Les vérifications essentielles dans le calcul des tours de réfrigération à tirage naturel et l'importance de la conception dans leur sécurité

Autor(en): **Faessel, P.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH Kongressbericht**

Band (Jahr): **9 (1972)**

PDF erstellt am: **24.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-9630

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Les vérifications essentielles dans le calcul des tours de réfrigération à tirage naturel et l'importance de la conception dans leur sécurité

Die wichtigsten Ergebnisse in der Berechnung in Naturzug-Kühltürmen und die Wichtigkeit des Sicherheitsentwurfes

The Essential Verifications in the Analysis of Cooling Towers with Natural Draught and the Importance of the Safety Concept

P. FAESSEL
Constructions Edmond Coigmet
Paris, France

Les tours à tirage naturel sont de gigantesques voiles minces de révolution , libres à leur sommet , et reposant à leur base sur le sol de fondation par l'intermédiaire d'un réseau de poteaux croisés . Leurs dimensions ne cessent de croître avec la puissance des centrales électriques .

De nombreuses études ont été dernièrement publiées sur ces structures . Mais cette somme de recherches ne forme pas encore un ensemble cohérent . Soumis par ailleurs à des contraintes économiques , comment le projeteur peut-il être guidé dans la recherche de la solution optimale ?

Que penser des différentes méthodes de calcul ? Quelles vérifications essentielles effectuer sous les effets du vent ? Quelle est l'importance de la forme du méridien sur la résistance statique et sur la stabilité de forme ? Telles sont les questions auxquelles nous voulons essayer de répondre .

A - VERIFICATION DE L'EQUILIBRE STATIQUE .

Deux catégories d'efforts sont considérées dans une telle structure (fig. 1) :

- Les tensions de membrane N_x , $N_{x\theta}$, N_θ

- Les moments internes de la coque M_x , $M_{x\theta}$, M_θ

Ces efforts sont calculés en principe à partir de la théorie générale des coques de révolution , qui fait intervenir leur rigidité propre de flexion . Mais les dimensions et les proportions des tours , ainsi que leur finesse , sont telles que la prise en compte de cette rigidité de flexion n'a pratiquement aucune influence sur les valeurs des tensions de membrane . La théorie générale est donc utilisée essentiellement pour calculer les moments de flexion dans l'épaisseur de la coque .

En fait l'équilibre statique de ces tours est essentiellement un équilibre de membrane .

Ceci entraine des conséquences très importantes :

1 . Les tensions de membrane peuvent être calculées à partir de la théorie des membranes de révolution . Les déformations dûes à ces tensions peuvent en être déduites directement .

2 . Cet équilibre de membrane étant isostatique , les tensions ne peuvent donner lieu à aucune " adaptation " . Cela signifie que l'état limite ultime de cet équilibre est atteint dès qu'une des tensions est égale , en un seul point de la coque , à la valeur maximale que peut supporter le matériau .

Les vérifications essentielles à l'équilibre statique sont donc les suivantes :

- Dans la tour elle-même , sous l'action simultanée du vent extrême et du poids propre , la traction des aciers méridiens doit rester en tout point inférieure à leur limite élastique et la contrainte du béton tendu (supposé non fissuré) soit rester inférieure à sa résistance à la traction , de manière à éviter une fissuration horizontale généralisée sur une grande surface , qui amplifierait considérablement les déformations (cette dernière condition peut être déterminante pour définir les épaisseurs dans la partie inférieure de la coque) .

- Au niveau des fondations , aucune traction ne pouvant exister entre la semelle et le sol , les compressions dûes au poids propre doivent être en tout point supérieures aux tractions dûes au vent extrême . Ceci impose pour la tour et sa fondation un poids minimal , donc un volume minimal de béton (Cet état limite au niveau des fondations n'a aucun rapport avec ce qu'on appelle habituellement la stabilité au renversement d'une structure rigide . En particulier , la notion de noyau central de la fondation n'a aucun sens ici) .

De plus , pour pouvoir résister aux composantes radiales des efforts de soulèvement , la semelle doit obligatoirement constituer un anneau circulaire continu, buté latéralement sur le terrain par l'une au moins de ses faces .

3 . Toutes ces vérifications doivent évidemment être faites à partir des tensions de membrane N_x correctement calculées , ce qui signifie en particulier , la prise en compte de la forme exacte du méridien . On sait,par exemple , que l'assimilation d'un cône toroïde à un hyperboloïde fait considérablement sous-estimer les tractions méridiennes dans les zones inférieures et au niveau des fondations (fig. 2)

On peut montrer en effet que la courbure du méridien et la loi de variation de cette courbure le long du méridien jouent un rôle essentiel dans l'équilibre de membrane (1) .

