

Fig. 656. Pylônes de la Jonction Nord-Midi.

(Photo Malevez.)

Pylônes en croix pour supports de caténaires

par

M. De Saegher,

Ingénieur A. I. Br.,
Ingénieur Principal à l'O. N. J.

J. Verdeyen,

et

Ingénieur-Conseil A. I. Br.,
Professeur à l'Université Libre de Bruxelles

Introduction

L'électrification des chemins de fer, qui sera consécutive à la construction du tunnel de la Jonction Nord-Midi, nécessite la construction de pylônes pour supports de caténaires, dont les hauteurs et les sollicitations sont plus ou moins importantes suivant les portées à franchir par les portiques à câbles ainsi réalisés.

Pour le gril intérieur de la gare du Nord, ces portées atteignent 86 mètres et la hauteur des pylônes au-dessus du niveau supérieur des rails varie de 13^m30 à 18 mètres.

En général, les pylônes métalliques de ce genre sont réalisés soit au moyen de poteaux tubulaires, soit de profilés bruts de laminage ou renforcés, soit enfin de treillis rivés ou soudés constitués par quatre montants en cornière formant pyramide quadrangulaire, liés à leurs extrémités par des entretoises en cornières et réunis sur leur longueur par un treillis. Pour le gril intérieur de la gare du Nord, on a été amené, pour des raisons d'aspect architectural, à réaliser (fig. 656) 21 pylônes en croix au moyen de poutrelles Grey Hx 80 (DIN 80) découpées et ensuite soudées et renforcées par des plats rivés, de manière à réaliser des profils d'égale résistance. Etant donné l'importance des sollicitations et la nécessité de prévoir aussi exactement que possible la contre-flèche de pose de ces pylônes, des conditions de réception très sévères ont été imposées aux constructeurs, la S. A. de Construction et les Ateliers de Willebroeck. Il était prévu entre autres que deux pylônes seraient essayés en atelier à une fois et demie leur sollicitation normale et que des mesures de tension et de déformation seraient faites.

Le but de cet article est de décrire le mode de construction des pylônes en croix et de relater les essais auxquels on a procédé.

Description et calcul des pylônes en croix

1. Description

Parmi les 21 pylônes construits, on se bornera à décrire les deux pylônes identiques ayant fait l'objet des essais. Les autres pylônes sont du reste exactement du même type : seule leur longueur est différente. Les deux pylônes en question (fig. 657) ont une longueur totale de 23^m40. Ils sont ancrés dans des massifs de fondation en béton armé formant caisse ou logement ayant 4^m60 de profondeur. La hauteur des pylônes au-dessus du niveau des rails est de 18 mètres.

Les pylônes ont été réalisés au moyen de deux poutrelles Grey Hx 80 de la manière suivante :

L'âme de l'une des poutrelles est découpée suivant une ligne oblique par rapport à l'axe de symétrie du profil. Cette ligne est parallèle à la ligne oblique passant par le centre de l'âme de la poutrelle, mais décalée de 10 cm par rapport à cette dernière (fig. 658). Les deux morceaux de poutrelle ainsi obtenus sont ensuite retournés bout pour bout l'un par rapport à l'autre, et assemblés à nouveau par soudure. L'âme de l'autre poutrelle est découpée suivant la ligne oblique passant par le centre de l'âme du profil (fig. 659). Les deux morceaux de poutrelle, retournés, sont ensuite assemblés à la première poutrelle par soudure.

On remarque que les deux poutrelles auraient pu être découpées toutes deux comme la seconde, mais cela aurait amené une concentration importante de soudure au droit des assemblages.

On obtient ainsi un pylône en croix ayant à la base 986 mm et au sommet 600 mm de largeur. Les ailes des poutrelles sont ensuite renforcées à la partie inférieure du pylône par des semelles de 320 × 12, de longueur variable, assemblées par des rivets de 22 mm de diamètre. Des plats de

