MESURE DE GRADIENT THERMIQUE DANS LES OUVRAGES EN BÉTON

PRINCIPE ET DESCRIPTION SOMMAIRE

OBJECTIF

L'ensoleillement de l'extrados, ainsi que la faible conductivité thermique du béton, sont les causes principales de l'hétérogénéité de la température dans les tabliers de pont. En particulier, les différences de température entre l'extrados et l'intrados engendrent, dans les ponts hyperstatiques à travées continues ou des ponts très larges sur de multiples points d'appuis, des déformations gênées et des sollicitations internes au tablier.

Dans les ouvrages en béton précontraint, ce moment hyperstatique d'origine thermique peut être suffisant pour décomprimer localement le béton et provoquer un déficit de résistance de l'ouvrage. Il peut aussi apparaître des décollements ou des cheminements d'appuis.

Depuis les années 1970, les règlements (fasc. 61 des CPC, Eurocode 1 Bases de calcul et actions sur les structures [1]) imposent la prise en compte des effets de gradient thermique dans les ponts hyperstatiques. Les règlements fixent des valeurs forfaitaires de gradient thermique, et l'Eurocode 1 ouvre la possibilité d'évaluer le gradient thermique par la méthode observationnelle.

L'objectif des mesures de gradient thermique est de recueillir les variations spatiales de températures internes au béton sur un ouvrage en service, de façon à calculer deux grandeurs fondamentales :

- la température moyenne dans une section (dite « température uniforme » dans l'Eurocode),
- la différence de température entre l'extrados et l'intrados, appelée par abus de langage « gradient thermique » dans l'Eurocode.

La détermination du gradient thermique est utile pour :

- préciser le mode de fonctionnement d'un ouvrage en tenant compte des particularités géographiques du site où il a été implanté,
- interpréter les mesures effectuées sur un ouvrage, notamment des mesures de pesées de réaction d'appui ;
- estimer les périodes de retour de sollicitations thermiques extrêmes sur un site donné ;
- déterminer le gradient thermique transversal (notamment pour les ponts à double caisson, les ponts biais ou courbes ou les dalles très larges).

PRINCIPE

Le principe consiste à instrumenter une section de tablier de façon à disposer d'un ensemble de points représentatif des isothermes dans le béton. À chaque point une sonde de température est implantée ; pour chaque sonde est affectée une zone élémentaire d'aire dS de la section où la température est supposée uniforme et donnée par la sonde. La température moyenne Tm de la section est donnée par l'intégrale des différentes températures pondérées par les surfaces élémentaires selon la formule :

$$Tm = 1/S \int (T\, dS) \qquad \text{(en °c)}$$

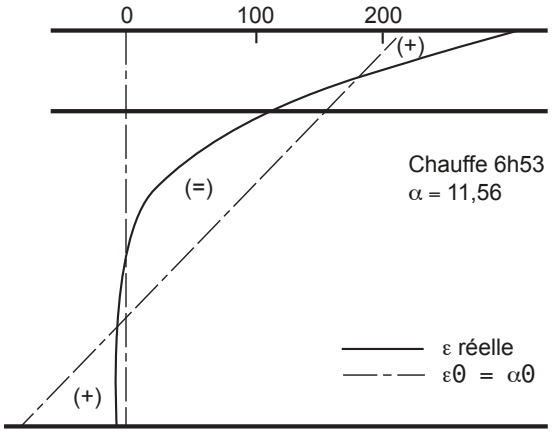
Le gradient thermique efficace vertical dans une section d'axe vertical z et d'axe horizontal y est donné par la formule suivante :

$$Geff = 1/ Iy \int (T\, z.dS) \qquad \text{(en °C / m)}$$

Où Iy représente l'inertie de la section par rapport à l'axe y et z la distance entre le centre de gravité de l'aire élémentaire dS et l'axe d'inertie y.

La figure 1 montre un exemple des déformations « réelles » proportionnelles à la distribution verticale des températures dans une section de pont en béton, des déformations planes qui en résultent proportionnelles à la pente du gradient thermique efficace et aux déformations gênées qui en résultent provoquant des auto-contraintes de compression (+) et de traction (-) dans la section.

L'instrumentation peut durer quelques heures lorsqu'il s'agit d'apporter des corrections thermiques à d'autres mesures (flèches, déformations, réaction d'appui, etc.), comme elle peut être maintenue pendant une année ou plus si l'on a besoin de connaître l'évolution du gradient à l'échelle annuelle. Les séries chronologiques des températures aux différents points sont ensuite converties en courbes de variation temporelle de la température moyenne et du gradient thermique de la section.