Ceci s'explique simplement par le fait qu'en chaque point , une part de la pression du vent est équilibrée directement par la composante normale des tensions méridiennes $\frac{N_x}{R_x}$; tout se passe donc comme si la tour était soumise à des efforts du vent réduits , égaux à chaque niveau à $p - \frac{N_x}{R_x}$.

Ce terme minorateur des efforts $\frac{N_x}{R_x}$ n'est efficace qu'à partir du niveau où N_x a atteint des valeurs non négligeables. La courbure du méridien n'est donc pas utile au sommet de la tour . Les cônes toroïdes sont donc une mauvaise solution puisqu'ils localisent une forte courbure dans une zone restreinte près du sommet.La courbure du

méridien n'est pas utile non plus à la base de la tour ; car les forces qui y agissent ont alors un bras de levier trop faible par rapport à la base . Il existe donc des formes optimales qui peuvent amener des réductions considérables des efforts et donc augmenter à coût égal , la sécurité .

B - VERIFICATION DE LA STABILITE DE FORME .

Si la rigidité de membrane est suffisante pour justifier un équilibre statique, il n'en est pas de même de la stabilité de forme . Celle-ci requiert une rigidité de flexion de la coque .

En effet , la région de la tour supportant les surpressions du vent doit résister au cloquage sous l'action des compressions circulaires $N\theta$ dûes à ces surpressions .

Il est toujours nécessaire de faire le calcul de cette sécurité car elle varie considérablement avec les proportions et les formes des tours . On peut montrer en effet que dans les tours cylindriques , la pression critique est de la forme :

$$P_c = 0.4\, E \frac{e}{H}\frac{e}{R\theta}\sqrt{\frac{e}{R\theta}}$$

soit , avec les dimensions actuelles , environ 200 Kg/m2 . Cette valeur serait très insuffisante mais, dans les tours à double courbure , elle dépasse souvent 1000 Kg/m2 . Il est donc clair que la courbure du méridien joue un rôle considérable , en particulier en diminuant les déformations radiales .

Si le calcul est fait avec les hypothèses classiques d'un matériau homogène élastique , la sécurité des tours apparait en général considérable (encore faut-il tenir compte de la souplesse du sol et des poteaux supportant la coque)

Mais l'analyse de ce calcul montre que cette sécurité est liée à l'énergie de déformation de flexion circulaire $(M\theta)$ de la coque : une chute de la rigidité de flexion entrainerait un abaissement brutal de la pression critique .

Donc , s'il est nécessaire de faire le calcul dans les hypothèses classiques dont on vient de parler , il faut aussi s'assurer que ces hypothèses sont effectivement réalisées , c'est à dire que les courbures d'ovalisation $\rho\theta$ sous le vent extrême ne produisent pas la fissuration de la coque en flexion .

En effet , la double nappe d'armatures circulaires souvent préconisée n'est qu'un remède illusoire contre une chute de rigidité de flexion ; même de forts pourcentages d'acier , bien supérieurs à ceux utilisés actuellement , ne peuvent éviter cette conséquence : les sections fissurées sont 5 à 10 fois moins rigides que les sections homogènes .

La seule solution correcte de cet important problème réside dans une conception d'ensemble de la structure , qui minore les contraintes de flexion .

L'importance de cette conception d'ensemble peut être comprise en analysant les points suivants :

1. Les déformations sont imposées par l'équilibre de membrane .

   La minoration des tensions , que nous avons étudiée plus haut, est donc un premier but à atteindre .

