont pas plus sollicités que les ouvrages en béton traditionnel
- proposition d'un profil de calcul non linéaire pour les ponts à nervures.