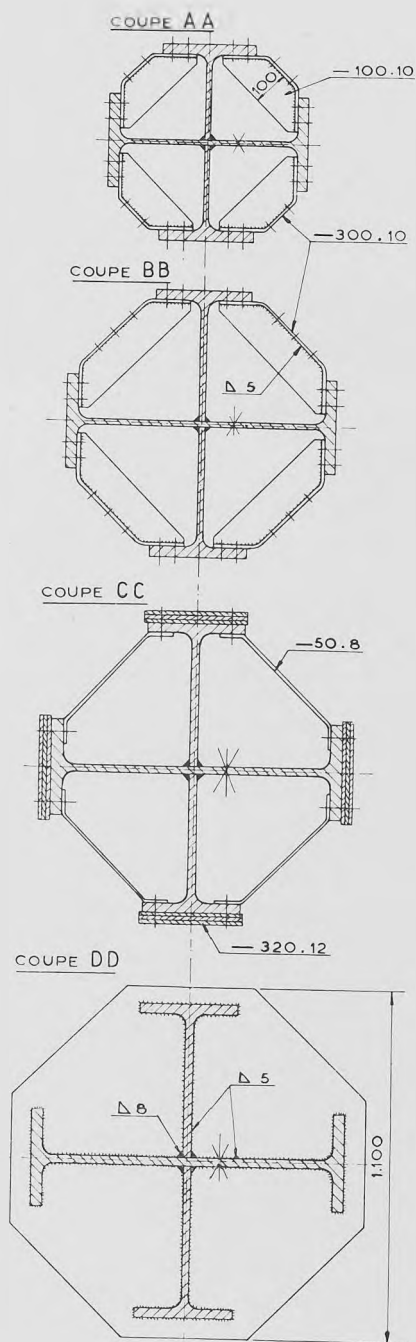


Fig. 657. Elévation et coupes d'un pylône en croix pour support de caténaire.

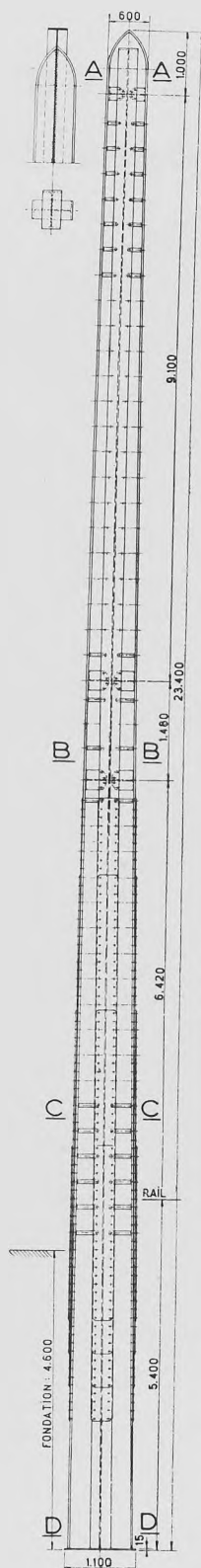


Fig. 658. Première poutrelle à larges ailes H_v 80 découpée suivant la ligne oblique visible sur le croquis « D ». Après ce découpage, les deux morceaux sont de nouveau assemblés par soudure après retournement bout pour bout pour constituer une poutrelle « A » de hauteur variable.



Fig. 659. Deuxième poutrelle constituant le pylône en croix pour support de caténaire. Après découpage de cette poutrelle H_v 80 suivant la ligne symétrique oblique visible sur le croquis « D », les deux morceaux sont soudés, après retournement bout pour bout à la première poutrelle (voir fig. 660).

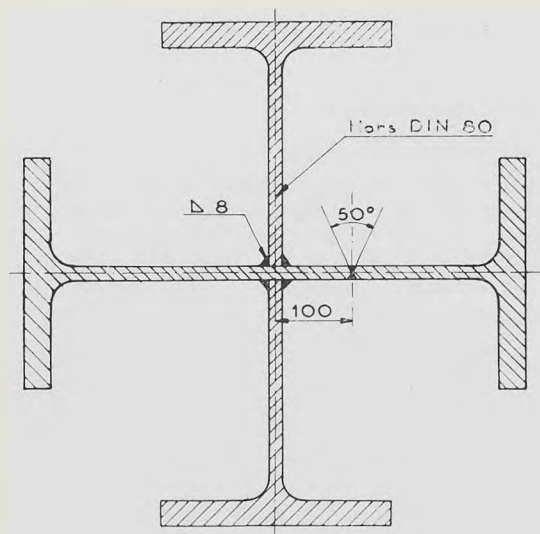


Fig. 660. Coupe d'un pylône en croix montrant sa constitution par soudure à partir de profils obtenus hors poutrelles à larges ailes, conformément aux croquis des figures 658 et 659.

50 × 8, formant échelons, sont rivés sur la hauteur du pylône tous les 390 mm. Des renforcements de ces plats sont prévus au droit des points d'attache des câbles. A la partie supérieure, les âmes des poutrelles sont découpées et les ailes pliées de manière à réaliser une pointe, assemblée par soudure. A la base du pylône, une plaque

constituée par une tôle de 15 mm d'épaisseur, assemblée par soudure, répartit les efforts dans le massif de fondation et assure l'ancrage, lorsque le logement en béton armé dans lequel le pylône est déposé a été rempli de béton. On constate que le pylône ainsi réalisé constitue un solide d'égale résistance pour sollicitation par flexion.

2. Calcul

Les sollicitations des pylônes ont été données par le Syndicat d'études pour l'électrification des chemins de fer. On trouve ces sollicitations résumées dans le tableau I ci-dessous.

