

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 21 (1930)
Heft: 9

Artikel: Calcul des pylônes à la torsion
Autor: Jobin, B.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1058261>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 21.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Generalsekretariat des
Schweiz. Elektrotechnischen Vereins und des
Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke

REDAKTION
Zürich 8, Seefeldstr. 301

Secrétariat général de
l'Association Suisse des Electriciens et de
l'Union de Centrales Suisses d'électricité

Verlag und Administration

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G.
Zürich 4, Stauffacherquai 36/38

Editeur et Administration

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der
Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet

Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et
sans indication des sources

XXI. Jahrgang
XXI^e Année

Bulletin No. 9

Mai I 1930
Mai I

Calcul des pylônes à la torsion¹⁾.

par

B. Jobin

Ingénieur de la Société Suisse d'Electricité et de Traction à Bâle,
ci-devant Banque Suisse des chemins de fer, et

G. Sulzberger

Ingénieur de contrôle au Département Fédéral des chemins de fer, à Berne.

La résistance des pylônes à la torsion a déjà fait l'objet de nombreuses études et discussions. Le présent article a pour but d'examiner ce problème sous son côté théorique et pratique. Après un exposé justifiant des méthodes de calcul à adopter, un chapitre est consacré à des essais spéciaux, faits en Suisse, dans ce domaine, et qui ont permis de vérifier une concordance très satisfaisante entre le calcul et les mesures. Un commentaire du projet de nouvelles prescriptions fédérales sur les installations électriques à courant fort, élaboré par des commissions de l'A. S. E. avec le concours de représentants des autorités, permettra de se faire une idée de la forme sous laquelle les auteurs du projet envisagent de tenir compte de ce phénomène particulier et de quelles forces extérieures il y aura lieu de se préoccuper pour les calculs. Dans un dernier chapitre, on trouvera l'énoncé de quelques principes à adopter, pour arriver à une construction rationnelle des pylônes au point de vue torsion.

Die Widerstandsfähigkeit der Masten gegen Beanspruchung auf Torsion war schon Gegenstand vieler Studien und Diskussionen. Der folgende Artikel behandelt dieses Problem hinsichtlich Theorie und Praxis. Zunächst wird die Rechnungsmethode dargelegt, dann werden in der Schweiz ausgeführte Versuche beschrieben, welche eine sehr befriedigende Uebereinstimmung zwischen Messung und Rechnung ergaben. Ein Kommentar zum Entwurf für neue Bundesvorschriften über Starkstromanlagen, aufgestellt unter Mitwirkung von Vertretern der Behörden durch Kommissionen des S. E. V., zeigt, wie die Urheber des Entwurfes dieser speziellen Beanspruchung Rechnung zu tragen gedenken und welche äusseren Kräfte bei der Rechnung in Betracht gezogen werden müssen. In einem letzten Abschnitt werden einige Prinzipien angegeben, welche zu einer in bezug auf Torsionsbeanspruchung rationellen Mastenform führen.

Sommaire.

- I. Introduction.
- II. Méthode de calcul.
- III. Pylônes à calculer à la torsion; forces extérieures à adopter (Commentaire des prescriptions suisses en projet).
- VI. Vérification de la théorie par des essais.
- V. Résultats accessoires des essais.
- VI. Conclusions.

I. Introduction.

Le développement actuel des réseaux électriques a conduit à construire de grandes artères possédant une capacité de transport importante, d'où la nécessité d'adopter des tensions de plus en plus élevées et des conducteurs de diamètre de

¹⁾ Cet article est la reproduction presque intégrale d'un rapport présenté à la session de juin 1929 de la Conférence internationale des Grands Réseaux électriques, à Paris.

plus en plus gros. Si l'on considère, d'autre part, que des raisons économiques poussent au choix de grandes, et même de très grandes portées, on conçoit aisément que les efforts à faire intervenir dans le calcul des pylônes ont subi une progression tout au moins équivalente. En régime normal, les efforts provenant des conducteurs sont généralement équilibrés, mais il n'en est plus de même en cas d'inégalité de portées consécutives, de surcharges irrégulières ou de rupture de conducteurs. Quoique ce dernier cas soit exceptionnel, les expériences faites ces dernières années montrent cependant qu'il est raisonnable d'en tenir compte.

Si donc nous avons à faire à une ligne équipée de pylônes du type à consoles fixes, supportant les conducteurs de part et d'autre d'un fût central, celui-ci sera soumis à un moment de torsion, dès qu'un trouble quelconque rompra l'équilibre des efforts des conducteurs. L'usage de tensions élevées, de même que celui de grandes portées, ont entraîné un écartement plus grand des conducteurs entre eux, donc un désaxement plus considérable des conducteurs par rapport au fût du pylône; il en résulte que les moments de torsion, qui peuvent intervenir dans ces cas-là, sont très loin d'être négligeables.

Pendant la construction d'une ligne, au moment du montage des conducteurs, les pylônes peuvent également être soumis à des efforts de torsion, et il n'est pas rare que l'inobservation de précautions élémentaires ait conduit à des déformations, ou même à des ruptures de pylônes.

Nous nous proposons, au cours de cet article, d'indiquer les méthodes à adopter pour tenir compte de ce phénomène de la torsion dans le calcul des pylônes et d'illustrer ces indications par la communication des résultats d'essais, faits en Suisse, à ce sujet, sur un pylône spécial. Cette étude sera suivie de quelques remarques sur les mesures qu'il apparaît opportun de prendre pour adapter la construction des pylônes à ces efforts supplémentaires.

II. Méthode de calcul.

Nous distinguerons deux cas :

- a) les pylônes possédant une section circulaire ou toute autre section, dont on peut déterminer le moment polaire d'inertie,
- b) les pylônes en treillis métalliques.

Pour les premiers, le problème est simple, il suffit d'y appliquer les théories ordinaires de la résistance des matériaux; c'est le cas notamment des poteaux-bois, des poteaux en béton et de leurs dérivés; nous ne nous y arrêterons pas.

Pour les seconds, les pylônes en treillis, le problème est plus compliqué. Il s'agit en effet, si nous considérons le cas d'un pylône avec fût central quadrangulaire et consoles, de décomposer un effort unilatéral, appliqué à l'extrémité d'une console, en quatre forces agissant dans les quatre faces du fût.

Reportons-nous à la fig. 1 et considérons une force horizontale H agissant au point E , extrémité d'une console accusant une excentricité l par rapport à l'axe du fût supposé de section rectangulaire. Les quatre faces du pylône sont numérotées de 1 à 4, les 4 membrures sont désignées par les lettres A, B, C et D ,

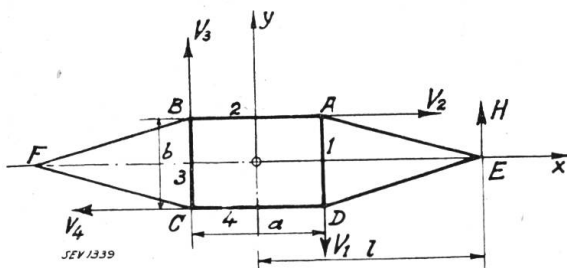


Fig. 1.

Equilibre d'une console sans renforcement.

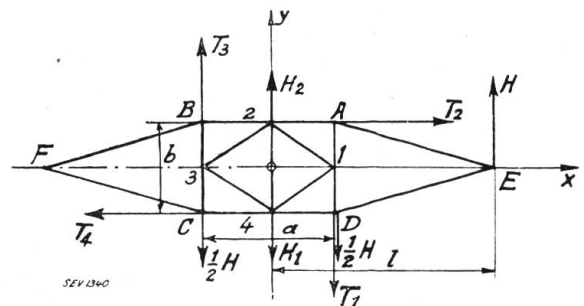


Fig. 2.

Equilibre d'une console avec cadre de renforcement.

les barres AB , BC , CD et DA étant respectivement les côtés du cadre de fixation de la console, transmettant les efforts de celle-ci au fût. Si nous considérons les réactions des faces du fût sur la console, nous aurons quatre forces V_1 , V_2 , V_3 et V_4 qui doivent être en équilibre avec la force H .

Si nous supposons les quatre sommets du cadre comme des points articulés et le cadre lui-même dépourvu de tout croisillon de renforcement, donc déformable, le problème est statiquement déterminé. Dans ce cas, nous avons tout d'abord :

$$V_3 = 0$$

car, étant donné les articulations supposées, les barres AB et CD ne peuvent transmettre aucun effort à la barre BC qui leur est perpendiculaire. Il nous reste donc 3 forces qui sont en équilibre avec H , et que l'on peut calculer à l'aide des principes élémentaires de la statique. Nous aurons

$$\begin{aligned} V_1 &= -H \\ V_2 &= -V_4. \end{aligned}$$

L'équation des moments par rapport au point D nous donne en outre :

$$b V_2 = \left(l - \frac{a}{2}\right) H$$

$$V_2 = \frac{1}{b} \left(l - \frac{a}{2}\right) H.$$

Nous obtenons finalement, en valeur absolue :

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= H \\ V_2 &= V_4 = \frac{1}{b} \left(l - \frac{a}{2}\right) H \\ V_3 &= 0. \end{aligned} \right\} (1)$$

Les forces agissant sur le fût lui-même seront égales, mais de signe contraire aux forces V_1 à V_4 ; à l'aide, soit du théorème de Ritter, soit d'un polygone de Cremona, il sera facile de calculer les efforts dans les membrures et dans les croisillons de chaque face.

