

# CONTRÔLE EMPIRIQUE DES DÉFORMATIONS TRANSITOIRES DES GRANDES TOURS DE RÉFRIGÉRATION SOUS L'ACTION DE L'ENSOLEILLEMENT

Par

GY. HOLÉCZY et P. MÁJAY

Université Technique de Budapest, Institut de Géodésie,

Chaire de Géodésie

Accepté le 27 novembre, 1978

## I. Objectif et aspects de l'étude

Dans le cadre du programme de recherche concernant le développement des systèmes réfrigérants des grandes centrales électriques, en 1977 la Chaire de Géodésie de l'Université Technique de Budapest fut chargée de la détermination par voie empirique des déformations du manteau en béton armé des grandes tours de réfrigération des centrales électriques, et de l'évaluation géométrique totale de la forme de manteau déformée. Un des aspects étudiés était de mesurer et d'évaluer les déformations thermiques, dues à l'insolation continue à la direction variable, lorsque l'ouvrage n'est pas sujet à d'autres effets transitoires (p.e. action du vent). On devait faire les mesures sur une des tours de réfrigération de 200 MW au manteau hyperbolique de la centrale thermique «Gagarin» à Visonta (Hongrie) en exploitation.

Dans nos travaux précédents, nous n'avons déterminé les déformations dues à l'action thermique du soleil de grands ouvrages ayant un manteau en béton armé que sur des tours élancées (de petit diamètre et de grande hauteur), où l'action thermique unilatérale produisait une inclinaison transitoire de l'axe vertical de l'ouvrage, sans donner lieu à des variations interprétables dans la forme et les dimensions des coupes horizontales [1], [3].

Il résulte des données constructives et d'exploitation des tours de réfrigération que les déformations dues à l'action de l'insolation seront beaucoup plus complexes dans le cas de la tour de grand diamètre que pour des tours élancées, nous avons donc interprété les déformations aux points de vue suivants:

- a) Comment les génératrices (les méridiennes) du manteau changent-elles leur forme en fonction de la direction de l'insolation au cours de la journée?
- b) Comment l'action thermique du soleil augmente-t-elle les rayons des cercles en coupe horizontale, rapporté aux divisions du jour, et à quelle absorption de chaleur moyenne correspondent les augmentations de rayon?

c) Combien les points mesurés des courbes de déformation en coupe horizontale dévient-ils du cercle d'ajustement des courbes de déformation?

d) Quelle forme la déviation de la ligne axiale du manteau déformé prend-elle sous l'action thermique extérieure, à la direction variable au cours de la journée, et les écartements des points axiaux, dus à la déviation dans chacune des coupes horizontales à quelle différence de température des côtés opposés correspondent-ils?

e) Quelle est l'orientation des axes des ellipses compensant les courbes de déformation horizontales dans le système des coordonnées de la mesure, et quel angle ces axes forment-ils avec la direction du soleil au moment de la mesure?

## 2. Choix de l'heure et de la méthode des mesures

En outre de la condition que les résultats de mesure ne soient pas influencés par d'autres effets que celui de l'insolation continue de toute la journée, il était pratique de choisir une période lorsque il était à prévoir que les déformations de l'ouvrage seront les plus grandes et leur développement durant la journée se prête le moins à la simulation par considérations théoriques. En excluant dès le début la saison d'hiver et en tenant compte de l'analogie, au point de vue de l'étude des conditions de printemps et d'automne, nous n'avons fait une comparaison que pour l'été et pour l'entrée de l'automne. C'est que dans nos études précédentes nous avons obtenu les plus grands déplacements des points axiaux dus à l'insolation sur les tours élancées à la fin du printemps ou à l'entrée de l'automne, lorsque les nuits fraîches sont suivies dans la journée d'un échauffement relativement important [2]. Mais étant donné que les deux méridiens opposés de la coupe verticale, en sens de l'insolation, de la tour de réfrigération ne peuvent plus s'échauffer en même temps — par suite de la faible altitude du soleil — nous jugions utile de choisir pour nos mesures un des jours d'août, lorsque le soleil chauffe aussi pendant quelques heures la surface intérieure du manteau en béton armé, tandis que les autres conditions atmosphériques satisfont aux exigences connues.

Un gros inconvénient de la mesure était l'impossibilité de marquer les points de la surface de l'ouvrage. A cause du manteau hyperboloïde et l'inaccessibilité des points, nous étions a priori forcés de renoncer à la projection optique précise, assurant de manière plus simple la précision prévue de la mesure, et la seule possibilité était d'utiliser la méthode des séries de visées aux points de contour du manteau. Mais il fallait établir le nombre des visées sur chacun des points mesurés de contour de façon que l'erreur moyenne «a priori» des valeurs de déformation reste sous  $\mu = \pm 3$  mm. En effet les calculs approchés préalables montraient que les valeurs des déformations par points ne dépasseront probablement à aucun endroit 30 mm: pour pouvoir en tirer des conclu-

sions, une précision de la mesure des déformations d'au moins de  $\pm 3$  mm était donc indispensable.

La fig. 1 représente les positions relatives des points de station et des points visés, pour chacune des coupes horizontales du manteau. Les distances circonférentielles entre les points se rapportent au cercle de la console du balcon à 114 m d'hauteur: ce cercle déterminait en même temps le cercle le plus haut — le 7<sup>e</sup> — en coupe horizontale qu'on peut encore viser des points de station. En effet, le plan préalable des travaux prévoyait des mesures en 7 coupes horizontales et en 8 points dans chacune des coupes, trois fois dans les heures différentes de la journée, après la première mesure (de référence ou de base), effectuée avant le lever du soleil. Puisque la méthode de mesure était prévue de manière que les résultats soient réduits au milieu de la durée de mesure de 1.5 à 2 heures, les moments des mesures (désignées par A, B et C), succédant à la mesure de base (désignée par 0 dans ce qui suit) et les températures moyennes de l'air à l'ombre étaient les suivants:

mesure A: 10 <sup>h</sup> 5	32,0 °C
mesure B: 13 <sup>h</sup> 0	35,9 °C
mesure C: 17 <sup>h</sup> 0	29,7 °C.

Il est à remarquer que par des raisons techniques les dénivellations des coupes horizontales consécutives n'étaient pas constantes, mais au cours de l'élaboration les points mesurés des coupes horizontales étaient réduits à des séries de points verticalement équidistants de même que les distances circonférentielles des points de chaque coupe horizontale.