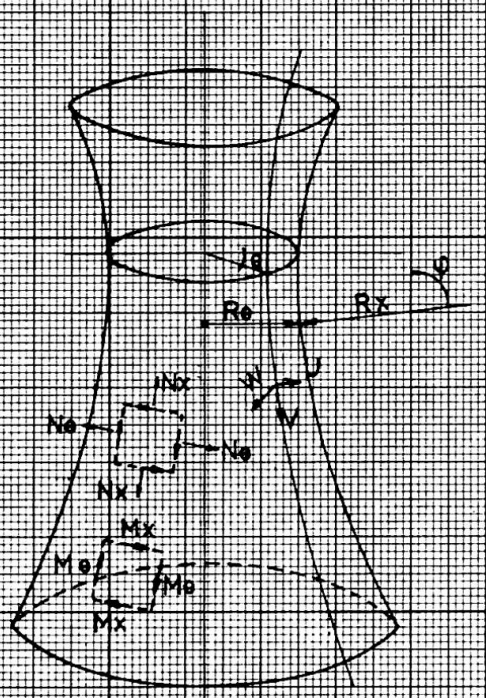

fig. 1

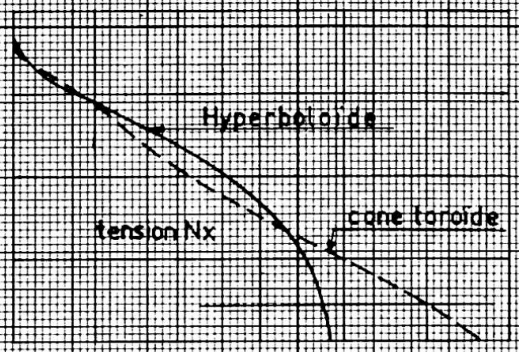

fig. 2

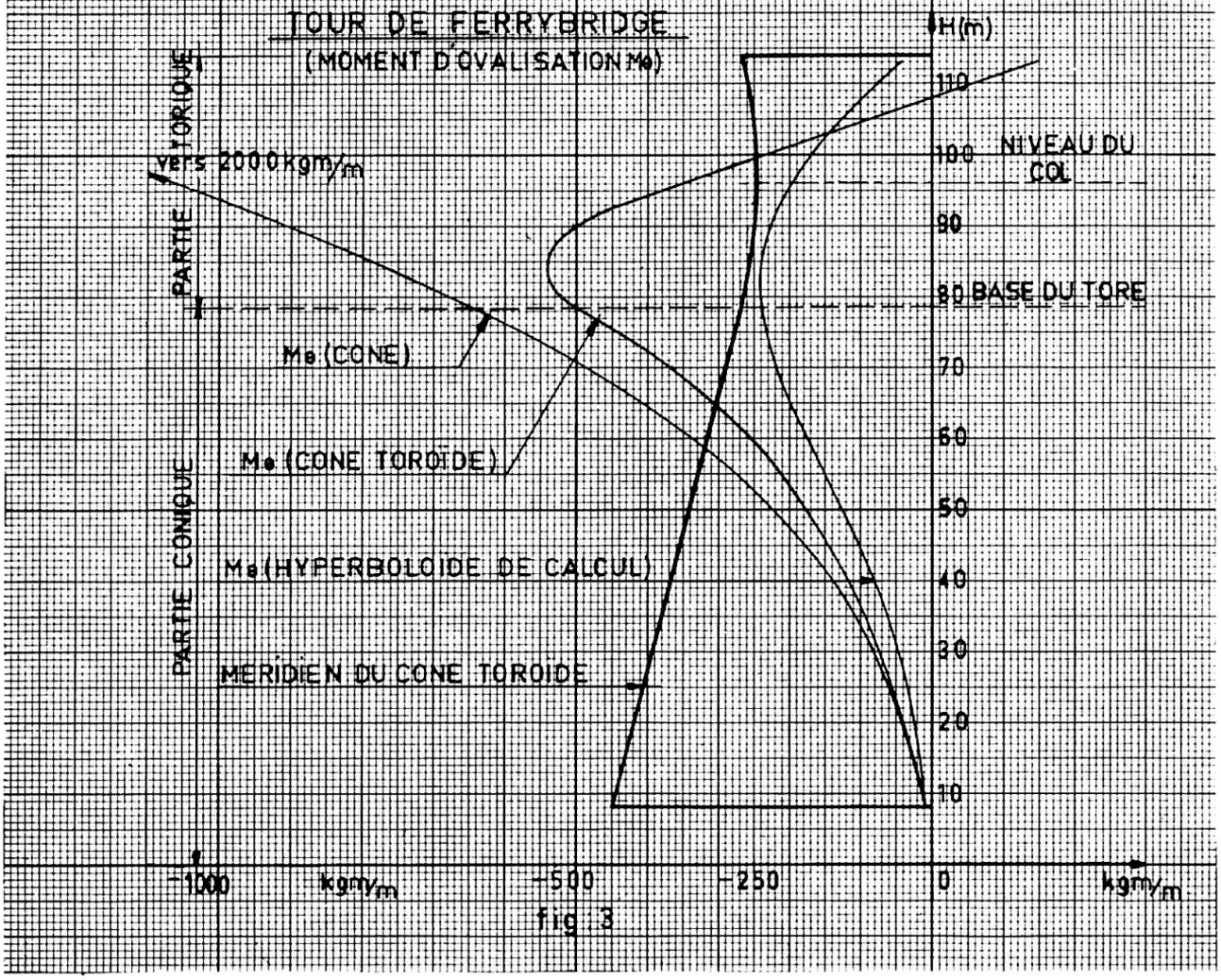

fig. 3

2. Ces déformations de membrane ε_x ; $\varepsilon_{x\theta}$; ε_θ sont inversement proportionnelles aux épaisseurs ; donc les déplacements u , v , w de chaque point de la coque , et par conséquent les courbures ρ_θ . Mais les contraintes de flexion d'ovalisation sont , elles , proportionnelles aux épaisseurs : ($\sigma_{F\theta} = \rho_\theta \cdot \frac{Ee}{2}$.) . Une augmentation générale de toutes les épaisseurs dans un même rapport ne peut donc diminuer les contraintes de flexion ; au contraire , la souplesse du sol et des poteaux restant les mêmes , cette façon de faire augmente les contraintes . Notons aussi que dans ce cas , les tassements différentiels (dûs à l'hétérogénéité du sol) augmentant proportionnellement aux épaisseurs , les contraintes correspondantes de flexion augmentent elles-mêmes proportionnellement aux carrés des épaisseurs .

3. La solution parfois proposée d'augmenter localement les épaisseurs aux niveaux où les moments d'ovalisation sont maximaux ne peut qu'augmenter les contraintes de flexion à ces niveaux (puisqu'elles sont proportionnelles à l'épaisseur locale)

   Pour les mêmes raisons , la création d'une ceinture extérieure au sommet des tours est une cause de fissuration de la partie supérieure de la coque .

4. Une première solution consiste donc à répartir judicieusement les épaisseurs , en particulier en affinant la partie haute de la tour , et en épaississant les niveaux inférieurs , où les tensions méridiennes sont très élevées .

5. La forme du méridien a une influence considérable sur la valeur maximale des déplacements normaux et des courbures de flexion ρ_θ dans la coque .