L'importance du travail du pylône ressort directement des formules ci-dessus. Pour en donner une idée approximative, supposons un pylône de section carrée ($a = b$) avec $l = 3a$, on aurait alors en valeur absolue :

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= H \\ V_2 &= V_4 = 2,5 H. \end{aligned} \right\} (2)$$

Si, par contre, la force H agissait dans l'axe du pylône, nous aurions seulement :

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= V_3 = \frac{1}{2} H \\ V_2 &= V_4 = 0. \end{aligned} \right\} (3)$$

La disproportion entre les deux hypothèses est évidente.

En réalité, le cadre $ABCD$ aura toujours une certaine rigidité, de par sa construction-même, et ses angles seront indéformables, les membrures du pylône étant généralement constituées par des cornières. Ceci a pour conséquence de faire participer les faces 1 et 3 au travail à la torsion, au lieu des deux seules faces 2 et 4, et de décharger la face 1 au détriment de la face 3, en ce qui concerne les composantes parallèles à la face H . Il est cependant impossible de tenir compte de ces conditions particulières dans un calcul simple, et c'est pourquoi il sera prudent d'en rester aux formules ci-dessus, chaque fois que l'on n'aura pas de dispositif particulier assurant la rigidité du cadre, au droit de la console.

Si, au contraire, cette rigidité était assurée, soit à l'aide de l'une des diagonales AC ou BD , ou des deux ensemble, formant une croix de St. André, ou

encore d'un cadre de renforcement joignant les points milieux du cadre de la console (voir fig. 2), le problème de la décomposition de la force H serait statiquement indéterminé; il ne pourra être résolu qu'en tenant compte des déformations du fût du pylône. Ce calcul, que nous ne développerons pas ici²⁾, montre qu'un moment de torsion, agissant dans le plan d'une console, fait travailler les quatre faces du pylône et que les moments de réaction dans chaque paire de faces opposées, sont égaux. Menons donc, par le centre de la section, deux forces H_1 et H_2 , égales à H , l'une de même sens, l'autre de sens contraire. Le moment provenant du couple $H_1 H$ (voir fig. 2) sera équilibré par des forces T_1, T_2, T_3, T_4 , appliquées aux quatre barres formant le cadre de la console et telles que:

$$\begin{aligned} T_1 &= -T_3 \\ T_2 &= -T_4 \\ a T_1 &= b T_2 \text{ et} \\ a T_1 + b T_2 &= l H \end{aligned}$$

d'où, en valeur absolue:

$$\begin{aligned} T_1 &= T_3 = \frac{1}{2} \frac{l}{a} H \\ T_2 &= T_4 = \frac{1}{2} \frac{l}{b} H. \end{aligned}$$

La force H_2 sera équilibrée par deux réactions $\frac{1}{2} H$ appliquées aux barres AD et BC . Si V_1, V_2, V_3 et V_4 sont les réactions résultantes dans chaque face (voir fig. 1), nous aurons en valeur absolue:

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= \frac{1}{2} \left(\frac{l}{a} + 1 \right) H \\ V_2 &= V_4 = \frac{1}{2} \frac{l}{b} H \\ V_3 &= \frac{1}{2} \left(\frac{l}{a} - 1 \right) H. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

En reprenant le cas particulier envisagé plus haut, c'est-à-dire pour lequel $a = b$, $l = 3a$, nous obtenons:

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= 2,0 H \\ V_2 &= V_4 = 1,5 H \\ V_3 &= H. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

L'avantage de renforcer la section d'application du moment de torsion n'est pas évident, mais il est réel, en voici la raison: Dans un pylône ordinaire, les seuls efforts dont on a à tenir compte pratiquement sont ceux du vent agissant perpendiculairement à la direction de la ligne; les seules faces sollicitées sont donc les faces 2 et 4 parallèles à l'axe des consoles. Dans un pylône à section carrée, les quatre faces sont généralement identiques, de sorte que deux d'entre elles, les numéros 1 et 3, sont toujours surdimensionnées. Dans le cas de pylônes d'angle, ce sont également les faces 2 et 4, parallèles à la bissectrice de l'angle, qui travaillent à leur maximum, tandis que celles normales à la bissectrice ne supportent que les efforts provenant d'une inégalité éventuelle des portées adjacentes. Les nouvelles prescriptions suisses, actuellement encore à l'état de projet, pré-

²⁾ Voir à ce sujet:

Recherche des efforts dus à la torsion dans les pylônes métalliques à treillis par N. Bachet, „Revue Générale d'Electricité“, No. 11 du 14 mars 1925.

Berechnung von Gittermasten auf Verdrehung, par K. Wichmann, dans la revue „Elektrische Bahnen“, No. 11 de novembre 1928.

voient, il est vrai, des sollicitations des pylônes dans le sens parallèle à l'axe de la ligne, mais les sollicitations envisagées, qui se rapportent à des cas exceptionnels (rupture de conducteurs, déséquilibre de portées), sont en général très loin d'être équivalentes à celles provenant du vent qui représentent les conditions normales de travail. Ce sont ces raisons, d'ailleurs, qui poussent dans certains cas à adopter des pylônes à section rectangulaire, particulièrement pour les lignes à un grand nombre de conducteurs; dans ces cas, le grand côté de la section est toujours parallèle à l'axe des consoles.

La comparaison entre les groupes de formules 1 et 4 montre que, en général, le fait d'avoir rendu rigide la section du pylône au droit de la console décharge les faces 2 et 4 en faisant participer les faces 1 et 3 au travail de torsion.

Les rapports k entre les efforts du second cas et ceux du premier sont en effet les suivants:

$$\left. \begin{aligned} \text{pour } V_1 \quad k_1 &= \frac{1}{2} \left(\frac{l}{a} + 1 \right) \\ \text{pour } V_2 \text{ et } V_4 \quad k_2 &= \frac{1}{2} \frac{l}{l - \frac{a}{2}} = \frac{\frac{l}{a}}{2 \frac{l}{a} - 1} \\ \text{pour } V_3 \quad k_3 &= \infty^3 \end{aligned} \right\} (6)$$

et comme $\frac{l}{a}$ est constamment plus grand que l'unité, nous aurons toujours

$$k_1 > 1 \quad k_2 = k_4 < 1 \quad k_3 > 1.$$

Pour le cas particulier envisagé plus haut ($a = b$, $l = 3a$)

$$\begin{aligned} k_1 &= 2,0 \\ k_2 &= k_4 = 0,6. \end{aligned}$$

Ces chiffres montrent clairement l'amélioration du travail réciproque des quatre faces du pylône. Les valeurs de k étant indépendantes de b , ces déductions sont valables pour toutes les sections, carrées ou rectangulaires, et pour ces dernières, quel que soit le rapport entre la longueur des côtés et la direction du grand axe du rectangle (parallèle ou perpendiculaire à l'axe de la console).

La face 1 a tendance maintenant à être la plus fortement sollicitée (c'était précédemment le cas des faces 2 et 4), mais son taux de travail reste encore inférieur à celui de la face 2, dans le premier cas. Nous avons en effet:

$$\frac{V_1 \text{ du second cas}}{V_2 \text{ du premier cas}} = \frac{b \frac{l}{a} + 1}{a \frac{l}{2 \frac{l}{a} - 1}} < 1$$

Pour notre cas particulier, ce rapport est de 0,8. On peut encore remarquer que cette amélioration de l'effort maximum est toujours plus grande pour une section rectangulaire, car le rapport $\frac{a}{b}$ doit être logiquement plus petit que l'unité, de manière que le pylône soit plus apte à résister au vent soufflant dans le sens perpendiculaire à la ligne.

Nous avons montré maintenant de quelle manière le couple de torsion agit sur le pylône; il nous reste à examiner à quelles sollicitations les différents éléments de chaque face, les membrures et les croisillons, seront soumis.

³⁾ V_3 passe en effet de 0 à une valeur finie $\frac{1}{2} \left(\frac{l}{a} - 1 \right) H$.

Dans la fig. 3, où les forces V représentent l'action de H sur les différentes faces du pylône, nous voyons que la membrure A travaillera à la compression sous l'effet de la force V_1 et à la traction sous l'effet de la force V_2 et l'effort résultant sera (voir fig. 4):

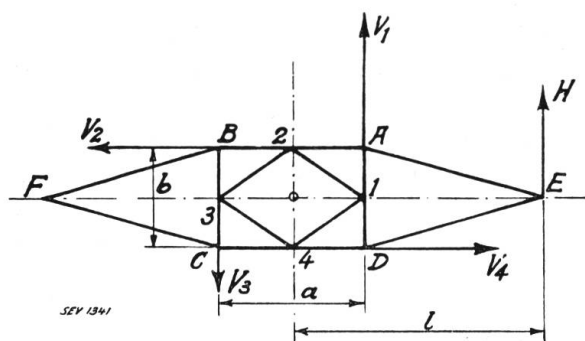


Fig. 3.

Efforts de torsion sur le fût du pylône.