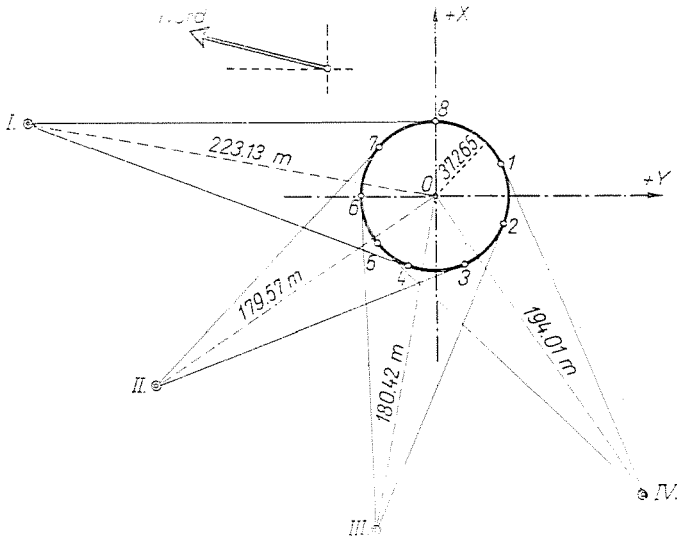


Fig. 1.

### 3. Compensation des résultats de mesure

En formant la moyenne des 8 lectures des 4 visées en chacun des points aux moments de mesure indiqués, on a obtenu les valeurs de direction à points visés. En les réduisant par les valeurs de direction, déterminées de manière analogue aux bornes géodésiques précises marquées sur le fond de la tour, nous avons obtenu les valeurs de direction réduites qui — en différents moments de mesure pour les mêmes directions — ne coïncident que par suite des erreurs de mesure inévitables et des déplacements effectifs des point examinés, survenus dans les intervalles des moments de mesure.

Dans l'opération suivante nous avons calculé les différences des valeurs de direction réduites des mesures A, B et C par rapport à la mesure O, de manière que l'écart angulaire avait le signe négatif, si le mouvement — du point exprimé par ce signe — diminuait la valeur du rayon dans ce point. Enfin nous avons transformé les écarts angulaires en vecteurs de mouvement linéaires, situés dans le rayon horizontal respectif du manteau.

Il était évident des résultats obtenus qu'en ce qui concernait le but de l'examen empirique, il ne fallait pas compter avec des déformations notables du manteau.

Chacun des vecteurs de mouvement linéaires par points était déterminé en fin de compte comme la moyenne de 32 lectures de 16 visées. A cause de l'incertitude des visées des points de surface, dans les valeurs de mouvement il fallait pourtant supposer des erreurs de caractère accidentel considérables. En conséquence nous avons compensé les résultats de mesure.

Le système de compensation fut choisi partant de la considération que les erreurs accidentelles des mesures sur la surface du manteau montrent des inégalités (c.-à-d. des ondes) qui sont en opposition avec les déformations théoriques dues à des actions thermiques à la direction et à l'intensité uniformes ou uniformément variables, affectant les lignes définies de la surface. Puisque dans cette interprétation l'effet thermique affecte premièrement les points de surface du manteau dans le plan de la coupe verticale, on appliquait la compensation aux courbes de déformation des méridiens. Mais la forme de la courbe de compensation était problématique. Étant donné que les déformations des méridiens sont dues décisivement au décentrement relatif des coupes horizontales, l'équation des courbes de déformation les plus probables des méridiens peut être remplacée pour la pratique par la forme théorique de l'équation de la courbe axiale de l'ouvrage en question. Donc, — compte tenu de l'épaisseur de manteau égale dans toute la hauteur — nous avons pris pour décrire la forme préalable de la courbe de compensation le polynôme de second degré

$$y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c.$$

Dans le cas où l'importance des corrections déterminées par la compensation le justifie, on peut compenser aussi à l'aide d'une courbe de troisième

degré [12]. L'ordinateur EMG 666 déterminait les coefficients des polynômes, puis dès la hauteur de 24 m les variations  $\Delta r_i$  des rayons des points examinés par niveaux de 15 m suivant un programme enregistré sur bande magnétique, de manière que les écarts radiaux entre les points de la courbe de compensation et les points mesurés répondent à la condition

$$[r_{r_i}^2]_1^n = \text{minimum.}$$

En se basant sur la compensation, l'erreur moyenne quadratique de la détermination du mouvement d'un point examiné calculé de l'ensemble (168) des corrections de mesure, se chiffrait à

$$\mu = \pm 1.76 \text{ mm.}$$

Cette erreur moyenne ne monte qu'à la moitié environ de l'erreur moyenne, posée comme valeur limite de la précision à atteindre lors de l'établissement du plan de mesure. C'est pourquoi les vecteurs de mouvement compensés par un polynôme de second degré étaient considérés comme valeurs de départ pour les déterminations des déformations ultérieures.

#### 4. Étude des changements de forme et de dimension

Après avoir compensé les lignes de déformation mesurées en coupes verticales, on a obtenu pour toutes les trois périodes de la journée les déformations les plus probables des méridiens, déterminant la forme changée du manteau en béton, fonction en même temps de la forme posée de la courbe de compensation.

Puisque les calculs ultérieures se simplifient considérablement si à l'intérieur d'une coupe horizontale les points ont une répartition symétrique, — considérée en [5], comme la disposition la plus avantageuse des mesures d'une coupe circulaire — des conversions correspondantes ont eu lieu au préalable. Le Tableau I renferme les résultats obtenus en mm; les résultats des conversions étaient utilisés pour tracer en échelle double les courbes de déformation des méridiens sur la figure 2 qui permet d'apprécier le changement journalier des déformations en coupes verticales.

En possession des déformations méridiennes, on a continué l'examen de la déformation du manteau en tenant compte des coupes horizontales mesurées. Pour cette analyse nous sommes partis de la considération que sous l'effet thermique du soleil les cercles des coupes horizontales ne changent pas seulement leurs dimensions, mais aussi leur forme; en même temps — par suite du réchauffement différent des parties du manteau exposées au soleil et opposées

Tableau I

N°	M (m)	$\Delta r_i$ (mm)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Mesure A									
1	24	-0,5	4,8	0,3	0,3	-2,3	3,8	1,0	-9,3
2	39	-2,0	5,2	4,0	2,2	0,0	2,9	0,5	-8,2
3	54	-2,9	3,7	5,5	4,0	2,0	2,5	0,3	-6,6
4	69	-3,7	1,0	5,0	5,6	3,4	2,5	-0,5	-5,0
5	84	-4,1	-2,1	3,4	7,1	4,3	2,9	-1,9	-3,2
6	99	-4,8	-5,0	1,4	8,5	4,8	3,8	-4,0	-1,2
7	114	-6,0	-6,7	-0,3	9,6	4,7	5,0	-6,7	0,9
Mesure B									
1	24	0,8	1,8	1,5	1,8	1,7	6,1	-2,0	-2,0
2	39	0,9	1,4	0,3	3,1	6,4	9,8	3,3	-3,4
3	54	1,1	0,9	-1,2	3,5	9,5	12,6	7,5	-3,7
4	69	1,3	0,3	-3,0	3,2	10,9	14,4	10,2	-2,9
5	84	2,1	-0,3	-5,0	1,9	10,6	15,2	11,3	-1,1
6	99	3,0	-0,9	-7,3	-0,1	8,6	15,1	11,1	1,8
7	114	3,9	-1,6	-9,8	-3,0	5,0	14,0	9,4	5,8
Mesure C									
1	24	1,0	3,0	1,4	1,0	3,8	4,4	-0,3	-1,9
2	39	2,5	1,8	-0,4	0,7	7,5	7,8	3,8	0,9
3	54	3,9	1,0	-1,9	1,2	9,3	10,1	7,0	3,9
4	69	5,1	0,4	-3,4	0,5	9,1	11,5	9,4	6,9
5	84	7,1	0,2	-4,7	-1,4	6,9	11,7	11,0	10,0
6	99	6,8	0,3	-5,9	-4,6	2,6	11,0	11,8	13,2
7	114	7,4	0,7	-6,9	-9,0	-3,6	9,2	11,8	16,5