PRINCIPE	 Figure 1 : Exemple de la distribution des déformations d'une section courante (+) zone en compression (-) zone de traction [2] Ces courbes de variation temporelles mettent en évidence les alternances diurnes/nocturnes, les tendances saisonnières et annuelles. Si l'on dispose d'enregistrements sur quelques années [3], il est possible d'estimer les valeurs de période de retour quinquennale ou décennale par calage d'une loi de valeurs extrêmes. (Réf [4]).
CARACTÈRE DESTRUCTIF DE LA MÉTHODE	Faible. Il s'agit d'effectuer quelques perçages dans le béton du tablier, sur des profondeurs variables (de profondeur maximale d'un à deux dm environ). Ces perçages seront rebouchés à la fin des opérations.
MATURITÉ	Méthode éprouvée depuis plus de 30 ans.
MATÉRIEL SPÉCIFIQUE EMPLOYÉ	On doit procéder à un repérage des armatures superficielles et éventuellement profondes (au pachomètre ou au radar) pour positionner au mieux les perçages. L'instrumentation elle-même nécessite entre 6 et 20 sondes de température (les sondes Pt100 sont particulièrement bien adaptées, mais des thermocouples peuvent aussi être utilisés - voir fiche C3-17), une ou deux centrales de mesure, et une alimentation électrique Basse Tension.
MODALITÉS D'APPLICATIONS	
DOMAINE D'APPLICATION	Principalement, sur les ponts en béton à travées continues et notamment les ponts en béton précontraint. La méthode est applicable également aux ponts métalliques et mixtes. (cf. l'instrumentation du pont de Normandie et du viaduc de Millau), mais la présente fiche est développée pour les ouvrages en béton.
SUJÉTIONS PRATIQUES D'INTERVENTION	Une analyse de l'environnement de l'ouvrage et de son exposition à l'ensoleillement est à faire avant d'implanter les sections comportant des sondes de température, notamment pour examiner si on peut considérer que le gradient thermique est constant tout au long du pont. Dans la mesure où la connaissance du gradient vertical est souvent l'objectif principal, il s'agit de répartir les capteurs de température sur une verticale. La densité verticale des capteurs dépend de l'amplitude locale des variations thermiques ; ainsi : – l'instrumentation est dense dans le hourdis supérieur du tablier (de l'ordre de 4 à 5 sondes pour un hourdis d'épaisseur 25 cm), car une mauvaise appréhension de la variation de température dans cette partie de la section a une conséquence importante sur la valeur du gradient ; l'implantation des sondes dans le hourdis se fait pas le dessous, et il convient de repérer l'épaisseur exacte du hourdis afin de ne pas percer la chape d'étanchéité ; – les capteurs sont plus espacés à l'ombre, et dans les zones à fable variation thermique comme le hourdis inférieur. Les fibres extrêmes (intrados et extrados) de la section doivent impérativement être instrumentées. Si, en pratique, cela n'est pas possible, il faudra estimer leurs températures d'une façon indirecte ; car elles constituent la base minimale, indispensable, de l'évaluation du gradient thermique

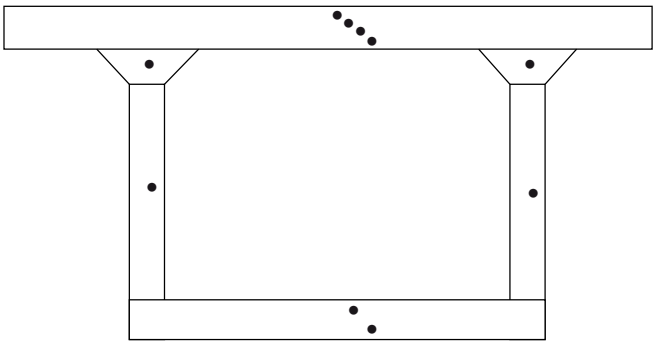


Figure 2 : Exemple d'implantation de sondes de températures (points noirs) dans une section de pont-caisson