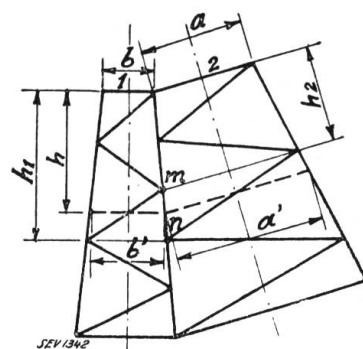


Fig. 4.

$$M_A = \frac{hV_2}{a'} - \frac{hV_1}{b'}$$

en faisant la convention de signe $+$ pour la traction et $-$ pour la compression. En introduisant les valeurs de V_1 et V_2 tirées des équations 4, correspondant au cas d'une section rigide, et en admettant $\frac{a'}{b'} = \frac{a}{b}$, ce qui se présente habituellement pour les pylônes de forme pyramidale, on trouve :

$$M_A = -\frac{1}{2} \frac{hH}{b'}.$$

Cette formule nous montre que la membrure A travaillera à la compression, comme si la force H agissait dans l'axe du pylône, ce qui signifie, en d'autres termes, que *la torsion proprement dite ne soumet les membrures à aucun travail* quelles que soient les proportions de la section. Les seuls efforts dans les membrures sont ceux dus au moment fléchissant provenant du tir unilatéral sur le pylône.

Par raison de symétrie, on peut conclure que la membrure B sera soumise au même effort de compression que A , et que les membrures C et D travailleront à la traction d'une quantité équivalente. Il y a lieu, en outre, d'ajouter aux efforts ainsi calculés, un effort de compression qui se répartit uniformément sur les quatre membrures, provenant du poids propre du pylône et de son équipement.

Pour être rigoureux, il aurait fallu tenir compte, dans le calcul des membrures, de l'influence des croisillons, particulièrement lorsqu'ils sont disposés en zigzag et qu'un nœud d'une face tombe au milieu d'une longueur de flambage de la face adjacente (voir fig. 4). Pour obtenir l'effort dans la barre $m-n$, nous aurions dû calculer le moment fléchissant avec la hauteur h_1 pour la face 1 et avec la hauteur h_2 pour la face 2, alors que nous avons adopté une hauteur moyenne h . L'erreur commise est faible, et même négligeable à une certaine distance de la console, car la différence entre h_1 et h_2 est au plus égale à une demi-longueur de flambage des membrures.

En pratique, on peut vérifier que les efforts H provoquant un moment de torsion restent en général inférieurs à la poussée totale du vent sur le pylône et les conducteurs; les pylônes calculés par les méthodes ordinaires résisteront donc facilement, au point de vue membrure, au phénomène de torsion.

Les croisillons, au contraire, sous l'effet des forces V assimilées à des efforts tranchants, agissant dans chaque face considérée pour elle-même, seront soumis à un taux de travail élevé et ce seront même, très souvent, ces efforts de torsion qui seront déterminants pour le choix des profilés. Jusqu'à présent, les pylônes

ordinaires ont été, pour ainsi dire, calculés exclusivement au vent. Les efforts tranchants à prendre en considération dans ce cas, se composent de deux termes, l'un constant depuis les consoles jusqu'à la base, correspondant à la poussée du vent sur les conducteurs et isolateurs, et l'autre, variable, correspondant à la poussée du vent sur le pylône lui-même; ce second terme est nul au sommet, et maximum à la base. Avec la torsion, nous avons à faire à des efforts tranchants importants, dépassant souvent ceux de la poussée totale du vent, appliqués à la hauteur des consoles; les pylônes calculés au vent, c'est-à-dire pour un effort tranchant croissant de la tête à la base, seront donc proportionnellement plus faibles dans les parties supérieures qu'à la base, pour des efforts maximums appliqués au droit des consoles. En fait, on peut remarquer que, dans la très grande majorité des cas, les accidents provoqués par l'action d'un moment de torsion sont dus à une rupture ou à une déformation au flambage de croisillons, peu en-dessous des consoles⁴).

Sous l'effet du moment de torsion, la section dans le plan de la console va subir une rotation autour de l'axe du pylône, ce qui provoquera des déformations dans les éléments de chaque face du pylône, à savoir:

- a) une torsion des membrures autour de leur axe propre,
- b) un gauchissement des faces du pylône entraînant un travail de flexion dans les croisillons.

Les efforts provenant des déformations sous lettre a) seront en général négligeables, car les déplacements des consoles seront toujours faibles vis-à-vis de leur hauteur au-dessus de la base. Le gauchissement des faces ne joue pas de rôle au point de vue de la fatigue de la matière, mais la flexion qui agira sur les croisillons pourra éventuellement favoriser les déformations au flambage. Cette flexion ne peut pas être introduite, d'une manière simple, dans les calculs, et, quoique son influence soit toujours faible par rapport à celle des efforts principaux, il conviendra d'être prudent en adoptant des coefficients de sécurité judicieux.

Ces quelques remarques montrent que le calcul des pylônes à la torsion est essentiellement une affaire de croisillons et que c'est à cette partie-là que le constructeur devra consacrer des soins spéciaux. Suivant l'importance des efforts en jeu, on pourra être amené à adopter des croisillons simples, ou doubles, ou d'autres dispositions spéciales. Ce qu'il ne faut pas oublier dans ces calculs, c'est que les croisillons sont alternativement soumis à des efforts de compression et de traction et que, pour ces derniers, il peut y avoir des précautions à prendre; nous reviendrons plus loin sur cette question.

Nos conclusions coïncident d'ailleurs exactement avec les théories générales de la résistance des matériaux sur la torsion des barres rigides. Le travail des croisillons correspond aux fatigues de cisaillement et celui des membrures, aux fatigues normales; pour toutes les barres à section rectangulaire, on trouve en effet que les fatigues au cisaillement sont maximums au milieu des faces, tandis qu'elles sont nulles sur les arêtes; l'analogie est évidente.

III. Pylônes à calculer à la torsion; forces extérieures à adopter.

L'introduction de la torsion dans le calcul des pylônes est une suggestion qui conduira fatalement à augmenter le poids des constructions. Il ne faut donc pas s'abuser sur son importance, car cela pourrait avoir des répercussions fâcheuses sur le prix de revient des lignes. Les prescriptions suisses, actuellement encore à l'état de projet, marquent un progrès sensible sur les précédentes, en introduisant cette nouveauté dans le calcul des pylônes et en fixant d'une manière très précise, quels pylônes doivent être calculés à la torsion, et quelles forces extérieures doivent être prises en considération. Ces prescriptions envisagent deux catégories de lignes:

⁴) Cette conclusion n'est pas forcément vraie pour les pylônes calculés en rapportant l'effort tranchant résultant, au sommet; cette méthode est d'ailleurs inexacte.

1. *les lignes ordinaires* avec portées jusqu'à 50 m; ce sont principalement les lignes poteaux-bois; elles ne nous intéressent pas au point de vue torsion.
2. *les lignes à grandes portées*, c'est-à-dire celles dont les portées dépassent 50 m et pour lesquelles les organes du contrôle exigent une justification de la sécurité des supports.

Dans cette catégorie, qui est la seule à prendre en considération pour notre étude, on distingue:

- a) les lignes comprenant de simples *pylônes d'appui* (Stützmaste), calculés pour résister avec une certaine sécurité seulement aux efforts normaux qui se présentent en exploitation, avec intercalation de *pylônes d'arrêt* (Abspannmaste), calculés en tenant compte de la rupture éventuelle de conducteurs et destinés à éviter qu'une telle rupture n'entraîne des perturbations sur un trop long tronçon de ligne.
- b) les lignes sans pylônes d'arrêt, comprenant des *pylônes porteurs* (Tragmaste), calculés tous sur le même principe, non seulement pour les conditions normales d'exploitation, mais aussi pour le cas de rupture éventuelle d'un conducteur.

On distingue en outre les *pylônes d'angle* et les *pylônes d'extrémité* qui doivent satisfaire aux conditions ordinaires découlant directement de leurs fonctions.

D'après ces prescriptions, les pylônes d'arrêt et les pylônes porteurs doivent être calculés pour résister, avec une certaine sécurité, au moment de torsion le plus défavorable, consécutif à la rupture d'un conducteur. Règle générale, il faudra considérer à cet effet le conducteur de la console la plus longue. Cependant, pour les pylônes de forme pyramidale, on aura chaque fois à examiner si le cas le plus défavorable ne correspond pas à la rupture d'un conducteur de la console supérieure pour laquelle la section du fût est la plus petite. Le tir unilatéral doit être pris égal à l'effort maximum auquel le conducteur peut être soumis à 0°C avec une surcharge de neige, uniformément répartie, de 2 kg/m pour les conducteurs câblés, et de 1,5 kg/m pour les fils.

Pour l'application de ce principe, le projet de prescriptions prévoit certains allègements. Ainsi, pour les lignes fixées à des chaînes d'isolateurs, il est permis de tenir compte de la réduction du tir des conducteurs par suite de l'inclinaison des chaînes d'isolateurs, si cette réduction est justifiée par un calcul. On est autorisé, d'autre part, à prendre en considération „l'haubannage“ résultant de la présence d'autres conducteurs, fixés plus ou moins rigidement au pylône. On admet donc, implicitement, que ces conducteurs sont restés intacts et qu'ils contribuent à soulager le pylône en équilibrant partiellement, sous l'effet des déformations qui se présenteront, une partie du moment de torsion. Ce problème est très complexe et il mériterait d'être étudié pour lui-même. Finalement, les prescriptions ne prévoient pas de faire intervenir, dans les calculs, le choc qui se présentera au moment de la rupture et dont il serait d'ailleurs difficile de tenir compte. Nous ajouterons que ces prescriptions n'envisagent pas la simultanéité de la torsion et d'autres forces extérieures, telles que le vent ou des surcharges sur les conducteurs non rompus.