— les centres des coupes horizontales superposées sont soumises à des déplacements horizontaux de distances et de sens divers en fonction de la hauteur. A proprement parler, cela signifie que chaque variation de rayon compensée  $\Delta r_i$  (comme déplacement résultant local) a trois composantes radiales: la projection  $dr_i$  du déplacement  $d$  du point axial correspondant sur le rayon  $r_i$  (dû au déplacement horizontal de la coupe), la variation  $RO$  de rayon (une variation constante de tous les rayons de la coupe c.-à.-d. équivalant au changement de dimension du cercle), enfin la composante de déformation  $vr_i$  locale, détermi-

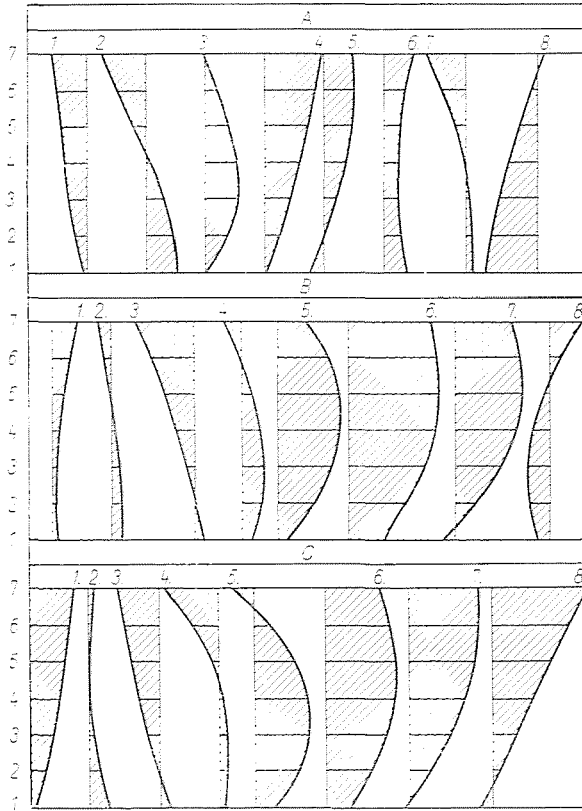


Fig. 2

nant la déformation effective du cercle (nommées, pour les distinguer des déformations résultantes  $\Delta r_i$ , composantes de la déformation du cercle). De cette manière on a pu ramener la détermination à la solution du problème pratique qu'on emploie aussi p.e. en cas du contrôle géodésique des travaux de construction des tours au manteau cylindrique ou conique [4], [6]. Ainsi, en considérant le centre du cercle de compensation comme centre de la figure plane contournée par la courbe de déformation horizontale on obtient les coordonnées du centre  $dy$  et  $dx$  dans le système de coordonnées rectangulaires, passant par le centre de référence (au cas présent le centre du cercle du mesure 0) à l'aide des équations

$$dy = \frac{2[r_i \sin \delta_i]_1^n}{n} \quad (1)$$

et

$$dx = \frac{2[r_i \cos \delta_i]_1^n}{n} \quad (2)$$

où  $\delta_i$  signifie la direction du vecteur de mouvement  $\Delta r_i$  dans le système des coordonnées posé, et  $n$  le nombre des  $\Delta r_i$  mesurés dans chacune des coupes horizontales (dans le cas présent  $n = 8$ ).

D'après (1) et (2), vu que  $d = \sqrt{dy^2 + dx^2}$  et que  $\delta_d = \text{arc tg } \frac{dy}{dx}$ , le déplacement horizontal  $d$  de la coupe contribue à un mouvement résultant quelconque  $\Delta r_i$  avec la valeur

$$\Delta r_i = d \cdot \cos(\delta_i - \delta_d). \quad (3)$$

L'autre composante de  $\Delta r_i$ , la variation de rayon  $RO$ , détermine le changement de dimension du cercle, qu'on obtient directement des valeurs  $\Delta r_i$  [6]:

$$RO = \frac{[\Delta r_i]_i^n}{n}. \quad (4)$$

Tableau 2

Coupe horizontale							
	1	2	3	4	5	6	7
Mesure A							
$RO$	-0.2	0.6	1.1	1.0	0.8	0.4	0.1
$dy$	0.4	0.7	0.4	-0.7	-1.8	-2.9	-3.7
$dx$	-1.7	-3.4	-4.4	-4.9	-5.0	-5.1	-5.2
$d$	1.7	3.5	4.4	4.9	5.3	5.9	6.4
$\delta_d$	167°	168°	175°	188°	200°	210°	215°
Mesure B							
$RO$	1.2	2.7	3.8	4.3	4.3	3.9	3.0
$dy$	-0.6	-3.6	-5.9	-7.6	-8.3	-8.2	-7.5
$dx$	-1.7	-2.1	-1.7	-0.9	0.6	2.7	5.4
$d$	1.8	4.2	6.2	7.6	8.3	8.7	9.2
$\delta_d$	200°	240°	254°	263°	274°	288°	305°
Mesure C							
$RO$	1.3	3.1	4.3	4.9	5.0	4.4	3.3
$dy$	-1.2	-3.1	-4.8	-5.7	-5.8	-5.0	-3.5
$dx$	-0.4	-0.1	1.3	3.2	5.5	8.3	11.6
$d$	1.2	3.1	5.0	6.6	8.0	9.7	12.1
$\delta_d$	252°	268°	285°	299°	313°	329°	343°



Enfin on obtient les composantes de la déformation du cercle  $vr_i$ , des valeurs  $\Delta r_i$  (au point de vue de la compensation, à proprement parler les corrections  $vr_i$ ) des valeurs  $\Delta r_i$  par la réduction

$$vr_i = r_i - dr_i - RO. \quad (5)$$

Les résultats de l'interprétation géométrique du cercle des coupes horizontales, calculés d'après (1), (2) et (4), sont résumés dans le Tableau 2 et les déformations de cercle selon (5) dans le Tableau 3. Les valeurs de mouvement