Le calcul du pylône à la flexion ne présente

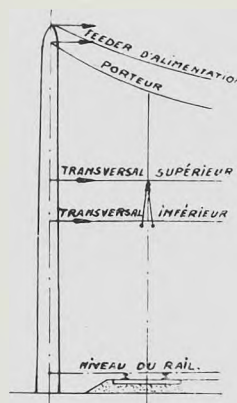


TABLEAU I.

Sollicitations des pylones
 A_1 et B_1

Nature des efforts	Sollicitation normale Vent = 120 kg/m ² Température + 15° c						Sollicitation normale Vent = 30 kg/m ² Température - 15° c						Sollicitation accidentelle Efforts dus au givre à - 5° c					
	Efforts verticaux		Efforts horizontaux		Moments de renvers. au niveau du rail		Efforts verticaux		Efforts horizontaux		Moments de renvers. au niveau du rail		Efforts verticaux		Efforts horizontaux		Moments de renvers. au niveau du rail	
	Compression	Dans le sens du portique	Dans le sens Δ au portique	Hauteur au dessus du rail	Dans le sens du portique	Dans le sens Δ au portique	Compression	Dans le sens du portique	Dans le sens Δ au portique	Hauteur au dessus du rail	Dans le sens du portique	Dans le sens Δ au portique	Compression	Dans le sens du portique	Dans le sens Δ au portique	Hauteur au dessus du rail	Dans le sens du portique	Dans le sens Δ au portique
Porteur	2.358	5.773	—	17,00	98.141	—	2.358	5.819	—	17,00	98.923	—	2.898	7.095	—	17,00	120.632	—
Transversal supérieur	—	2.449	—	7,90	19.347	—	—	2.749	—	7,90	21.747	—	—	2.254	—	7,90	17.807	—
Transversal inférieur.	—	3.887	—	6,34	24.644	—	—	2.956	—	6,34	18.741	—	—	2.565	—	6,34	16.262	—
Feeder d'alimentation	145	600	—	17,40	10.140	—	145	636	—	17,40	11.066	—	200	718	—	17,40	13.015	—
Ancrage	Porteur .	920	3.590	8,00	7.360	28.720	1.150	4.190	8,00	9.200	33.520	—	1.150	4.370	8,00	9.200	34.960	—
		1.270	1.600	6,50	8.255	29.900	1.960	7.400	6,50	12.740	48.100	—	1.730	6.490	6,50	11.215	42.135	—
		2.503	11.899	8.190	168.187	58.920	2.503	15.270	11.590	172.387	81.620	3.098	15.543	10.860	188.161	77.145	—	—

aucune difficulté. On admet que le pylône trouve dans le massif de fondation deux points d'appui A et B, écartés de 3^m60, ce qui correspond, du reste, au point de vue théorique, à la conception de ce massif. On trace pour chaque cas de sollicitation envisagé le diagramme des moments fléchissants et on en déduit celui des moments résultants. Le calcul des moments d'inertie I et des modules de flexion $\frac{I}{v}$ de chaque section permet de tracer le diagramme des moments résistants $M_r = \tau \cdot \frac{I}{v}$ avec $\tau = 12 \text{ kg/mm}^2$. La figure 661 donne le résultat de ces calculs. Leur examen montre que le diagramme des moments fléchissants suit très exactement le diagramme

des moments résistants pour le cas de sollicitation accidentelle.

Essai des pylônes

1. Principes de l'essai

Les essais ont été faits de manière à réaliser les efforts correspondants à la sollicitation normale, vent de 120 kg/m², température + 15°. En effet, la contreflèche de pose des pylônes a été établie en se basant sur les considérations suivantes :

A première vue, la contreflèche de pose à admettre devrait correspondre à la flèche calculée pour la sollicitation des pylônes sans vent. Cependant, il est à craindre que si l'on se borne à ne