IV. Vérification de la théorie par des essais.

Afin de vérifier les théories émises au sujet de la torsion des pylônes et de contrôler l'effet de la rigidité du cadre des consoles sur la répartition des efforts, diverses administrations fédérales se sont groupées pour réaliser une série d'essais de contrôle. Ces essais, effectués sur un pylône spécial, ont eu lieu en 1927 à Ostermundigen près de Berne, avec la participation des Chemins de fer Fédéraux, de la Direction générale des Télégraphes et du Département Fédéral des chemins de fer. Le pylône a été construit par les soins du Service d'Electrification des Chemins de fer Fédéraux. Les mesures ont porté sur les efforts dans les barres

du pylône et sur ses déformations, à l'aide d'instruments de précision, obligeamment mis à disposition par le Service des Ponts des Chemins de fer Fédéraux, qui avait également délégué deux de ses ingénieurs.

Les dimensions du pylône sont données par le dessin schématique de la fig. 5; les traits correspondent aux lignes des centres de gravité des différentes barres. Il était monté sur un massif de fondation, calculé avec une marge suffisante pour qu'il ne soit sujet à aucun déplacement important. Un échafaudage entourant le pylône et entièrement indépendant de lui, permettait d'accéder à la partie supérieure sans troubler les mesures en quoi que ce soit.

Il a été fait trois séries principales d'essais, à savoir :

1. tir unilatéral dans l'axe du pylône; effort variable de 0 à 1000 kg. fig. 6a,
2. tir unilatéral à l'extrémité d'une console, à 1 725 mm de l'axe du pylône, avec cadre de renforcement; effort variable de 0 à 625 kg, fig. 6b,
3. tir unilatéral à l'extrémité d'une console, à 1 725 mm de l'axe du pylône, sans aucun renforcement du cadre de la console; effort variable de 0 à 625 kg, fig. 6c.

Les mesures ont porté sur:

- a) l'effort appliqué au pylône; à cet effet, un dynamomètre avait été introduit dans le câble de traction; l'effort lui-même était produit à l'aide d'un treuil;
- b) la fatigue du métal dans:
 - les quatre croisillons à la tête du pylône,
 - les quatre croisillons à la base du pylône,
 - deux membrures opposées à la base du pylône, à 145 mm au-dessus de l'axe du cadre de la fondation.

Ces mesures ont été faites, pour chaque barre, sur chacune des ailes de la cornière; les chiffres donnés plus loin sont la moyenne entre ces deux mesures.

Les appareils utilisés étaient des extensomètres d'Okhuizen.

- c) l'inclinaison prise par chaque barre du cadre de la console à la tête du pylône et du cadre de fondation.

Ces mesures ont été faites à l'aide de clinomètres de précision.

- d) les déplacements de la tête du pylône et son angle de rotation, déterminés à l'aide de fleximètres de précision.

La fig. 7 montre la disposition de ces instruments à la tête du pylône.

Nous nous bornerons à communiquer, ci-dessous, les résultats caractéristiques des mesures des efforts dans les barres. L'étude des déformations nous entraînerait au-delà du but que nous poursuivons pour le moment, c'est-à-dire de fixer les principes du calcul des pylônes à la torsion. Il n'est en effet nécessaire de prendre ces déformations en considération que pour faire intervenir, dans les calculs, le

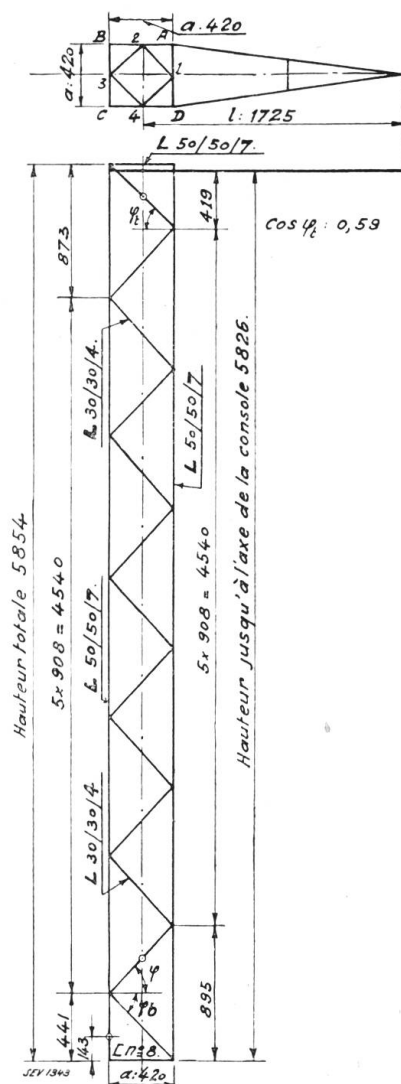


Fig. 5.
Pylône d'essai.

Les petits cercles avec point au centre désignent les points où étaient fixés les extensomètres pour les mesures des fatigues dans les barres.

L 50/50/7 Section totale 6,6 cm²
L 30/30/7 Section totale 2,3 cm²
cos φ = 0,68
cos φ_b = 0,19
tg φ_b = 1,05

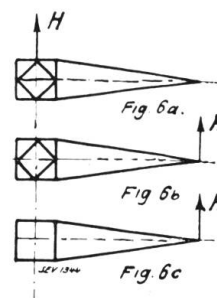


Fig. 6.
Schéma des essais.

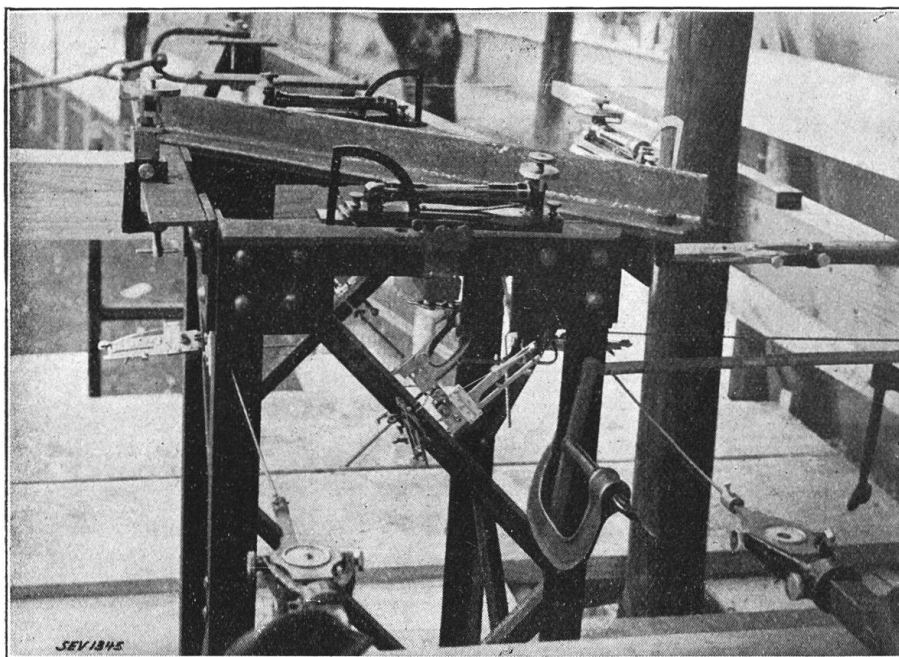


Fig. 7.

Disposition des appareils de mesure à la tête du pylône, pendant les essais.

soulagement du pylône sous l'effet d'hau-bannage des conducteurs, non rompus, fixés aux consoles; cette question est fortement combattue par certains groupes d'intéressés suisses, et il serait utile de connaître l'opinion des constructeurs de lignes comme aussi celle des constructeurs de pylônes sur ce problème délicat.

Pour faciliter la compréhension de ce qui va suivre, nous donnerons tout d'abord un tableau des désignations que nous avons adoptées.

Efforts dans les croisillons à la tête du pylône, pour chacune des faces 1 à 4

$$C_{t1} \quad C_{t2} \quad C_{t3} \quad C_{t4}$$

Efforts dans le 2^{me} croisillon depuis la base du pylône pour chacune des faces 1 à 4

$$C_1 \quad C_2 \quad C_3 \quad C_4$$

Efforts résultant dans chacune des membrures, à la base du pylône

$$M_A \quad M_B \quad M_C \quad M_D$$

Les valeurs de ces différents efforts, déterminés par les principes élémentaires du calcul des treillis métalliques, seront les suivantes, (les forces V sont celles de la fig. 3 ci-dessus):

$$\left. \begin{aligned} C_{t1} &= \frac{-V_1}{\cos \varphi_t} & C_1 &= \frac{V_1}{\cos \varphi} \\ C_{t2} &= \frac{-V_2}{\cos \varphi_t} & C_2 &= \frac{V_2}{\cos \varphi} \\ C_{t3} &= \frac{-V_3}{\cos \varphi_t} & C_3 &= \frac{V_3}{\cos \varphi} \\ C_{t4} &= \frac{-V_4}{\cos \varphi_t} & C_4 &= \frac{V_4}{\cos \varphi} \\ M_A &= (V_2 - V_1) \frac{h}{a} + V_1 \operatorname{tg} \varphi_b \\ M_B &= (V_3 - V_2) \frac{h}{a} + V_2 \operatorname{tg} \varphi_b \\ M_C &= (V_4 - V_3) \frac{h}{a} + V_3 \operatorname{tg} \varphi_b \\ M_D &= (V_1 - V_4) \frac{h}{a} + V_4 \operatorname{tg} \varphi_b \end{aligned} \right\} 7$$

Dans ces formules, les valeurs suivantes dépendent directement de la construction du pylône; ce sont:

$$\begin{aligned}\cos \varphi_t &= 0,59 & \cos \varphi_b &= 0,69 \\ \cos \varphi &= 0,68 & \operatorname{tg} \varphi_b &= 1,05\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}h &= 5826 \text{ mm} \\ a = b &= 420 \text{ mm} \\ l &= 1725 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$\frac{h}{a} = 13,85 \quad \frac{h}{a} - \operatorname{tg} \varphi_b = 12,80$$

On trouvera ces grandeurs reportées sur les fig. 5 et 8. Les forces V seront positives lorsqu'elles seront dirigées dans le sens des flèches de la fig. 8; ce sens correspond d'ailleurs à l'action de la console sur le fût du pylône, telle qu'elle résulte de la direction choisie pour la force H , pendant les essais. La convention de signes adoptée est telle que l'on obtiendra des valeurs positives s'il y a traction dans la barre considérée, des valeurs négatives s'il y a compression. Nous négligeons le poids propre du pylône.