Tableau 3

N°	M (m)	Déformations de cercle horizontales $vr_i$ (en mm)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Mesure A									
1	24	1,2	4,6	-1,5	-1,3	-2,9	4,7	2,3	-6,9
2	39	-0,7	3,8	0,3	-1,9	-2,5	3,2	3,0	-5,1
3	54	-1,1	2,3	1,1	-1,5	-1,9	1,8	2,6	-3,2
4	69	-0,8	0,6	1,0	-0,3	-1,6	0,8	1,4	-1,2
5	84	-0,1	-1,1	0,3	1,3	-1,3	0,3	-0,4	1,0
6	99	0,4	-2,5	-0,5	3,0	-1,3	0,4	-2,9	3,4
7	114	0,2	-3,1	-1,4	4,3	-1,6	1,3	-5,7	6,0
Mesure B									
1	24	1,3	1,2	-0,5	-1,2	-1,1	4,4	-2,7	-1,4
2	39	2,2	2,3	-1,3	-1,7	-0,3	3,5	-0,5	-4,1
3	54	2,8	3,1	-2,0	-2,0	0,3	2,9	0,8	-5,7
4	69	3,0	3,6	-2,6	-2,0	0,6	2,5	1,2	-6,3
5	84	3,2	3,6	-3,1	-1,8	0,9	2,6	0,7	-6,1
6	99	3,0	3,4	-3,4	-1,3	0,8	2,9	-0,6	-4,9
7	114	2,4	2,9	-3,6	-0,6	0,6	3,5	-2,7	-2,6
Mesure C									
1	24	-0,2	2,2	-0,2	-3,3	1,4	2,6	-1,3	-2,2
2	39	1,7	1,9	-1,3	-2,5	2,1	1,6	-1,4	-2,1
3	54	2,1	1,5	-1,9	-1,8	2,5	1,0	-1,6	-1,7
4	69	2,0	1,2	-2,0	-1,3	2,3	0,8	-1,8	-1,2
5	84	1,3	1,0	-1,7	-0,9	1,7	0,9	-1,9	-0,5
6	99	0,1	1,0	-0,8	-0,5	0,5	1,6	-2,1	0,5
7	114	-1,6	0,9	0,5	-0,6	-1,1	2,5	-2,1	1,6

dans le tableau ont une précision de 0,1 mm. En même temps il suffit de calculer les directions des déplacements avec une précision de 1°.

En passant à l'examen des données du Tableau 2, nous analysons d'abord les conclusions qu'on peut tirer des valeurs de  $RO$ .

Du changement de  $RO$  (changement moyen des rayons) — en considérant à cause des déformations faibles la courbe de déformation horizontale de longueur égale au périmètre du cercle de compensation — on peut conclure au changement  $\Delta K$  de la longueur du périmètre  $K$  de la coupe, et de celui-ci à l'absorption de chaleur moyenne  $\Delta t_a$  dans la hauteur de la coupe; on aura donc:

$$\Delta t_a = \frac{\Delta K}{\alpha K_i} = \frac{2\pi(R_i + RO) - 2\pi R_i}{\alpha \cdot K_i} = \frac{RO}{\alpha R_i} \quad (6)$$

où  $\alpha$  est le coefficient de dilatation thermique du mur,  $R_i^3$  le rayon avant l'absorption de chaleur (dans le cas présent le rayon prévu). Les résultats du Tableau 4 sont calculés à partir de (6). Ce tableau renferme les rayons prévus  $R_i$  de chacune des coupes horizontales, les changements de rayon moyens  $RO$  pour chaque moment de mesure, l'allongement  $\Delta K$  du périmètre du cercle et la différence de température moyenne  $\Delta t_a$ , correspondant au changement  $\Delta K$ .

Tableau 4

N°	$R_i$ (m)	A.			B.			C.		
		$RO$	$\Delta K$	$\Delta t_a$	$RO$	$\Delta K$	$\Delta t_a$	$RO$	$\Delta K$	$\Delta t_a$
1	45,338	-0,2	-1,2	-0,4	1,2	7,5	2,3	1,3	8,2	2,5
2	42,255	0,6	3,8	1,2	2,7	17,0	5,6	3,1	19,5	6,4
3	39,710	1,1	6,9	2,4	3,8	23,9	8,3	4,3	27,0	9,4
4	37,730	1,0	6,3	2,3	4,3	27,0	9,9	4,9	30,8	11,3
5	36,400	0,8	5,0	1,9	4,3	27,0	10,3	5,0	31,4	11,9
6	35,800	0,4	2,5	1,0	3,9	24,5	9,5	4,4	27,6	10,7
7	37,265	0,1	0,6	0,2	3,0	18,8	7,0	3,3	20,7	7,7

Quant aux valeurs obtenues à la hauteur de 24 m où se situe la coupe 1. il faut mentionner que le manteau a une épaisseur de 43,5 cm qui augmente à 61,5 cm le long du secteur de 2 m au-dessous de cette coupe. Il était donc à attendre que par rapport à l'épaisseur constante de 17 cm depuis la hauteur de 32 m l'absorption de chaleur moyenne du manteau dans la hauteur de la coupe 1 sera sensiblement plus faible. Il est de même pour l'absorption de chaleur de la coupe 7 à la hauteur de 114 m, puisque les résultats de mesure de cette coupe se rapportent à la masse plus grande du balcon circulaire de l'ouvrage. Mais singulièrement  $\Delta t_a$  va en augmentant de la coupe 4 à la coupe 5,

puis on constate de nouveau une tendance de diminution. L'augmentation de  $\Delta t_a$  de bas en haut résulte probablement de la condition d'exploitation des tours de réfrigération puisque, à cause de l'écoulement le long de la paroi intérieure de l'air réchauffé par les éléments de refroidissement de la tour, la température du manteau dans la période avant l'ensoleillement est — en fonction de la distance des éléments de refroidissement — plus haute que celle de l'air ambiant; ainsi la partie de la chaleur extérieure qui en plus grande hauteur exerce son effet dilatant plus tôt, ne pouvait intervenir dans les coupes inférieures que plus tard et avec une valeur  $\Delta t_a$  moindre. L'absorption de chaleur moindre dans la coupe 6, — également à paroi de 17 cm d'épaisseur — se laisse ramener à des causes de calcul, parce que la courbe continue de compensation des méridiens a donné nécessairement une transition des valeurs  $\Delta t_a$  plus grandes de la coupe 5 à celles de la coupe 7 qui seront — comme il est à prévoir — plus faibles. On obtient donc dans la paroi mince les absorptions de chaleur moyennes suivantes, si la moyenne est formée des valeurs  $\Delta t_a$  des coupes 4 et 5, le moins influencées par des particularités locales de la construction du manteau et par d'autres facteurs:

mesure A:	$\Delta t_k = 2,1 \text{ } ^\circ\text{C}$
mesure B:	$\Delta t_k = 10,2 \text{ } ^\circ\text{C}$
mesure C:	$\Delta t_k = 11,6 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Les absorptions de chaleur, déduites des coupes horizontales d'augmentation des cercles, concordent bien avec les données de température, déterminées par des mesures directes d'absorption de chaleur sur une tour de réfrigération à paroi mince et aux dimensions presque identiques [7].