   On peut le comprendre aisément en calculant ces courbures avec quelques approximations permettant de mettre en évidence le rôle essentiel de la courbure du méridien .

   Nous avons les relations suivantes :

   Entre les tensions et les déformations :

$$\varepsilon_x = \frac{N_x - \nu N_\theta}{Ee} \qquad \varepsilon_{x\theta} = \frac{2(1+\nu) N_{x\theta}}{Ee} \qquad \varepsilon_\theta = \frac{N_\theta - \nu N_x}{Ee}$$

   Entre les déformations et les déplacements :

$$\varepsilon_x = \frac{dv}{dx} + \frac{W}{R_x} \qquad \varepsilon_{x\theta} = \frac{du}{dx} + \frac{dv}{ds} - \frac{u \cos\varphi}{R_\theta} \qquad \varepsilon_\theta = \frac{du}{ds} - \frac{W \sin\varphi}{R_\theta} - \frac{v \cos\varphi}{R_\theta}$$

   En faisant $\sin\varphi \cong 1$, $\cos\varphi \cong 0$, et en négligeant ε_θ et $\varepsilon_{x\theta}$ devant ε_x il vient :

$$\varepsilon_\theta = \frac{du}{R\,d\theta} - \frac{W}{R_\theta} = 0 \Longrightarrow W = \frac{du}{d\theta} \Longrightarrow \frac{dw}{dx} = \frac{d^2u}{dx\,d\theta}$$

$$\varepsilon_{\theta x} = \frac{du}{dx} + \frac{dv}{ds} = 0 \Longrightarrow \frac{d^2u}{dx\,d\theta} = -\frac{d^2v}{R_\theta\,d\theta^2} \Longrightarrow \frac{dw}{dx} = -\frac{d^2v}{R_\theta\,d\theta^2}$$

$$\Longrightarrow W = -\int_0^x \frac{1}{R_\theta}\,\frac{d^2v}{d\theta^2}\,dx$$

$$\varepsilon_x = \frac{dv}{dx} + \frac{W}{R_x} \Longrightarrow V = \int_0^x \left(\varepsilon_x - \frac{W}{R_x}\right) dx$$

soit , pour chaque terme de la série de cosinus de la pression du vent :

$$W_n = n^2 \cos n\theta \int_0^x \frac{1}{R_\theta}\,dx \int_0^x \left(\varepsilon_{xn} - \frac{W_n}{R_x}\right) dx$$

(avec origine à la base de la tour)