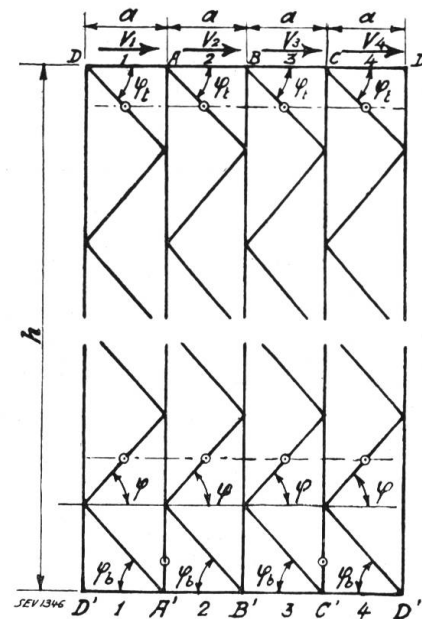


Fig. 8.
Développement du pylône d'essai.
Les petits cercles avec point au centre désignent les points où étaient placés les extensomètres pour les mesures des fatigues dans les barres.

Essai No. 1.

Tir unilatéral dans l'axe du pylône; effort variable de 0 à 1000 kg, fig. 6a.

Les efforts maximums dans chaque face sont, d'après le calcul, les suivants:

$$\begin{aligned}H &= 1000 \text{ kg} \\ V_1 &= \frac{1}{2} H = 500 \text{ kg} \\ V_3 &= -\frac{1}{2} H = -500 \text{ kg} \\ V_2 &= V_4 = 0.\end{aligned}$$

Essai No. 2.

Tir unilatéral à l'extrémité d'une console à 1725 mm de l'axe du pylône, avec cadre de renforcement; effort variable de 0 à 625 kg, fig. 6b.

Les efforts maximums dans chaque face, d'après la formule 4 ci-dessus, où l'on fait $a = b$, sont les suivants:

$$\begin{aligned}H &= 625 \text{ kg} \\ V_1 &= \frac{1}{2} \left(\frac{l}{a} + 1 \right) H = 1600 \text{ kg} \\ V_2 &= \frac{1}{2} \frac{l}{a} H = 1285 \text{ kg} \\ V_3 &= \frac{1}{2} \left(\frac{l}{a} - 1 \right) H = 972 \text{ kg} \\ V_4 &= V_2 = 1285 \text{ kg}\end{aligned}$$

Essai No. 3.

Tir unilatéral à l'extrémité d'une console à 1725 mm de l'axe du pylône, sans aucun renforcement du cadre de la console; effort variable de 0 à 625 kg, fig. 6c.

Les efforts maximums dans chaque face, d'après les formules 1 ci-dessus⁵⁾, où l'on fait $a = b$, sont les suivants (page 301):

⁵⁾ Nous rappelons ici que ces formules ont été établies en supposant que les sommets du cadre de la console sont articulés.

Essai de pylône à la torsion.
Tableau comparatif des résultats des calculs et des mesures.

Tableau I.

	Force exté- rieure	Croisillons à la tête du pylône											
		Face 1			Face 2			Face 3			Face 4		
		Calcul		Mesure	Calcul		Mesure	Calcul		Mesure	Calcul		Mesure
		Effort total C_{t1}	Fatigue	Fatigue	Effort total C_{t2}	Fatigue	Fatigue	Effort total C_{t3}	Fatigue	Fatigue	Effort total C_{t4}	Fatigue	Fatigue
	H	kg	kg/cm ²	kg/cm ²	kg	kg/cm ²	kg/cm ²	kg	kg/cm ²	kg/cm ²	kg	kg/cm ²	kg/cm ²
<i>Essai No. 1</i> La force H agit dans l'axe du pylône	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	135	-143	-62	-56	0	0	-	143	62	58	0	0	-
	250	-212	-92	-102	0	0	-	212	92	89	0	0	-
	375	-318	-138	-136	0	0	-	318	138	141	0	0	-
	500	-424	-184	-172	0	0	8	424	184	179	0	0	-2
	625	-530	-231	-179	6	0	10	530	231	192	0	0	-2
	750	-640	-278	-230	0	0	13	640	278	255	0	0	-2
	1000	-848	-369	-315	0	0	26	848	369	311	0	0	-2
<i>Essai No. 2</i> Torsion avec cadre de renforcement	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	135	-585	-254	-237	-470	-204	-164	-355	-154	-130	-470	-204	-179
	250	-1082	-471	-425	-870	-379	-337	-657	-286	-247	-870	-379	-321
	375	-1620	-705	-639	-1305	-567	-491	-986	-428	-358	-1305	-567	-493
	500	-2160	-940	-850	-1740	-756	-652	-1315	-572	-475	-1740	-756	-641
	625	-2700	-1175	-1075	-2180	-946	-829	-1645	-715	-500	-2180	-946	-817
<i>Essai No. 3¹⁾</i> Torsion sans cadre de renforcement	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	135	-229	-100	-231	-825	-359	-191	0	0	-125	-825	-359	-192
	250	-424	-185	-380	-1530	-665	-355	0	0	-273	-1530	-665	-371
	375	-636	-276	-602	-2280	-990	-563	0	0	-286	-2280	-990	-669
	500	-847	-368	-757	-3060	-1330	-762	0	0	-375	-3060	-1330	-770
	625	-1060	-460	-963	-3810	-1655	-1021	0	0	-600	-3810	-1655	-1021
	Force exté- rieure	2 ^{me} Croisillon depuis la base du pylône											
		Face 1			Face 2			Face 3			Face 4		
		Calcul		Mesure	Calcul		Mesure	Calcul		Mesure	Calcul		Mesure
	H	Effort total C_1	Fatigue	Fatigue	Effort total C_2	Fatigue	Fatigue	Effort total C_3	Fatigue	Fatigue	Effort total C_4	Fatigue	Fatigue
	kg	kg	kg/cm ²	kg/cm ²	kg	kg/cm ²	kg/cm ²	kg	kg/cm ²	kg/cm ²	kg	kg/cm ²	kg/cm ²
<i>Essai No. 1</i> La force H agit dans l'axe du pylône	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	135	99	43	85	0	0	0	-99	-43	-02	0	0	-
	250	184	80	132	0	0	0	-184	-80	-141	0	0	-
	375	276	120	172	0	0	9	-276	-120	-144	0	0	-
	500	367	159	223	0	0	0	-367	-159	-247	0	0	-
	625	459	200	283	0	0	0	-459	-200	-322	0	0	38
	750	552	240	268	0	0	0	-552	-240	-391	0	0	44
	1000	735	315	393	0	0	0	-735	-315	-495	0	0	93
<i>Essai No. 2</i> Torsion avec cadre de renforcement	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	135	508	222	382	408	178	208	308	134	144	408	178	213
	250	940	409	599	755	329	370	571	248	260	775	329	367
	375	1410	614	714	1135	493	543	855	372	489	1135	493	558
	500	1880	819	893	1512	657	702	1142	497	502	1512	657	728
	625	2345	1020	1142	1890	822	850	1430	622	636	1890	822	913
<i>Essai No. 3¹⁾</i> Torsion sans cadre de renforcement	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	135	199	87	232	715	311	141	0	0	145	715	311	198
	250	367	197	454	1328	578	237	0	0	266	1328	578	369
	375	552	240	685	1990	866	411	0	0	396	1990	866	549
	500	735	320	878	2655	1155	528	0	0	491	2665	1155	699
	625	918	399	1147	3320	1445	640	0	0	592	3320	1445	867

¹⁾ Les calculs, pour cet essai No. 3, ont été faits en admettant que les sommets du cadre de la console sont des points articulés.

Suite du tableau I.