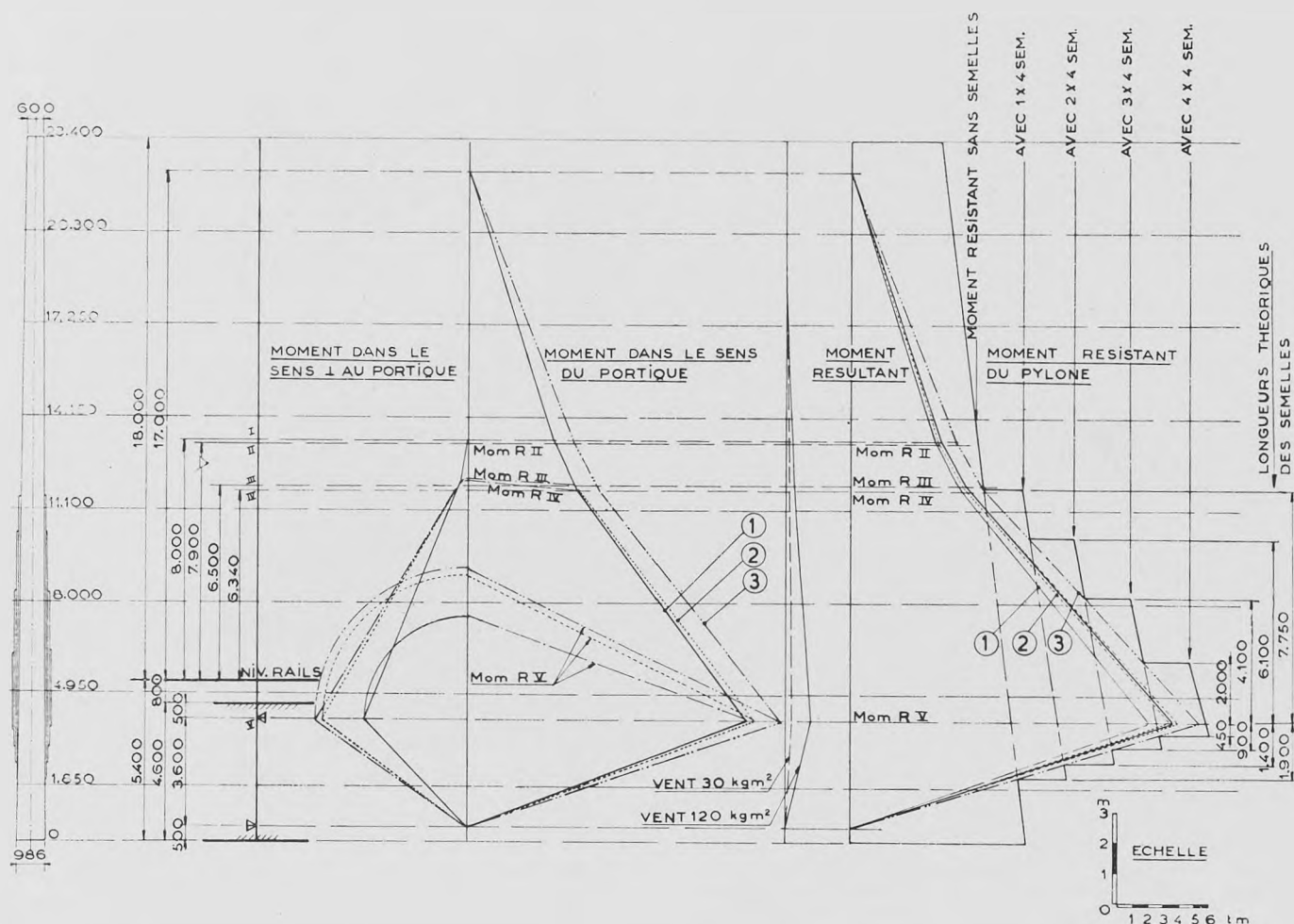


Fig. 661. Moments correspondant à diverses sollicitations et moments résistants du pylône.



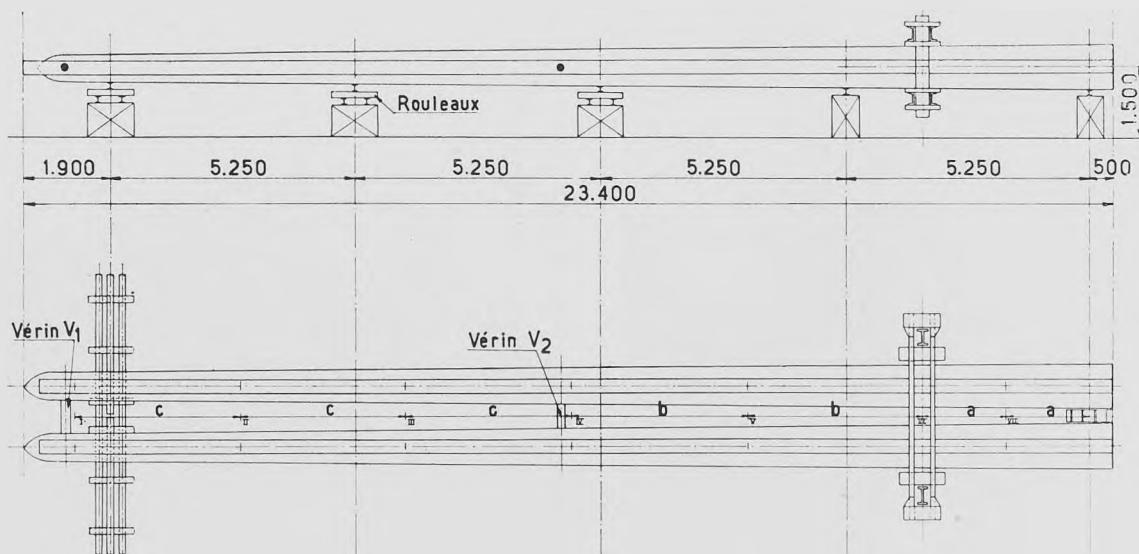


Fig. 662. Montage général de l'installation d'essai des pylônes pour support de caténaires.