Les courbures de flexion ρ_θ sont obtenues à partir de w :

$$\rho_\theta \cong \frac{d^2w}{ds^2} + \frac{W}{R_\theta^2}$$

ou pour chaque terme de la série de Fourier :

$$\left|\rho_{\theta n}\right| = (n^2-1)\frac{W_n}{R_\theta^2} = n^2(n^2-1)\frac{\cos n\theta}{R_\theta^2}\int_0^x \frac{1}{R_\theta}\,dx \int_0^x \left(\varepsilon_{xn} - \frac{W_n}{R_x}\right) dx$$

On peut donc imaginer la détermination des déplacements w au moyen d'un calcul itératif depuis la base (où w est connu à partir de la souplesse des poteaux) jusqu'au sommet de la tour , l'intégrale double de $\left(\varepsilon_x - \frac{W}{R_x}\right)$ étant faite à chaque niveau avec les valeurs de w précédemment calculées .

Cette présentation des calculs permet de dégager des conclusions importantes :

a) Dans une tour troncônique , R_x étant infini , les valeurs de W et de M_θ croissent de plus en plus vite jusqu'au sommet .

b) Si dans les tours à double courbure , les moments d'ovalisation M_θ passent par un maximum dans la région du col , ce n'est pas parce que cette zone " attire " les moments , mais au contraire parce qu'elle stoppe leur croissance : le terme $\frac{w}{R_x}$ y est beaucoup plus grand que ε_x (qui lui-même diminue) .

c) Dans les cônes toroïdes , $\frac{w}{R_x}$ est nul sur toute la surface tronconique, et , jusqu'au tore , les moments M_θ ne cessent de croître de plus en plus vite , comme dans les tours troncôniques . Puis l'action inhibitrice de la courbure du méridien se fait sentir brutalement , mais trop tardivement alors que les courbures ρ_θ et les moments correspondants M_θ ont déjà atteint des valeurs très élevées .

Sur la figure 3 , où sont représentées les valeurs de M_θ dans 3 hypothèses - Tronc de cône , Cône toroïde , Hyperboloïde - on observe parfaitement le changement brutal de pente et de courbure du diagramme des M_θ au niveau du tore (pour le cas du cône toroïde)

Ainsi , un raisonnement analogue à celui que nous avons fait pour les tensions de membrane , montre que le terme minorateur des déformations méridiennes ε_x ,soit $\frac{w}{R_x}$, n'est efficace qu'à partir du niveau où w atteint des valeurs non négligeables

La courbure du méridien n'est donc pas utile à la base de la tour . Mais elle ne l'est pas non plus au sommet si les déplacements w ont pris des valeurs déjà trop grandes . Il existe donc ici aussi des formes optimales .

Il est certain que la sécurité vis à vis de la stabilité de forme dépend de l'absence de fissuration généralisée sous le vent extrême .

Or , comme on le voit sur la figure , les moments dans le cône-toroïde sont plus du double de ceux d'un hyperboloïde de mêmes dimensions . Ils créaient , le 1er novembre 1965 , des contraintes de 20 Kg/ cm2 environ dans la région du col . Donc , même si les tours de Ferrybridge avaient été calculées et armées correctement , elles auraient présenté un danger de cloquage sous des vents extrêmes .

C - CONCLUSION .

Il est important de noter que , dans de telles structures , la solution la plus sûre n'est pas nécessairement celle qui correspond à l'emploi de la plus grande quantité de matière . La sécurité maximale se trouve ici dans un choix judicieux des formes et un balancement des épaisseurs .

On a dit quelquefois qu'avec le béton armé , l'architecture était morte,parce que tout était possible . On voit que ces tours , au contraire , nous confrontent avec de tels problèmes que nous sommes contraints d'utiliser notre matériau avec une certaine ruse , comme nos prédécesseurs durent le faire pour la pierre .

BIBLIOGRAPHIE .

(1) - P. FAESSEL : Le calcul des réfrigérants à tirage naturel (Annales de l'I.T.B.T.P. Paris Avril 1971)

(2) - Natural draught cooling towers - Ferrybridge and after (The Institution of Civil Engineers London 1967)

RÉSUMÉ.

Les tours de réfrigération sont des coques dans lesquelles l'équilibre de membrane est fondamental , mais aussi dont la rigidité de flexion interne doit être suffisante pour assurer la stabilité de forme . Cependant , il faut que les déformations restent faibles et que la coque soit choisie la plus fine possible si l'on ne veut pas que cette rigidité de flexion soit brisée par une fissuration généralisée dans les déformations imposées par l'équilibre de membrane . La forme du méridien joue un rôle primordial dans la minimalisation des déformations sous le vent . Les cônes toroïdes , souvent utilisés jusqu'ici, doivent être éliminés de nos projets .