	Force exté- rieure <i>H</i> kg	Membrure à la base du pylône											
		Membrure A			Membrure B			Membrure C			Membrure D		
		Calcul		Mesure	Calcul		Mesure	Calcul		Mesure	Calcul		Mesure
		Effort total <i>M_A</i> kg	Fatigue kg/cm ²	Fatigue kg/cm ²	Effort total <i>M_B</i> kg	Fatigue kg/cm ²	Fatigue kg/cm ²	Effort total <i>M_C</i> kg	Fatigue kg/cm ²	Fatigue kg/cm ²	Effort total <i>M_D</i> kg	Fatigue kg/cm ²	Fatigue kg/cm ²
Essai No. 1 La force <i>H</i> agit dans l'axe du pylône	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	
	135	- 865	- 131	- 222	- 935	142		865	131	267	935	142	
	250	- 1600	- 243	- 368	- 1730	262		1600	243	377	1730	262	
	375	- 2400	- 364	- 516	- 2600	394		2400	364	496	2600	394	
	500	- 3200	- 485	- 605	- 3460	525		3200	485	628	3460	525	
	625	- 4000	- 606	- 718	- 4330	656		4000	718	708	4330	656	
	750	- 4800	- 728	- 835	- 5200	788		4800	835	855	5200	788	
Essai No. 2 Torsion avec cadre de renforcement	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	
	135	- 587	- 89	- 78	- 647	- 98		1158	176	191	1225	185	
	250	- 1088	- 165	- 145	- 1220	- 185		2140	324	322	2270	344	
	375	- 1630	- 247	- 233	- 1832	- 278		3210	487	475	3400	515	
	500	- 2180	- 331	- 307	- 2440	- 370		4280	648	629	4540	687	
	625	- 2720	- 412	- 370	- 3060	- 464		5350	810	773	5670	860	
Essai No. 3 ¹⁾ Torsion sans cadre de renforcement	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	
	135	5000	757	- 53	- 6210	- 940		6750	1020	178	- 4350	- 660	
	250	9260	1405	- 104	- 11500	- 1740		12500	1895	336	- 8050	- 1218	
	375	13880	2100	- 160	- 17250	- 2610		18750	2840	513	- 12100	- 1830	
	500	18500	2800	- 218	- 23000	- 3490		25000	3790	658	- 16100	- 2440	
	625	23100	3500	- 277	- 28800	- 4370		31200	4720	838	- 20050	- 3020	

¹⁾ Les calculs, pour cet essai No. 3, ont été faits en admettant que les sommets du cadre de la console sont des points articulés.

$$H = 625 \text{ kg}$$

$$V_1 = H = 625 \text{ kg}$$

$$V_2 = \frac{1}{b} \left(l - \frac{a}{2} \right) H = 2260 \text{ kg}$$

$$V_3 = 0 \text{ kg}$$

$$V_4 = V_2 = 2260 \text{ kg}$$

Pour chacun de ces trois essais, les efforts dans les croisillons et les membrures, obtenus par application des formules 7 ci-dessus et les fatigues correspondantes, déduites par la connaissance des sections des cornières, sont reportés pour différentes valeurs de *H* dans le tableau annexé. En regard, on a placé les fatigues mesurées au cours des essais; chacun d'eux a été répété trois fois, les chiffres indiqués en sont les moyennes.

L'examen du tableau I montre que, pour les essais No. 1 et 2, la concordance entre les calculs et les mesures est satisfaisante; c'est une confirmation de la valeur pratique des méthodes de calcul ordinaires pour les pylônes et de celle des formules 4 ci-dessus, dans le cas de la torsion. La comparaison des résultats de l'essai No. 1 avec ceux de l'essai No. 2 permet aussi de vérifier l'exactitude de nos déductions sur la répartition des efforts sur les différentes parties du pylône, c'est-à-dire que les croisillons sont seuls à participer au travail à la torsion, tandis que les membrures ne sont soumises de ce fait à aucun effort supplémentaire par rapport aux conditions ordinaires, lorsque la force *H* est appliquée dans l'axe du pylône.

Pour l'essai No. 3, nous constatons au contraire des divergences considérables entre le calcul et les mesures, qui permettraient à première vue de condamner

notre théorie, dans le cas où le cadre de la console n'est pourvu d'aucun renforcement.

En ce qui concerne les croisillons, le calcul nous donne des efforts importants pour ceux des faces 2 et 4, des efforts plus réduits pour ceux de la face 1, et aucun effort pour ceux de la face 3. Les mesures montrent, par contre, que les fatigues réelles dans les faces 2 et 4 sont très sensiblement réduites par rapport au calcul, qu'elles sont plus élevées pour la face 1 et que, dans la face 3, elles atteignent des valeurs comparables à celles de la face 1 (au lieu d'être nulles). Il en ressort, comme nous l'avions déjà prévu, que la résistance à la déformation de la section à la tête du pylône, du fait de la rigidité propre des cornières des membrures et de leur assemblage par un cadre formé de barres relativement courtes, est déjà suffisante pour faire participer les quatre faces au travail à la torsion et pour répartir les composantes parallèles à la force H , non plus sur la seule face 1, mais bien sur les faces 1 et 3. C'est également cette participation des quatre faces au travail de torsion qui permet de justifier les écarts considérables entre le calcul et la réalité, au point de vue des membrures. Nous avons montré précédemment que les forces V de deux faces consécutives soumettent la membrure commune à ces faces, l'une à un effort de traction, l'autre à un effort de compression. Ces efforts considérés chacun séparément *sont très importants*, mais ils se compensent, dans la mesure où les efforts de torsion se répartissent uniformément sur les quatre faces, de manière que leur résultante reste la même que si la torsion n'existait pas, c'est-à-dire que la force excentrique soit ramenée dans l'axe de ce pylône.

Le calcul théorique qui nous a conduits aux formules 1 et qui correspond aux conditions de l'essai No. 3, est basé sur l'hypothèse d'une articulation des quatre sommets du cadre de la console, ce qui revient à admettre que les faces 2 et 4 seront seules à participer au travail de torsion. Or, dans ce cas, les membrures ne sont plus soumises de la part de leurs faces adjacentes à des efforts de traction et de compression comparables, ce qui explique la valeur très élevée de leur résultante. Dès que les quatre faces participent à la torsion, ces efforts de traction et de torsion redeviennent comparables et leur résultante tombe à des valeurs beaucoup plus faibles. C'est précisément ce qui s'est passé au cours des essais et même dans une proportion telle que l'on peut conclure que le pylône n'était pas construit de manière à montrer d'une façon très frappante l'amélioration apportée par le cadre de renforcement de la console; ceci tient à ce que la section du fût était trop petite pour les profils employés et que le cadre de la console, en cornière de 60/60/6, était quasiment indéformable pour les efforts en jeu.

Ce résultat, en quelque sorte négatif, de l'essai No. 3, doit-il conduire à rejeter les formules 1? Nous ne le croyons pas, car les pylônes de lignes sont très loin, suivant les cas, d'avoir la même rigidité transversale que le pylône en essai; ceci se vérifie très souvent, car les fûts de pylône, livrés rivés en usine, ne peuvent pas toujours supporter les transports, soit par chemin de fer, soit par camion, sans être entretoisés par des pièces de bois. Pour ces pylônes-là, nous considérons les formules 1 comme valables, restant bien entendu que les calculs donneront des efforts trop grands pour les membrures et les croisillons des faces 2 et 4, et des efforts trop faibles pour les croisillons des faces 1 et 3.

Il a encore été fait un essai, avec une simple diagonale, comme renforcement du cadre de la console; les résultats obtenus dans ce cas sont tout à fait comparables à ceux de l'essai No. 2 avec cadre de renforcement; nous avons donc jugé inutile de rapporter le détail de ces mesures.

V. Résultats accessoires des essais.

Nous tenons à relever ici deux faits particuliers, auxquels on n'attache pas d'ordinaire une attention suffisante, et qu'il a été permis de constater au cours des essais faisant l'objet du chapitre précédent; il s'agit tout d'abord de la répartition

des fatigues dans une même section des cornières, et ensuite du danger que peuvent présenter les croisillons travaillant à la traction.

Comme il a été dit plus haut, la mesure des fatigues s'est faite, au cours des essais, à l'aide d'extensomètres, placés sur chacune des ailes des cornières. Pour chaque barre, il y avait donc deux mesures dont on a pris la moyenne. Or, les deux valeurs obtenues étaient constamment différentes l'une de l'autre, même dans de très fortes proportions; ce fait est bien connu, mais nous croyons utile d'y revenir ici. A titre d'exemple, nous pouvons citer les chiffres suivants:

Croisillon à la tête du pylône, travaillant à la compression.

Effort total kg				566	1010	1510	2000	2500
Fatigue mesurée:								
Aile rivée	(1)	kg/cm ²		338	637	965	1275	1610
Aile libre	(2)	kg/cm ²		132	236	336	453	550
<i>Croisillon à la base du pylône, travaillant à la traction.</i>								
Effort total kg				735	1340	1840	2140	2650
Fatigue mesurée:								
Aile rivée	(1)	kg/cm ²		400	682	1060	1220	1540
Aile libre	(2)	kg/cm ²		216	338	482	518	680



Pour les croisillons, on arrivera difficilement à une répartition parfaite du travail entre les ailes des cornières, car il n'y en a jamais qu'une pour transmettre et recevoir les efforts des membrures au droit des rivets de fixation, c'est l'aile rivée (1); on peut même admettre que, dans la section du rivet, l'aile libre (2) n'est soumise à aucun travail. Le long de la barre, par suite des déformations élastiques de l'aile rivée (allongement s'il y a traction, raccourcissement, s'il y a compression), l'aile libre participera évidemment à l'effort, mais les longueurs en jeu dans les pylônes ne permettent pas que son taux de travail atteigne la même importance que pour l'aile rivée. L'examen des valeurs relevées au cours des essais démontre que pour les fatigues moyennes, supérieures à 100 kg/cm², la répartition des efforts entre les deux ailes des cornières des croisillons se fait approximativement dans la proportion de 1 à 3, donc que la fatigue maximum de la matière, au milieu d'une barre, est d'environ 1,5 fois la fatigue moyenne. Au fur et à mesure que l'on se rapproche d'un point d'attache, la proportion va en augmentant jusqu'au moment où l'on peut admettre que l'une des ailes ne travaille plus du tout; la fatigue maximum serait alors le double de la fatigue moyenne, sans tenir compte, toutefois, de l'affaiblissement de la section par les trous de rivet. La répartition des fatigues dans les différentes parties d'une même section sera plus uniforme dès que les fatigues des fibres les plus sollicitées provoqueront des allongements permanents (limite d'étirage); cette limite ne doit, toutefois, jamais être dépassée par aucune partie des ouvrages.