En analysant les absorptions de chaleur  $\Delta t_a$  et  $\Delta t_k$ , on ne peut pas négliger qu'en même temps le soleil chauffe aussi transitoirement une partie du manteau au côté opposé à celui qui est exposé au soleil. Pour déterminer la hauteur de la partie ensoleillée de la paroi du manteau à l'autre côté, nous avons calculé, à partir des coordonnées géographiques de l'emplacement de la tour et des moments de mesure, l'azimut et l'angle zénithal de la direction du soleil. À partir de ces données on peut déterminer, d'une part, avec la précision requise, le changement de direction en projection horizontale de la direction du soleil pour le temps entre deux mesures, et fixer, d'autre part, avec une approximation convenable, la partie ensoleillée du côté intérieur du manteau. Les données et les résultats numériques de ce calcul sont résumés dans le Tableau 5. On constate que la direction de la projection horizontale du soleil a subi un changement de  $90^\circ$  environ entre les mesures A et B, et de  $45^\circ$  entre les mesures B et C.

En connaissant les dimensions et la forme de la tour de réfrigération ainsi que l'altitude du soleil, on peut déterminer la hauteur limite des parties ensoleillée et ombragée du manteau par un procédé graphique.

Tableau 5

Mesure	Moment de mesure	Azimut	Angle zénithal	Angle vertical
		du soleil		
A.	10 <sup>55</sup> h.	139°	38,6°	51,4°
B.	13 <sup>50</sup> h.	229°	41,2°	47,8°
C.	17 <sup>15</sup> h.	274°	75,7°	14,3°

Coordonnées géographiques de l'emplacement de l'ouvrage:

Lever du soleil: 4 h 35

Culmination du soleil: 11 h 45

Coucher du soleil: 19 h 01

$\varphi = 47^\circ 47,0'$

$\lambda = 19^\circ 55,5'$

Pour revenir à l'interprétation des données du Tableau 2, les valeurs de  $d$ , déterminant l'inclinaison de l'axe vertical de l'ouvrage, augmentaient — comme il était à attendre — en fonction de la hauteur, mais la proportion de l'augmentation et les valeurs du déplacement maximum variaient dans les différents moments de mesure. En même temps, le sens du déplacement des points de la ligne axiale montrait en toutes occasions des mesures une rotation angulaire positive régulière en fonction de la hauteur identique au changement de direction de l'ensoleillement.

Dans le cas d'une tour à l'épaisseur variable, diminuant en fonction de la hauteur, la direction variable du déplacement des points de la courbe axiale de la verticale du point inférieur est due au fait que la partie inférieure du mur plus épaisse se réchauffe plus lentement que les parties supérieures (moins épaisses); par conséquent le déplacement horizontal des coupes supérieures en direction de l'action thermique commence plus tôt, tandis que les coupes de mur inférieures commencent plus tard à se déplacer en fonction des dimensions du mur. Entre-temps la direction de l'action thermique change et sur le côté qui devient couvert, la construction commence à se refroidir successivement. Naturellement la paroi à la masse moindre perd plus tôt la chaleur absorbée, tandis qu'elle se réchauffe plus vite du côté de la nouvelle action thermique. Par suite, pour un mur à l'épaisseur variable exposé à une action thermique unilatérale et à direction continuellement variable, la ligne axiale de la construction sera une courbe dans l'espace (une spirale) [1].

L'épaisseur de la paroi de la tour de réfrigération examinée est — excepté les deux coupes extrêmes — constante, de manière que la courbure dans l'espace de sa ligne axiale ne se laisse pas expliquer par les considérations ci-dessus. On doit chercher la cause de ce phénomène une fois de plus dans le courant d'air chaud intérieur, puisque si la température des coupes horizontales de la paroi est a priori variable en fonction de la distance des éléments réfrigérateurs, ce

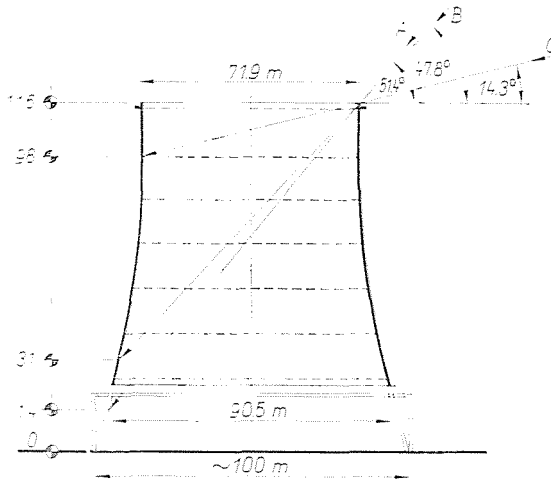


Fig. 3

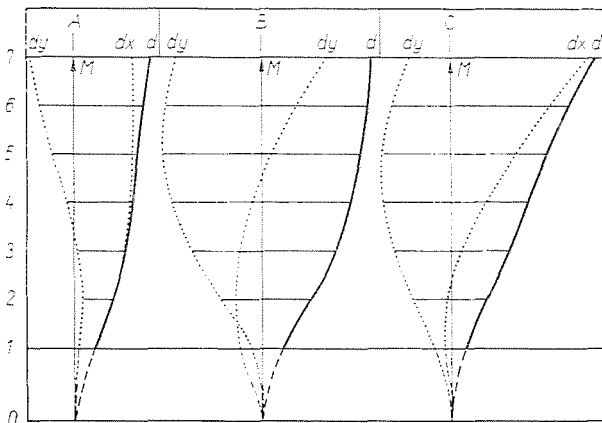


Fig. 4

fait entre en jeu au point de vue de la ligne axiale de la même manière que l'épaisseur variable de la paroi du manteau. Il semble donc que la courbure dans l'espace de l'axe confirme la cause déjà supposée de l'absorption de chaleur moyenne augmentant dans les coupes horizontales.

Sur la figure 4 on voit en traits pointillés les projections de la courbe axiale dans le plan vertical des axes du système des coordonnées et en traits plus forts la courbe étendue dans le plan de la ligne de l'axe spatiale sur la base des valeurs de  $dy$ ,  $dx$  et  $d$ , calculées pour tous les trois moments de mesure.