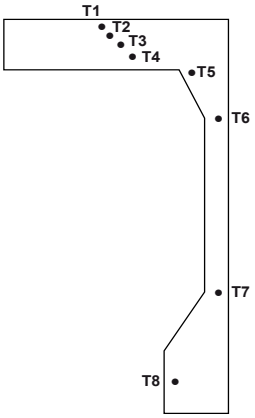


Figure 3 : Exemple d'implantation de sondes T1 à T8 dans une demi-section de poutre de VIPP



Photo 1 : Câblage d'une verticale de capteurs implantés dans l'âme d'une poutre précontrainte (Cerema)



Photo 2 : Raccordement des capteurs à un conditionneur sans-fil (boîtier PEGASE) (Cerema)

LIMITES D'UTILISATION	Pas de limite inhérente à la méthode
PRÉCISION ET/OU SENSIBILITÉ	Dans un pont-caisson en béton, le passage de 5 à 10 sondes de température n'apporte un gain de précision que de 0,5°C pour la température moyenne, et de 0,1°C pour le « gradient thermique ». Par ailleurs, chaque année de mesure supplémentaire dans les cinq premières années d'instrumentation affine la connaissance des extrêmes quinquennaux ou décennaux de plusieurs degrés.
PERSONNEL ET COMPÉTENCES	Chargé d'investigation

CARACTÉRISTIQUES OPÉRATOIRES

ACCÈS À 1 OU 2 FACES	Pour une poutre ou une nervure : le recours à une nacelle ou une plate-forme permet généralement les perçages des deux côtés d'une poutre. Pour un caisson : les perçages se font pour l'essentiel par l'intérieur du caisson.
COUPURES OU RESTRICTIONS DE CIRCULATION NÉCESSAIRES	Pas de coupures à prévoir.

RENDEMENT ET/OU ÉCHANTILLONNAGE	Suivant la durée de l'instrumentation et les capacités-mémoire de la centrale, on effectue en général une à quatre acquisitions de mesure(s) par heure. Il est utile de considérer que l'heure du gradient maximal se situe généralement entre 17 et 18h, et l'heure du gradient minimal entre 5 h et 6 h du matin. Les gradients extrêmes interviennent en général (en France métropolitaine) entre Juin et Août, selon les années, lorsque l'ensoleillement est maximal et que les nuits sont fraîches. Toutefois, selon les régions, les gradients sont parfois obtenus à des époques différentes d'où l'intérêt d'instrumenter des années complètes.
DÉLAIS DE DISPONIBILITÉ DES RÉSULTATS	L'instrumentation donne des distributions de température dès les premières 24 h. On ne peut toutefois considérer les résultats comme exploitables qu'au bout de quelques semaines, voire quelques mois (et de préférence une année entière) d'enregistrement.
PERTURBATIONS DU TRAFIC SUR LES MESURES	Non
PERTURBATIONS DE L'ENVIRONNEMENT SUR LES MESURES	Pas de perturbations sur les mesures elles-mêmes, mais le gradient dépend fortement de l'environnement thermique.
RISQUES POUR LES UTILISATEURS OU LE PUBLIC	Non
ENCOMBREMENT – POIDS	Matériel léger et peu encombrant
AVANTAGES – INCONVÉNIENTS	
AVANTAGES	Détermination qualitative et quantitative des fluctuations de température dans une structure. Moyen unique de déterminer le chargement thermique réel d'une structure en site propre. Permet d'optimiser les justifications sur les ouvrages critiques.
INCONVÉNIENTS	Néant
DISPONIBILITÉ – COÛT	
DISPONIBILITÉ	Courante
COÛT	Moyen à élevé selon la durée d'instrumentation
RÉFÉRENCES	
NORMES – MODES OPÉRATOIRES – ARTICLES	[1] AFNOR, Eurocode 1 Bases de calcul et actions sur les structures (2005) [2] BEHR, M ; TROUILLET, P, (1988), Ouvrages d'art : Actions et sollicitations thermiques. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°155, mai-juin 1988, LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES - LCPC, pp 57-72 [3] DIRUY M. (1987) Fluage des structures en béton précontraint: le point sur les expérimentations faites par le LCPC depuis 15 ans. Ann. ITBTP, n°455, pp. 119-136 [4] LUCAS J.M., VIRLOGEUX M. LOUIS, C., (2005), Temperature in the box girder of the Normandie Bridge. Structural Engineering International, 3/2005, pp 156-165 [5] TONNOIR B.(2005), Méthode pour l'évaluation de la température moyenne et du gradient thermique dans une section d'ouvrage en béton (1999, rév. 2005), Rapport interne, LRPC de Lille.