La répartition inégale des fatigues a encore pour conséquence de provoquer une excentricité de l'effort résultant par rapport au centre de gravité de la section; la barre sera, de ce fait, soumise à un travail de flexion entraînant des fatigues supplémentaires qui seront, il est vrai, d'importance secondaire; cependant, pour les barres travaillant à la compression, l'excentricité de l'effort résultant peut, suivant les cas, présenter un certain danger en favorisant les déformations au flambage. On peut y parer, dans une certaine mesure, en adoptant un double croisillonnage, ou encore en choisissant pour les croisillons des profils symétriques, mieux appropriés que les cornières, tels que fers U, fers plats; remarquons toutefois que l'introduction de ces profils entraînera, en général, une augmentation de prix des ouvrages et pourra éventuellement conduire à d'autres ennuis.

Le projet des nouvelles prescriptions fédérales prévoit que l'on doit tenir compte de la diminution de la résistance des barres sollicitées au flambage par une force excentrique, c'est-à-dire, une force agissant en-dehors du centre de gravité de la section comprimée. Pour se faire une idée de l'influence de l'excentricité de la force, il suffit d'examiner les courbes de la fig. 9, traduisant les résultats d'essais

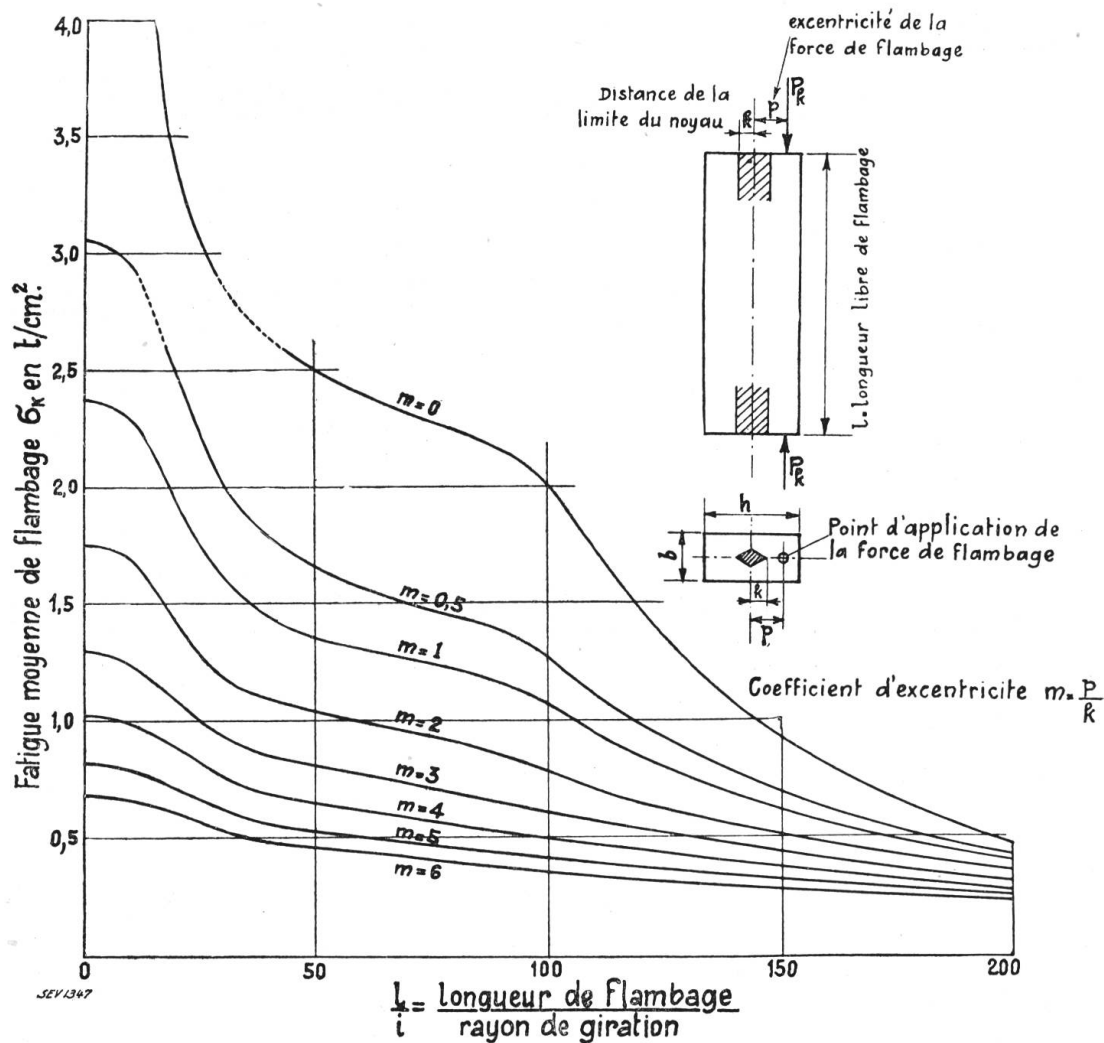


Fig. 9.

Courbes de la fatigue de flambage établies par la Commission technique de l'Association des constructeurs suisses de ponts et de charpentes métalliques, tirées du rapport du groupe VI de cette commission (Août 1926).

Charge excentrique.

Force de flambage $P_k = \sigma_k \cdot F$ Section rectangulaire.

très approfondis, faits sur ce sujet, par la Station fédérale d'essais des matériaux de l'Ecole Polytechnique à Zurich, avec le concours de l'Association des constructeurs suisses de ponts et de charpentes métalliques. Ces courbes donnent directement la fatigue admissible au flambage pour différents facteurs d'excentricité m , en fonction du rapport bien connu $\frac{l}{i}$, où l désigne la longueur libre de flambage de la barre considérée et i le rayon de giration de la section, pour un axe de référence perpendiculaire au plan dans lequel le flambage se produit. Le coefficient d'excentricité $m = \frac{p}{k}$ est défini comme le rapport de l'excentricité p , mesurée entre le point d'application de la force et le centre de gravité de la section, à la distance k du bord du noyau de la section à ce même centre de gravité, dans le plan d'action

de la force. $m = 0$ correspond au cas d'une charge centrée c'est-à-dire d'une charge agissant au centre de gravité de la section comprimée.

On reconnaît, par l'allure des courbes de la figure 9, que l'excentricité a son maximum d'influence sur la résistance au flambage, pour les barres dont le rapport $\frac{l}{i}$ varie de 30 à 90 environ qui sont précisément les valeurs les plus utilisées. Si le facteur m augmente de 0 à 1, l'aptitude d'une barre à résister au flambage diminue approximativement de 40 à 50 %.

Nous voyons donc par ces quelques réflexions que les calculs, comme on les fait en pratique, sont loin de tenir compte de tous les phénomènes accessoires qui peuvent se présenter et c'est alors le rôle du coefficient de sécurité de majorer les résultats, de manière à se placer dans des conditions permettant d'éviter tout danger avec une quasi certitude. Le choix du coefficient de sécurité n'est donc pas une simple affaire de sentiment, comme on le croit trop souvent, mais peut fort bien être basé sur des raisons découlant directement de la logique.

Pour les membrures, le danger de cette mauvaise répartition des fatigues est en général plus réduit, par suite des plus grandes longueurs en jeu et de la manière plus favorable dont les efforts y sont appliqués; les croisillons des faces adjacentes sont en effet fixés alternativement sur une aile et sur l'autre de la cornière, et les forces extérieures agissent aussi d'une façon plus rationnelle. En fait, la divergence observée au cours des essais entre les fatigues des ailes des membrures est moindre que pour les croisillons, ces fatigues diffèrent au plus dans la proportion de 1 à 2, c'est-à-dire que la fatigue maximum atteint environ 1,3 fois la fatigue moyenne.

Les membrures seront aussi soumises à des efforts d'ordre secondaire. On cherche en général, dans les constructions métalliques, à ce que les lignes des centres de gravité des barres convergeant vers un nœud donné, se coupent en un seul point. Ceci est facilement réalisable lorsqu'on assemble les barres à l'aide de goussets. Pour les pylônes ce n'est généralement pas le cas et lorsque les croisillons sont fixés séparément par un rivet, sur les membrures, on peut facilement se trouver dans les conditions représentées sur la fig. 10, où la résultante des efforts dans les diagonales accuse une excentricité par rapport à l'axe de la membrure. Ceci provoque un travail à la flexion qui peut présenter, au point de vue du flambage, les mêmes inconvénients que ceux signalés plus haut. On peut y parer, dans une certaine mesure, en fixant deux croisillons consécutifs à l'aide d'un rivet commun. Dès qu'il s'agit de constructions d'une certaine importance, l'emploi de goussets est toujours à recommander, malgré l'augmentation de prix qui en résulte.