Vu la spatialité de la courbe axiale, il fallait évaluer l'allure de la courbe de projection qui — parmi les courbes dans le plan — est déterminante au point de vue de l'objectif de l'étude, c.-à-d. qui contient invariablement le plus grand

déplacement des points axiaux. Nous avons donc calculé les ordonnées de la courbe spatiale situées dans le plan vertical du déplacement de la coupe 7:

$$dr_i = d_i \cos(\delta_7 - \delta_i)$$

ensuite nous avons compensé à l'aide d'une méthode d'approximation la projection de l'axe obtenue (contenant quelques contradictions de moindre importance). Pour compenser ce calcul nous avons utilisé la méthode de compensation basée sur le principe de la dualité géométrique [8], donnant dans la fonction de la forme  $y = a \cdot x^n$  les valeurs du coefficient  $a$  et de l'exposant  $n$  à partir des variables  $x$  et  $y$  connues. Avec les notations précédentes, on écrira cette fonction en forme de  $d_i = a \cdot M_i^n$ . Suivant la méthode, en supposant des points connus (mesurés) au nombre de  $m \geq 4$ , on divise les points en deux groupes — égaux si  $m$  est un nombre pair —, et en résolvant le système d'équations à deux inconnues, formé des sommes par groupes des logarithmes des variables, on obtient les constantes recherchées de l'équation de la courbe:

$$n = \frac{[\log d_i]_1^{m/2} - [\log d_i]_{m/2+1}^m}{[\log M_i]_1^{m/2} - [\log M_i]_{m/2+1}^m} \quad (8)$$

et

$$a = \text{Num log} \frac{[\log d_i]_1^{m/2} - n \cdot [\log M_i]_1^{m/2}}{m/2} \quad (9)$$

Les projections  $dv_i$  des ordonnées  $d_i$  de l'axe spatial, situées dans le plan vertical de direction  $\delta_7$  de la coupe 7, leurs valeurs compensées  $d'v_i$  et les erreurs quadratiques moyennes  $\mu_K$ , calculées d'après les corrections, figurent au Tableau 6. Nous avons tracé les courbes de ligne axiale suivant les ordonnées compensées sur la figure 5.

Tableau 6

Coupe	A.		B.		C.	
	$dv_i$	$d'v_i$	$dv_i$	$d'v_i$	$dv_i$	$d'v_i$
1.	1,1	0,6	—0,5	—0,3	0,1	0,2
2.	2,4	2,0	1,8	1,7	0,8	1,0
3.	3,4	3,1	3,9	3,8	2,6	2,3
4.	4,4	4,1	5,6	5,4	4,6	4,1
5.	5,1	4,9	7,1	6,9	6,9	6,4
6.	5,6	5,7	8,3	8,2	9,4	9,3
7.	6,4	7,5	9,2	9,2	12,1	12,2
$\mu_K$		$\pm 0,36$		$\pm 0,18$		$\pm 0,41$

En comparant les données indiquées sur les figures 3 et 5, on constate que dans toutes les trois périodes de mesure les deux figures sont en accord. D'après la figure 3 au moment A l'action chauffante du soleil se fait valoir dans toute la hauteur du côté intérieur, opposé au côté ensoleillé, et c'est sous son action contraire (retirante) que la ligne axiale approximativement linéaire se développe. Au moment B le côté opposé de la coupe 1 est déjà dans l'ombre, l'action retirante n'est sensible que dès la coupe 2. Quoique — à ce moment — les ordonnées de la courbe soient nécessairement plus grandes, une action

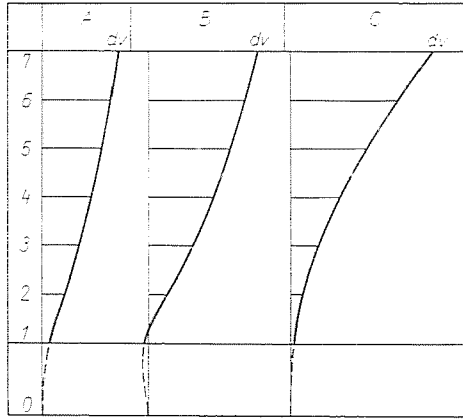


Fig. 5

retirante notable se manifeste par le fait que c'est le côté concave de la courbe qui se tourne vers l'axe  $M$ . La conséquence en est le changement de sens de la courbure (l'inflexion) entre les coupes 1 et 2. Au moment de mesure C, dans l'après-midi, l'altitude du soleil au-dessus de l'horizon est déjà trop basse pour réchauffer le côté opposé des coupes 6 et 7 avec la même intensité; c'est pourquoi la courbe de la mesure C est très proche de la forme théorique de la déviation de l'axe, due à l'ensoleillement purement unilatérale.

En se basant sur les valeurs de  $d^2v_i$  du Tableau 6, on peut conclure aussi aux différences de température  $\Delta t_i$  qui se manifestent entre les côtés opposés dans le plan de déviation de la coupe 7. On part pour le calcul de l'équation décrivant la forme théorique de la courbe de l'axe des tours à la coupe horizontale (au diamètre) constant [2]:

$$d_i = \frac{\alpha \cdot \Delta t_i}{2D_m} \cdot M_i^2 \quad (10)$$

d'où la température  $\Delta t_i$ :

$$\Delta t_i = \frac{2d_i D_m}{\alpha \cdot M_i^2} \quad (11)$$

Dans ces formules  $d_i$  est le déplacement du point axial de la coupe horizontale  $i$ ,  $D_m$  est le diamètre effectif de la coupe,  $\alpha$  le coefficient de dilatation thermique du manteau en béton armé ( $1,15 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ ) et  $M_i$  la hauteur de la coupe au-dessus du niveau de base de l'ouvrage. Comme il s'agit d'un diamètre variable en hauteur, on peut substituer au diamètre effectif  $D_m$  avec une approximation suffisante la moyenne des diamètres des coupes mesurées jusqu'à la hauteur  $M_i$ , en somme on fait usage de l'approximation [11]:

$$D_m = \frac{1}{M_i} \int_0^{M_i} D_i \cdot dM \approx \frac{[D_i]}{i}. \quad (12)$$

En vue de  $M_i^2$  figurant dans le dénominateur de (11), nous avons étudié cette fonction au point de vue de la propagation des erreurs (l'erreur quadratique moyenne de la valeur de fonction). En considérant  $d_i$  comme variable, on obtient l'erreur quadratique moyenne de la valeur de fonction (11) de l'équation

$$\Delta t_i = \pm \sqrt{\left(\frac{2D_m}{\alpha \cdot M_i^2}\right)^2} \mu_{d_i}^2 = \pm \frac{2D_m}{\alpha \cdot M_i^2} \mu_{d_i}. \quad (13)$$

Pour  $\mu_{d_i} \pm 0,5$  mm (ce qui correspond à l'erreur moyenne maximale, obtenue des corrections de la compensation des points de la courbe axiale), à la hauteur  $M_1 = 24$  m de la coupe 1 on a  $\mu_{\Delta t_i} = \pm 13,8$  °C, puis l'erreur moyenne se diminue successivement avec  $M_i$  pour être  $\mu_{\Delta t_i} = \pm 0,5$  °C à la hauteur  $M_7 = 114$  m de la coupe 7. Cela signifie qu'à des altitudes inférieures  $\Delta t_i$  est si grande qu'on ne peut obtenir d'après les déplacements des points axiaux inférieures aucune valeur satisfaisante même approximée pour la différence de température des côtés opposés. Comme à la hauteur de  $M_5 = 84$  m,  $\mu_{\Delta t_i} = \pm 1,0$  °C, on ne peut obtenir une valeur de  $\Delta t_i$  avec une précision suffisante que des coupes horizontales 5, 6 et 7. On trouve  $\Delta t_i$  calculé pour les trois coupes supérieures avec l'indication du diamètre déterminant  $D_m$  et des moyennes pour les périodes de la journée au Tableau 7.