donner que cette contreflèche, le pylône paraisse mal équilibré et semble pencher vers les voies (côté sollicitation) par suite d'un effet d'optique malencontreux, résultant de la courbure de la fibre moyenne. Pour corriger cet aspect défavorable, on majore de 1 à 2 cm la flèche correspondant à la sollicitation sans vent. La contreflèche admise est donc prise égale à la flèche calculée pour la sollicitation sans vent augmentée de 1 à 2 cm suivant l'importance de la sollicitation. Or, les calculs montrent qu'il y a pratiquement une certaine coïncidence entre la valeur de la contreflèche admise et la valeur de la flèche des pylônes calculée pour la sollicitation avec vent de 120 kg/m^2 . C'est ainsi qu'en pratique, la contreflèche de pose des pylônes pour lignes de caténaires est généralement prise égale à cette dernière flèche.

Pour procéder à l'essai proprement dit, les deux pylônes sont couchés horizontalement côte à côte. Leurs bases sont engagées dans un cadre ayant pour but de les fixer et les charges appliquées sont obtenues au moyen de deux vérins placés aux endroits où les charges réelles agiront. La figure 662 donne le montage général de l'installation d'essai. On constate qu'il est prévu de manière que toutes les parties des pylônes soient facilement accessibles afin d'être contrôlées. Les pylônes sont soutenus en cinq points par des appuis à rouleaux tels que les mouvements dans le plan horizontal de chaque pylône puissent se faire librement. La face inférieure des pylônes

ainsi que les rouleaux se trouvent dans un plan horizontal. Les rouleaux sont prévus pour permettre un mouvement relatif des têtes de pylônes, provoqué par les vérins, pouvant atteindre environ 50 cm. Les essais devaient se faire aux ateliers mêmes de la *S. A. de Construction et des Ateliers de Willebroeck* et il y a lieu de remarquer qu'il s'agit ici d'un essai industriel dont on ne doit pas attendre des résultats aussi précis qu'un essai de laboratoire.

2. Montage et mise en charge

S'inspirant des principes généraux que l'on vient d'énoncer, les pylônes, après montage en vue de l'essai, ont été soumis à des charges donnant une sollicitation aussi rapprochée que possible de celle qu'ils subiront dans la réalité. Pendant les essais, les deux pylônes doivent donc être sollicités par deux efforts horizontaux choisis de telle façon qu'ils provoquent des moments de flexion sur toute la hauteur des pylônes du même ordre de grandeur que ceux donnés par les efforts réels orientés dans les deux directions orthogonales des portiques et des ancrages. On a indiqué que les pylônes doivent être, en réalité, ancrés dans des massifs en béton armé présentant des logements ayant au minimum $4^{\text{m}}60$ de profondeur, logements qui seront ensuite remplis de béton après réglage définitif des poteaux.

Un tel encastrement est difficilement exécutable lors d'un essai.

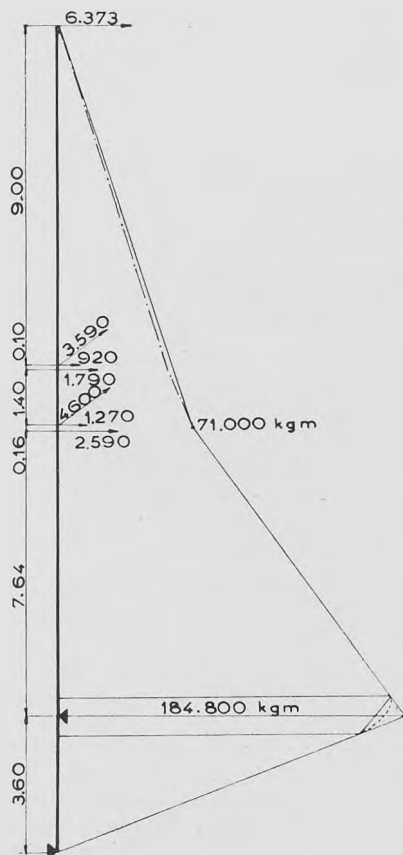


Fig. 663. Sollicitations du pylône à la température de + 15°, sans vent.