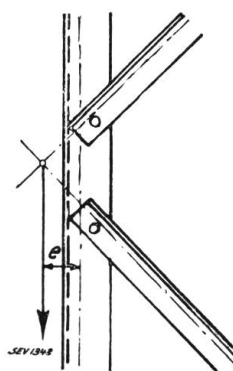


Fig. 10.

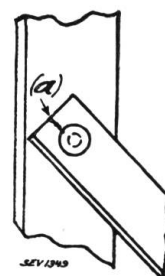


Fig. 11.

Les essais d'Ostermundigen ont dû être interrompus par suite de la rupture du pylône, et, à la grande surprise des assistants, par la rupture à son point d'attache, d'un *croisillon travaillant à la traction*. Au moment de l'accident, l'effort dans la barre incriminée n'était que de 0,6 fois la charge pour laquelle elle était calculée. L'examen de la cassure a permis de constater une légère fissure du métal (a sur la fig. 11) qui est fort probablement l'origine de la rupture. Ceci nous amène à attirer l'attention des constructeurs sur le danger que peuvent occasionner les procédés ordinaires d'usinage, le cisailage des fers et le poinçonnage des trous de rivet, particulièrement lorsque les outils accusent déjà une certaine usure. Ces procédés sont assez brutaux pour la matière qui peut, de ce fait, subir des altérations dans sa structure ou se fissurer dans la région travaillée. On peut donc se demander si ces méthodes de fabrication ne devraient pas être interdites par les cahiers des charges.

Ceci montre l'importance qu'il faut attribuer à l'assemblage des éléments d'une construction et le soin qu'il y a lieu d'apporter à ce travail, surtout pour les pylônes, où l'on évite généralement l'usage des goussets. Cette mesure est admissible dans les cas ordinaires, mais il pourrait être avantageux, pour les éléments particulièrement sollicités, de revenir sur cette suppression, de manière à assembler chaque barre à l'aide de deux rivets, ce qui augmenterait la sécurité dans une proportion très notable. Pour les barres travaillant à la compression, le gousset présenterait en outre l'avantage d'assurer un certain „encastrement“ qui améliorerait sensiblement les conditions du calcul au flambage.

Pour des raisons analogues, il faudra prendre garde, dans la construction des pylônes par soudure électrique, que les points de soudure soient suffisamment étendus, faute de quoi ce procédé pourrait conduire à des mécomptes.

V. Conclusions.

De notre exposé, à la fois théorique et pratique, il se dégage un certain nombre de principes qui nous permettent d'envisager maintenant la construction rationnelle des pylônes au point de vue de la torsion. Tout d'abord, il faut rendre rigide, par un procédé quelconque (entretoisement ou cadre de renforcement), les sections où agissent les moments de torsion, c'est-à-dire les cadres de fixation des consoles sur les fûts des pylônes, et ceci pour les deux raisons principales suivantes :

la rigidité de la section des consoles assure une répartition à peu près uniforme des efforts de torsion sur les quatre faces du pylône ;

cette rigidité nous place dans des conditions où le calcul des éléments du pylône peut se faire de façon satisfaisante.

Le calcul est en effet impuissant à résoudre, d'une manière simple, la répartition exacte des efforts de torsion dans une construction avec cadre de console non renforcé (fig. 1). Pour soumettre ce cas au calcul, nous avons été obligés de considérer les sommets du cadre comme des points articulés, ce qui nous éloigne notablement de la réalité pour les pylônes ayant une certaine rigidité propre. Le calcul par les formules 1 du chapitre I, comparé aux résultats de l'essai No. 3 du chapitre III, aurait conduit à surdimensionner, dans une assez grande proportion, certains éléments du pylône, notamment les membrures. Or, cette difficulté peut être résolue par la simple adjonction d'un renforcement du cadre de la console, ce qui n'est ni coûteux ni compliqué, et nous savons que nous nous trouverons ainsi dans des conditions où le calcul repose sur des bases sûres. On adoptera alors les formules 4 du chapitre I, qui sont d'ailleurs les mêmes que celles recommandées par les prescriptions allemandes⁶⁾.

Nous admettons que ce renforcement doit se faire au droit de chaque console, et non seulement à l'une d'entre elles, comme le préconisent certains auteurs. Même plus, nous sommes d'avis qu'il est également utile de renforcer par un cadre horizontal quelques sections du fût entre la console inférieure, qui se trouve couramment à 15 ou 20 m au-dessus du sol, et la base ; certains constructeurs conseillent même de ne pas dépasser une hauteur de 6 à 8 m entre deux cadres successifs. Cette mesure n'est pas strictement indispensable, mais nous croyons qu'elle est cependant à conseiller pour les pylônes d'angle, ou les pylônes d'amarrage en général, qui sont sujets aux moments de torsion les plus importants.

Si l'on admet la rigidité transversale du fût, les membrures n'ont plus à satisfaire à aucune condition particulière ; les croisillons, comme nous l'avons démontré, devront au contraire être l'objet d'une étude très soignée. Ce sont eux, en effet, qui supporteront tous les efforts de torsion, d'où renforcement général des sections par rapport aux conditions ordinaires des calculs. Les croisillons prendront, au point de vue poids, une importance plus grande que de coutume, surtout si l'on tient compte de l'excentricité de la charge des barres sollicitées à la compression ; le problème devra donc être examiné au double point de vue économique et mécanique.

⁶⁾ Voir Elektrotechnische Zeitschrift (ETZ) No. 11 du 17 mars 1927, page 375 et No. 12 du 21 mars 1929, page 441.

Pour les grands pylônes, les longueurs de flambage seront telles, que l'on aura très souvent avantage à adopter des croisillons doubles plutôt que simples ou toute autre disposition appropriée. L'effort dans la barre détermine le diamètre du rivet, calculé au cisaillement, et l'on pourra éventuellement être conduit à d'assez gros diamètres pour de petits profils; il ne faut pas oublier alors que dans le calcul à la traction intervient la section réelle diminuée du trou du rivet. Il sera quelquefois possible de parer à cet inconvénient en adoptant des cornières à ailes inégales.

Quelquefois, l'usage de goussets s'imposera de lui-même, de manière à répartir les efforts sur deux rivets au moins. Dans tous les cas, cette mesure contribuera toujours à augmenter très notablement la sécurité des ouvrages.

Le travail des pylônes à la torsion correspond à des conditions exceptionnelles; il est donc raisonnable d'adopter, pour les calculs, un coefficient de sécurité inférieur à la normale. Les prescriptions suisses en projet envisagent un taux de travail admissible à la traction correspondant à un coefficient de sécurité de 2,25 environ; il nous paraît que c'est là l'extrême limite à admettre, car il s'agit non seulement de se prémunir contre les efforts secondaires dont nous avons déjà fait état, mais encore de se couvrir contre les irrégularités de résistance de la matière, dont la fabrication n'est malheureusement pas parfaite.

Un certain nombre d'exploitants se sont déjà demandés s'il était nécessaire de renforcer les pylônes prévus pour six fils sur lesquels on n'en monte que trois. En général, nous ne croyons pas que cela soit très utile, car le phénomène de la torsion est plus ou moins lié à la rupture d'un conducteur; les efforts en jeu sont alors indépendants du nombre des conducteurs. Il n'en est pas de même si l'on considère le déséquilibre des portées successives ou des irrégularités de surcharge de neige; il s'agit alors de cas d'espèce au sujet desquels il n'est plus possible d'émettre des règles générales; le problème se pose d'ailleurs aussi bien pour le cas de 6 fils que pour celui de 3; la solution à apporter à l'un des cas sera également celle à admettre pour l'autre.

Signalons encore ici les effets de torsion dont les entrepreneurs ont à se préoccuper pendant le montage des conducteurs. C'est un point auquel on ne consacre pas, d'ordinaire, une attention suffisante. Mais aussi pourquoi les entrepreneurs s'obstinent-ils à suspendre leurs poulies aux consoles, au lieu de les fixer contre le fût du pylône? Ces poulies sont très souvent en bois et fixées à l'extrémité d'une chaîne ou d'une barre, de manière à placer le conducteur dans le voisinage de sa position définitive; leur roulement est défectueux, ce qui occasionne des balancements des conducteurs et soumet le pylône à des secousses et à des efforts de torsion qui pourraient éventuellement lui être préjudiciables. Ces inconvénients seraient facilement évités en utilisant des poulies métalliques, éventuellement en aluminium, qu'il est facile de graisser et de maintenir en bon état; ces poulies seraient fixées à l'une des membrures du fût, c'est-à-dire, à l'une des parties les plus résistantes du pylône, en supprimant presque complètement tous les efforts de torsion. Il y a encore des précautions particulières à prendre au moment de l'amarrage des conducteurs aux pylônes d'arrêt ou aux pylônes d'angle; l'ordre dans lequel les conducteurs seront fixés doit être choisi de telle sorte que l'on prenne alternativement les conducteurs de part et d'autre du fût; un haubanage provisoire de l'ouvrage sera éventuellement nécessaire.

Un bon nombre de constructeurs et d'exploitants ont considéré jusqu'ici que la torsion des pylônes était un phénomène extrêmement complexe, dont on ne pouvait envisager l'étude sans risquer de faillir à la tâche. Nous espérons que notre modeste exposé contribuera à effacer ces craintes, tout au moins en ce qui concerne l'ensemble du problème. Le sujet se trouve cependant bien loin d'être épuisé et nous serions très heureux si cet article pouvait provoquer la publication d'idées nouvelles dans ce domaine encore trop peu connu.