Tableau 7

Coupe N <sup>o</sup>	$D_m$ (m)	$\Delta t_i$ °C		
		A.	B.	C.
5.	80,73	9,7	13,7	12,7
6.	79,24	8,0	11,5	13,2
7.	78,56	6,8	9,8	12,6
Moyenne:		8,2	11,7	12,8



A propos de la ligne axiale nous avons examiné aussi la déviation angulaire du plan vertical du déplacement maximal par rapport à la direction du soleil au moment de la mesure. Comme la direction du soleil — au moment A — formait un angle de  $61^\circ$  avec l'axe  $+x$  du système des coordonnées de mesure et en même temps son azimut était de  $139^\circ$  (Tableau 5), nous pouvions calculer également la direction du soleil  $\delta_N$  aux moments B et C. En comparant ces derniers à l'angle  $\delta_7$  du plan vertical du déplacement maximal, on a obtenu les différences d'angle  $\Delta\delta$  recherchées. Les données de base et les résultats du calcul figurent dans le Tableau 8. Les résultats montrent que la direction du

Tableau 8

Mesure	$\alpha^\circ$	$\delta_N^0 + 180^\circ$	$\delta_7^0$	$\Delta\delta$
A.	139	241	215	26
B.	229	331	305	26
C.	274	376	343	32
Moyenne:				28

déplacement maximum est en retard de  $28^\circ$  — en moyenne — par rapport à la direction momentanée du soleil, de manière que le retard de la direction du déplacement maximum correspond en fonction de la période de la journée à un retard dans le temps de 1,5 à 2,5 h.

Le pas suivant de l'étude des déformations, dues à l'action thermique de l'ensoleillement, était de tirer les conclusions des corrections des déformations des cercles de compensation figurant au Tableau 3, c.-à-d. des composantes  $vr_i$  dites de déformation de cercle. Bien que la compensation des courbes de déformation horizontales à l'aide de cercles ait donné avec une approximation suffisante les changements de dimension survenus dans les coupes, il était à attendre que le réchauffement unilatéral, affectant périodiquement le côté opposé aussi, donnera à la courbe de déformation horizontale une forme proche à une ellipse un peu aplatie, dont le grand axe est à peu près perpendiculaire sur la direction de l'action thermique. C'est pourquoi nous avons compensé les courbes de déformation horizontales à l'aide d'ellipses aussi. En adoptant pour la compensation numérique les centres déjà déterminés des coupes horizontales, nous avons calculé les axes  $a$  et  $b$ , déterminant les dimensions de l'ellipse, et la direction  $\delta_a$  du grand axe  $a$  à partir des rayons partant du centre du cercle de compensation

$$r_i = R_i + RO + vr_i \quad (14)$$

et à partir des directions  $\delta_i$  connues. Dans cette formule  $R_i$  signifie le rayon prévu,  $RO$  l'augmentation moyenne du rayon et  $vr_i$  les composantes de défor-

mation de cercle au Tableau 3. Pour la compensation on s'est servi d'une méthode approximative qui se prête bien à la programmation. L'essence en est la suivante [3]: En représentant la moitié du grand axe par  $a$ , la moitié du petit axe par  $b$ , on peut écrire d'après l'équation de l'ellipse pour chaque point de la circonférence:

$$b^2 = \frac{a^2 \cdot x_i^2}{a^2 - (y_i - a)^2} \quad (15)$$

(dans le cas présent 8 équations par coupe).

Transformons (15) de la manière suivante:

$$a^2 \cdot b^2 - b^2(y_i - a)^2 = a^2 \cdot x_i^2.$$

Formons la somme des  $n$  équations:

$$n \cdot a^2 \cdot b^2 - b^2[(y_i - a)^2]_1^n = a^2 \cdot [x_i^2]_1^n.$$

En exprimant  $b$ , on aura

$$b = \sqrt{\frac{a^2 [x_i^2]_1^n}{n \cdot a^2 - [(y_i - a)^2]_1^n}}. \quad (16)$$

On obtient de (16) la valeur compensée de  $b$ , si  $a$  est connu. Étant donné que nous ne possédons qu'une valeur approximée de  $a$  (le rayon  $r_k$  du cercle de compensation), nous calculons le demi-axe  $b$  en supposant que  $a'$  est quelque plus grand que le rayon  $r_k$  c.-à-d.  $a' = (r_k + da)$ . Mais si l'on rédige le programme de machine de manière que l'ordinateur augmente  $a'$  du multiple entier de l'accroissement  $da$  tant que la somme carrée de la correction de l'ellipse de compensation se diminue, alors la condition  $[vv] = \min$  sera aussi remplie en ce qui concerne les résultats possibles de (16). Mais comme dans le cas présent les coordonnées polaires planes  $r_i$  et  $\delta_i$  sont les données initiales de la compensation, il fallait substituer dans (16) les valeurs

$$x_i = r_i \cdot \cos \delta_i$$

et

$$y_i - a = r_i \cdot \sin \delta_i.$$

Cela signifie en même temps qu'on considère l'axe  $a$  de l'ellipse comme coïncidant à l'axe de coordonnées  $+x$ . Mais en altérant la direction  $\delta_i$  des points d'un petit angle  $\Delta\delta$ , on identifie la direction du grand axe  $a$  à celle de l'axe  $+x$  d'un système de coordonnées, détourné d'un angle  $\Delta\delta$  par rapport à l'angle précédent. En variant les directions  $\delta_i$  successivement d'un multiple

entier de  $\Delta\delta$  on pourra continuer cette approximation tant que la somme carrée des corrections de la compensation continuera à se diminuer. Comme la valeur approchée  $\delta'_i$  était déterminable d'avance des corrections de la compensation de cercle, pour le programme de machine on a écrit enfin — en tenant compte des valeurs de  $\delta'_a$ , par coupes — (16) en forme suivante:

$$b = \sqrt{\frac{(a' + k \cdot da)^2 [r_i^2 \cos^2(\delta_i + \delta'_a) \pm c \cdot \Delta\delta]_1^n}{n \cdot (a' + k \cdot da)^2 - [r_i^2 \sin^2(\delta_i + \delta'_a) \pm c \cdot \Delta\delta]_1^n}} \quad (17)$$

où d'abord à la place de  $c$ , ensuite pour les valeurs  $\delta'_a \pm c \cdot \Delta\delta$  remplissant la condition  $[vv] = \min$ , à la place de  $k$  les valeurs successives des nombres entiers positifs figurent, tant que la condition minimum sera remplie aussi en cas de  $a' + k \cdot da$ .