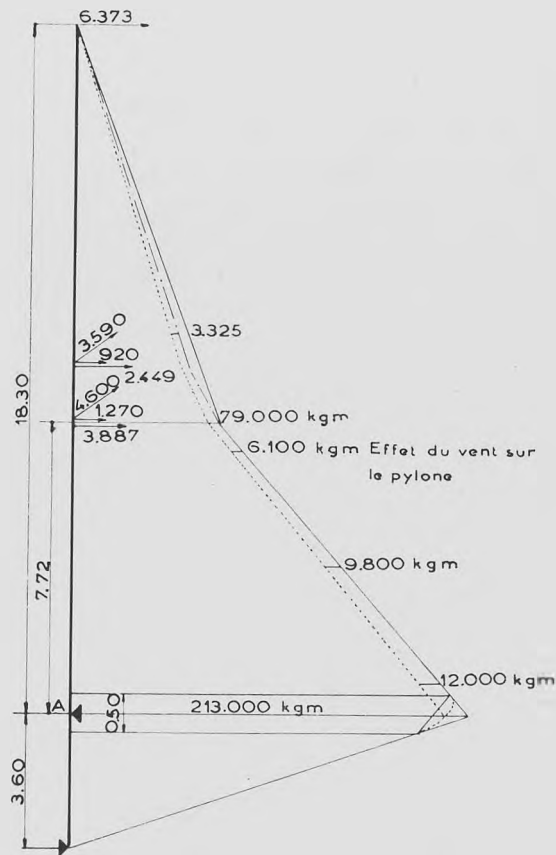


Fig. 664. Sollicitations du pylône à la température de + 15°, avec effet du vent soufflant à 120 kg/m².

On a remplacé l'encastrement parfait par deux appuis A et B distants de 3^m60. On trace (fig. 663 et 664) le diagramme des moments fléchissants résultants pour la sollicitation admise.

On constate que l'on peut, avec une approximation suffisante, remplacer cette sollicitation par celle provoquée par deux efforts, l'un situé au niveau du câble porteur du portique soit à 18^m30 de l'appui A, l'autre situé à 7^m72 de ce même appui. A 7^m72 de l'appui A, le moment donné par la figure 664 est égal à 79.000 kgm. L'effort à appliquer à 18^m30 de A est donc :

$$P_1 = \frac{79.000}{10,58} = 7.500 \text{ kg.}$$

A l'appui A, le moment théorique est

$$M_A = 213.000 \text{ kgm.}$$

$$\text{D'où } M_{max} = 7.500 \times 18,30 + P_2 \times 7,72 = 213.000.$$

$$\text{et } P_2 = 9.800 \text{ kg.}$$

Les réactions en A et B sont respectivement :

$$R_A = 7.500 + 9.800 + \frac{213.000}{3,60} = 17.300 + 59.000 = 76.300 \text{ kg (traction).}$$

$$R_B = - \frac{213.000}{3,60} = -59.000 \text{ kg (compression).}$$

Les forces P_1 et P_2 sont appliquées aux points I et IV par l'intermédiaire de deux vérins de 15,5 cm de diamètre

Section des vérins :

$$\Omega = 3,14 \times \frac{15,5^2}{4} = 188,6 \text{ cm}^2$$



Ces forces correspondent donc à des efforts aux vérins de :

$$P_1 = \frac{7.500}{188,6} = 39,24 \text{ kg/cm}^2 \text{ soit environ } 40 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_2 = \frac{9.800}{188,6} = 51,96 \text{ kg/cm}^2 \text{ soit environ } 52 \text{ kg/cm}^2.$$

Le vérin V_2 placé en IV est d'abord mis en charge jusqu'à atteindre deux fois la charge de service, de façon à provoquer la plus grande déformation possible au point I avant la mise en place du vérin V_1 en ce point. On évite ainsi un trop grand nombre de décalages et de calages du vérin V_1 . Cette façon de procéder ne provoque, du reste, pas de sollicitation supérieure à celle qui sera réalisée par la suite.

La mise en charge des vérins se fait lentement en faisant croître les charges de 2.000 kg toutes les cinq minutes.

On cale ensuite le vérin V_1 au point I et on le met en charge à 1.000 kg. On ramène le vérin V_2 à la charge de service, puis on augmente la tension du vérin V_1 jusqu'à atteindre la limite de course de celui-ci.

On cale alors les deux pylônes en intercalant entre eux, à proximité du vérin V_1 , un élément de poutrelle. On annule l'effort du vérin V_1 , puis on place une pièce de calage dans l'espace laissé libre entre le vérin et le pylône. On remet le vérin V_1 sous tension et on augmente celle-ci, tout en contrôlant et en augmentant celle de V_2 qui a tendance à baisser quand la tension en V_1 augmente.

On atteint finalement les charges de service aux deux points I et IV.

On porte les charges de la même façon que ci-dessus à 1 1/2 fois les charges de service.

Les pylônes sont alors laissés dans cet état sous tension pendant environ 1 heure et demie. Les vérins sont ensuite déchargés progressivement jusqu'à annuler les sollicitations.