Relativement aux coupes horizontales, les résultats de la compensation par une ellipse ne sont pas dans un si bon accord que ceux des résultats précédents. Cette incertitude se manifestait surtout dans la direction  $\delta_a$  du grand axe et dans une certaine mesure dans les différences des axes  $a-b$  des coupes superposées aussi. En étudiant la cause de l'incertitude de  $\delta_a$ , on constatait que par suite des faibles écarts des demi-axes d'ellipse du rayon du cercle de compensation — dont même la plus grande était inférieure à  $3 \mu_{r_i}$  — et eu égard d'un minimum des points périphériques de coupe on ne peut déterminer  $\delta_a$  — même en moyenne pour la période de la journée — avec la précision nécessaire de  $\pm 5^\circ$ . En tenant compte du fait qu'en certains cas  $\mu_{\delta_a}$  peut dépasser  $\pm 20^\circ$ , on ne peut tirer — à titre indicatif — pour  $\delta_a$  que la conclusion que d'après nos mesures les grands axes des ellipses forment avec la direction du soleil un angle de  $100^\circ$  en moyenne, e.-à-d. qu'en moyenne le grand axe est en retard d'environ  $10^\circ$  par rapport à la normale de l'ensoleillement. En même temps, les demi-axes  $a$  et  $b$  présentent en moyenne les écarts suivants par rapport au rayon  $r_c$  du cercle de compensation:

mesure A:  $\Delta a = -\Delta b = +2.7$  mm  
 mesure B:  $\Delta a = -\Delta b = +3.2$  mm  
 mesure C:  $\Delta a = -\Delta b = +2.0$  mm.

Les résultats moyens montrent très bien l'effet que le réchauffement transitoire se présentant aussi sur le côté opposé au côté ensoleillé exerce sur la formation des axes de l'ellipse de compensation.

Sur la figure 6 on voit — en qualité d'exemple — les coupes tracées à partir des résultats numériques, obtenus au moment de mesure B dans les coupes 1, 3, 5 et 7. Nous y avons tracé à trait interrompu le cercle de base (le contour de la coupe horizontale avant l'action thermique du soleil), à trait plein le cercle de compensation, et à trait fort l'ellipse de compensation.

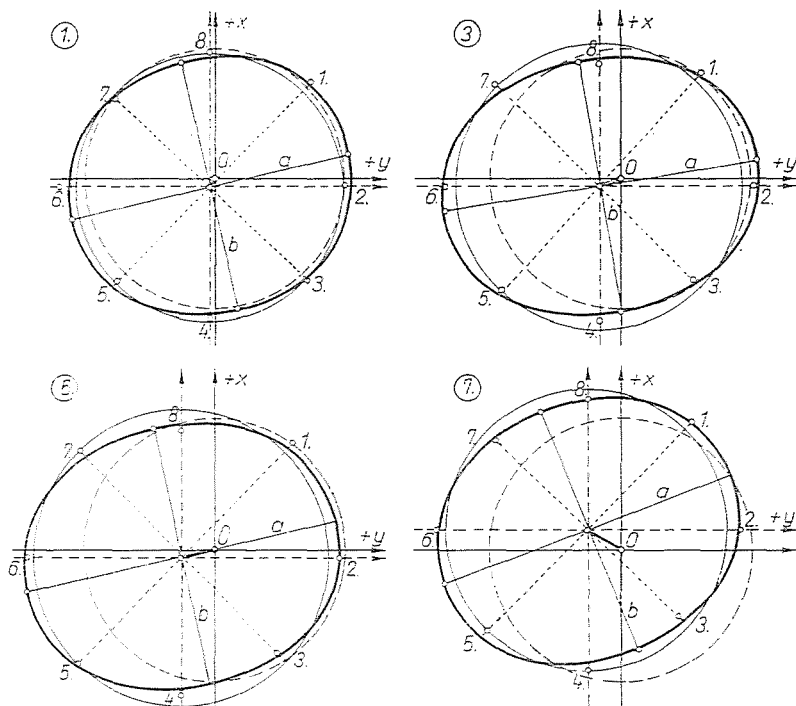


Fig. 6

### Résumé

Dans le cadre du programme de recherche de Hongrie au sujet des systèmes de réfrigération des grandes centrales électriques, des essais empiriques s'imposaient pour déterminer l'évolution journalière des déformations et des variations de dimension transitoires des cheminées en béton armé, à paroi mince, des grandes tours de réfrigération de ces centrales, dues à l'action thermique de l'ensoleillement continu, à la direction variable. On a fait des mesures sur une tour de réfrigération haute de 116 m, au diamètre de presque 100 m, ayant un manteau hyperbolique. Au cours de l'étude empirique on a interprété les déformations ayant pour la plupart un caractère régulier le long des lignes constructives, déterminant la surface, à partir des déplacements par points, mesurés dans la matinée, à midi et dans l'après-midi, par rapport à la mesure faite dès l'aube, avant le lever du soleil.

### Littérature

1. HOLÉCZY, GY.: Prise en considération des actions extérieures dans le contrôle des bâtiments hauts au cours des travaux de construction.\* Geodézia és Kartográfia, No. 2, 1966, Budapest.
2. HOLÉCZY, GY.: Contrôle des ouvrages élancés au cours de la construction à l'aide de méthodes géodésiques.\* ÉKME Tudományos Közlemények, Budapest, Tome XII (1965), No. 2, p. 65.
3. HOLÉCZY, GY.: Étude des déformations de constructions, dues à des actions extérieures.\* Geodézia és Kartográfia, No. 3, 1966, Budapest.

\* En langue hongroise

4. HOLÉCZY, GY.: Détermination des déformations de coffrages glissants à grand diamètre.\*  
Geodézia és Kartográfia, No. 2, 1968, Budapest.
5. SÁRDY, A.: Le dispositif de mesure le plus favorable pour l'emploi du cercle de compensation dans la géodésie technique\*. Geodézia és Kartográfia, No. 4, 1969, Budapest.
6. SÁRDY, A.: L'emploi du cercle de compensation dans la géodésie technique.\* Geodézia és Kartográfia No. 3, 1969, Budapest.
7. LARRABEE, R. D., BILLINGTON, D. P.: Thermal Loading of Thin-Shell Concrete Cooling Towers. Proceedings ASCE, V. 100, St. 12, Dec. 1974.
8. L'AUNÉ, O.: Compensation sur la base de la dualité géométrique.\* ÉKME Tudományos Közlemények Budapest, Tome XI (1964), No. 5, p. 151.
9. L'AUNÉ, O.: Compensations sans l'emploi des méthodes des moindres carrés.\* ÉKME Tudományos Közlemények, Budapest Tome IX (1962), No. 1, p. 19.
10. HAZAY, I.: Calculs de compensation.\* Tankönyvkiadó, 1966, Budapest.
11. BERMANT, A. F.: Analyse mathématique.\* Tankönyvkiadó, 1954, Budapest.
12. L'AUNÉ, O.: Calculs de compensation (la notion et la définition de la fonction approchée.\*)  
Recueil polycopié des cours. Felsőoktatási Jegyzetellátó Vállalat, 1955, Budapest.

Dr. Gyula HOLÉCZY }  
Péter MÁJAY } H-1521 Budapest

\* En langue hongroise