Les flèches ont été relevées en sept points I, II, III, ... VII des pylônes par l'intermédiaire de plaques portant des traits de repère et fixées par soudure aux ailes des pylônes.

L'essai de flexion horizontale des deux pylônes A_1 et B_1 , exécuté le 21 mars 1947, a donné les résultats renseignés au tableau II ci-après.

La photographie de la figure 665 a été prise pendant que les pylônes étaient maintenus durant 1 h 1/2 sous des charges correspondant à 150 % des charges de service.

Une lecture des flèches après 1 h 1/2 montre que celles-ci n'ont pas subi de modifications.

Par contre une lecture des flèches correspondant à la réduction des charges jusqu'à celles

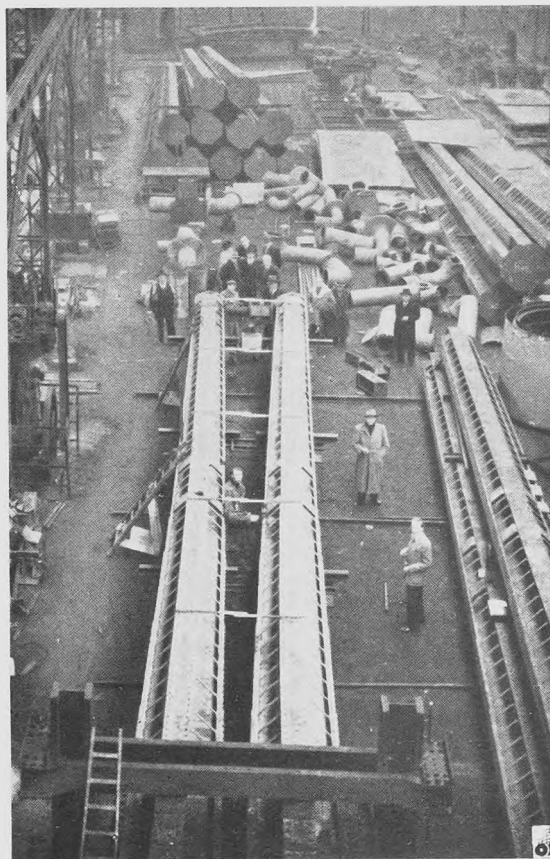


Fig. 665. Vue pendant les essais des pylônes. On voit nettement la courbure des deux pylônes encastés à leur base et écartés par vérins.

correspondant aux charges de service, donne des flèches plus élevées que celles mesurées dans les mêmes conditions, lors de la première mise en charge.

Cette différence provient probablement d'effets de frottement dans les rouleaux.

3. Détermination théorique des flèches par calcul et comparaison avec les résultats des mesures

Le calcul des flèches théoriques peut se faire facilement par tracé graphique. On trace en premier lieu le diagramme des moments d'inertie I du système en croix, puis le diagramme des mo-

Vérin au point I		Vérin au point IV		Repères						
Lecture au manomètre	Efforts en I	Lecture au manomètre	Efforts en IV	I	II	III	IV	V	VI	VII
		10 kg/cm ²	1.887 kg	7 cm						
		20 »	3.774 »	18 »						
		30 »	5.661 »	30 »						
		40 »	7.548 »	42,5 »						
		52 } Etat de service	9.812 »	58 »						
		61 »	11.510 »	73,5 »	50 $\frac{1}{4}$	37,5	24 $\frac{1}{4}$	10	1 $\frac{3}{4}$	0
		71 »	13.397 »	84,5 »						
		81 »	15.281 »	94,75 »						
		91 »	17.171 »	104,75 »						
		102 } 2 fois état de service	19.246 »	118,5 »						
Charge de service										
40 kg/cm ²	7.548 kg	52 kg/cm ²	9.812 kg	349	248	154	78,5	29,5	3,75	— 1
1 $\frac{1}{2}$ × charge de serv.										
60 kg/cm ²	11.332 kg	78 kg/cm ²	14.718 kg	450	320,5	199,5	102,5	39	4,75	— 1
Charge de service										
40 kg/cm ²	7.548 kg	52 kg/cm ²	9.812 kg	417	296	201	95	35	4,5	1

TABLEAU II. — Résultats de la mesure des flèches totales des deux pylônes A₁ et B₁

ments sous l'effet d'une charge de 10 tonnes appliquée à 18^m30 au-dessus de l'appui A.

Le diagramme de la figure 666 donne les déformations du pylône supposé encastré en A. Dans ce cas la ligne de repère est la verticale passant par A. Le même diagramme lu par rapport à la ligne de repère inclinée passant par A donne les déformations dans le cas de l'hypothèse de deux points d'appui A et B.

On remarque que l'échelle des longueurs a été doublée (longueur de la travée AB) pour augmenter la précision du tracé de la ligne de repère.

Les mêmes diagrammes que ci-dessus ont été tracés pour la sollicitation du pylône sous l'effet d'une force de 10 tonnes située à 7^m72 de l'appui A (fig. 667).

Flèches au point I (0^m20 sous le point d'application de la charge P₁).

1) Effet de P₁ = 10 tonnes.

Encastrement en A : 17,8 cm.

Appuis en A et B : 17,8 + 2,4 = 20,2 cm.

2) Effet de P₂ = 10 tonnes.

Encastrement en A : 2,7 cm.

Appuis en A et B : 2,7 + 1,0 = 3,7 cm.

D'autre part il y a lieu de tenir compte de la déformation du cadre d'appui. En effet l'appui A est constitué par deux balanciers prenant appui en leur milieu sur les ailes des pylônes (1 DIR 32) et de deux tirants composés chacun de deux fers U PN 30.

L'allongement du cadre, calculé sous l'effet des charges de service, est de 0,093 cm ce qui correspond à une déformation au point I de :

$$x = 0,093 \times \frac{21,70}{3,60} = 0,56 \text{ cm.}$$



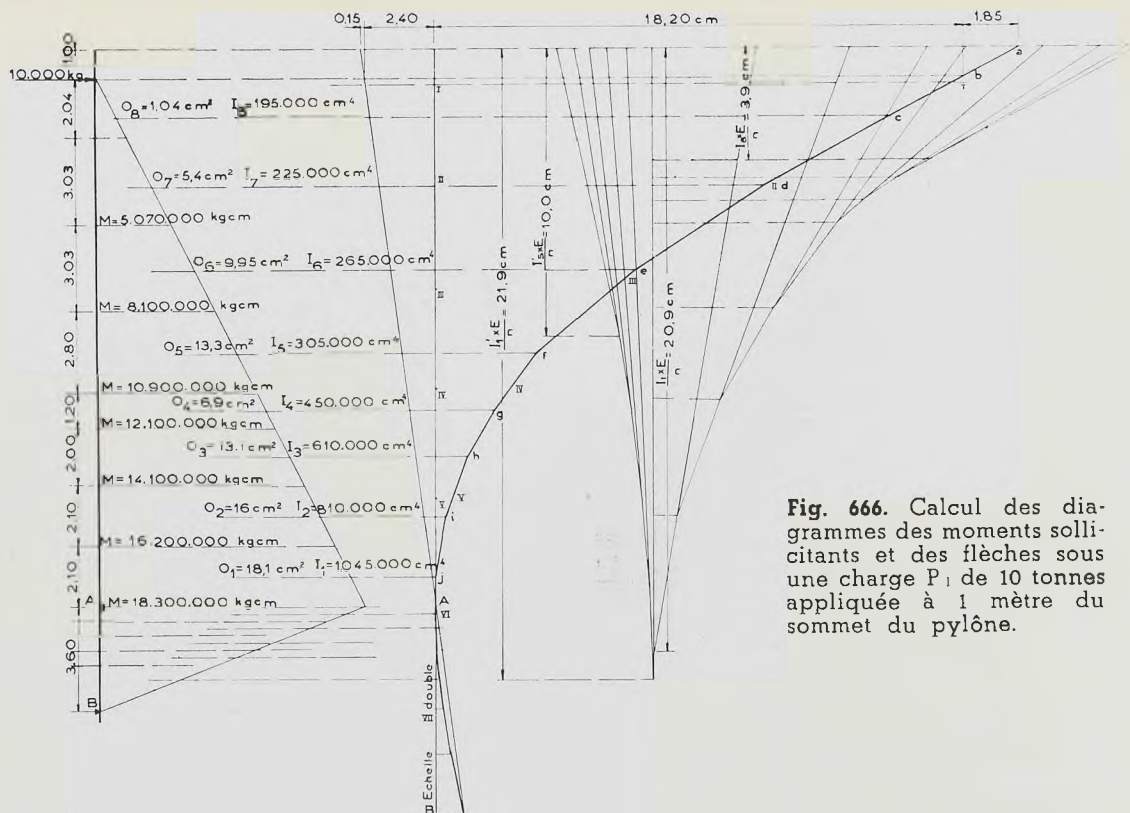


Fig. 666. Calcul des diagrammes des moments sollicitants et des flèches sous une charge P_1 de 10 tonnes appliquée à 1 mètre du sommet du pylône.

Fig. 667. Diagramme des moments sollicitants et des flèches sous une charge P_2 de 10 tonnes appliquée à 7^m/2 de la réaction d'appui. Le troisième diagramme donne les flèches résultantes sous des charges de $P_1 = 7,500$ kg (calculée d'après la figure 666) et $P_2 = 9,800$ kg.

