

Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 115 (1989)
Heft: 13

Artikel: Le dimensionnement des cheminées métalliques sur des bases modernes
Autor: Frangi, Tullio / Kotten, Henk van
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-76972>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 22.05.2025

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

Le dimensionnement des cheminées métalliques sur des bases modernes

Le CICIND (Comité international des cheminées industrielles) est un groupe d'experts du domaine des cheminées industrielles. En mai 1988, ce groupe a édité une norme pour les cheminées métalliques, fondée sur les dernières connaissances d'aérodynamique. Cette norme est présentée brièvement ici. Elle fait ressortir en particulier les aspects dynamiques, dont l'importance s'accroît avec la tendance actuelle de réaliser des constructions élancées.

Introduction

Un article décrivant une soixantaine de cheminées métalliques a été publié récemment [1]¹. Il montre clairement à quel point le dimensionnement et la construction de cheminées exigent de l'ingénieur des connaissances et une expérience approfondies. Parmi les cheminées examinées, un nombre

PAR TULLIO FRANGI,
WINTERTHOUR,
ET HENK VAN KOTEN,
ZOETERMEER, PAYS-BAS

exagéré présentaient des dommages exigeant une réparation ou même le remplacement de l'ensemble de la construction. L'origine de ces défauts était souvent une mauvaise évaluation des effets dynamiques. Alors que, dans la plupart des cas, le vent peut être considéré comme un élément essentiellement statique, le dimensionnement de constructions sujettes à oscillations – c'est le cas des cheminées – nécessite une analyse précise des propriétés dynamiques des charges et de la construction elle-même.

Une connaissance approfondie de l'ensemble des forces statiques et dynamiques agissant sur la cheminée est la condition de réussite d'une construction. De nombreuses données, concernant les effets dynamiques du vent, tels que l'effet des rafales, du détachement de tourbillons et l'influence des amortisseurs et ailettes hélicoïdales, ont été récemment établies. Ces données ont été intégrées dans des normes modernes, telle la norme du CICIND. Le présent article décrit brièvement cette norme pour les cheminées métalliques [2], parue en mai 1988, tout en mettant l'accent sur les problèmes de dynamique.

Principes de construction

Le modèle de dimensionnement choisi décrira la situation réelle avec autant de précision que possible. Ce modèle devra être suffisamment

fiable, simple et précis. Il est toutefois rare qu'un modèle puisse satisfaire simultanément les conditions de simplicité et de précision. Il en résulte souvent un compromis optimal entre les conditions de fiabilité, de simplicité et de précision.

Alors que les expressions «suffisamment précis» et «suffisamment simple» se réfèrent à un objet, la condition «suffisamment fiable» est de nature rationnelle. Le CICIND interprète la notion de «suffisamment fiable» du point de vue des conséquences économiques de la défaillance d'une construction. Il est évident que les conditions de portance doivent aussi être satisfaites. On tiendra compte des considérations suivantes.

L'expérience montre que les cheminées métalliques ont une durée d'utilisation maximale de vingt ans. On admet que, pendant cette période, les frais d'entretien ou de remplacement éventuel représentent dix fois le coût initial de construction de la cheminée (perte de production due à l'arrêt de la cheminée et renchérissement compris). Selon la norme du CICIND, les facteurs de sécurité sont définis de manière à limiter la probabilité de défaillance, pendant les vingt années d'utilisation, à un niveau suffisamment faible, compte tenu de considérations économiques.

Principes du dimensionnement et facteurs de sécurité

Contraintes permanentes et charges dans la direction du vent

Il s'agit ici de vérifier que l'ensemble de la construction ainsi que les différents éléments présentent une résistance suffisante. Les contraintes d'utilisation doivent être augmentées par des facteurs de sécurité partiels (facteurs de charges) et les tensions sont à calculer selon la théorie de l'élasticité. La vérification se fait par comparaison aux limites d'élasticité ou aux contraintes de voilement critiques, qui sont à diviser par un facteur de résistance.

Le facteur de sécurité total se compose des facteurs de sécurité partiels suivants :

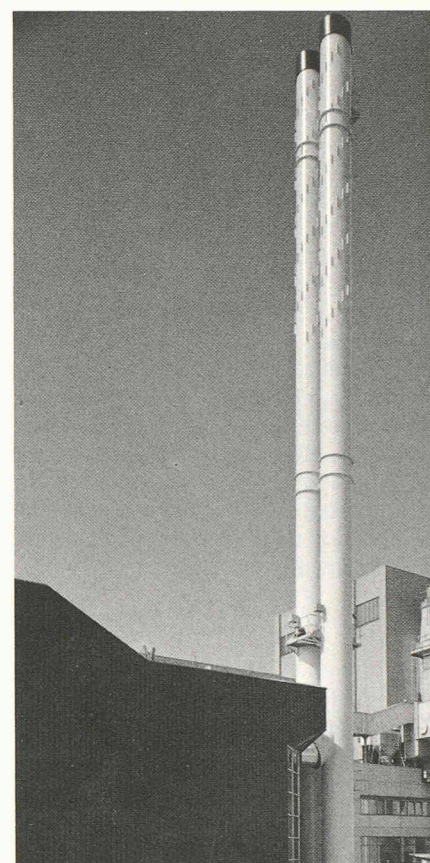


Fig. 1. – Cheminées métalliques de l'installation de chauffage à distance de Winterthour.

- Facteur de résistance (pour le matériel)	1,10
- Facteurs de charge	
charges permanentes :	
cheminée sans haubannage	1,10
cheminée avec haubannage	1,35
forces du vent :	
région modérée	1,50
région sujette à tempêtes tropicales	1,60

Sollicitations transversales à la direction du vent

Dans ce cas, on prendra surtout en considération la sensibilité des cheminées aux oscillations. Les cheminées seront conçues de manière que les amplitudes des oscillations transversales à la direction du vent restent faibles; d'une part pour éviter une défaillance par fatigue du matériel et, d'autre part, pour éviter que des observateurs ne soient alarmés inutilement par les mouvements de la cheminée.

- Facteur de résistance	1,10
- Facteur de charge	1,10

Charge due au vent

La charge due au vent entraîne trois effets principaux sur la cheminée :

- une charge dynamique dans la direction du vent
- des oscillations transversales à la direction du vent
- une ovalisation de la section circulaire (ovalling).

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

Charge dans la direction du vent

La connaissance des mécanismes d'action du vent s'améliore constamment grâce à des recherches effectuées dans le monde entier. Les hypothèses de la norme du CICIND reposent sur ces nouvelles connaissances d'aérodynamique. Une de ses caractéristiques est que les charges dues au vent sont fonction aussi bien des propriétés du vent que de celles de la construction elle-même.

La grandeur de départ pour le calcul de la charge due au vent est sa vitesse v_b . La valeur de v_b est la vitesse moyenne du vent, observée pendant 1 heure durant 50 ans, à 10 m du sol.

La vitesse du vent servant au dimensionnement de la cheminée est donnée par la formule

$$v(z) = v_b \cdot k_t \cdot k_i \text{ [m/s]}$$

où :

- z : hauteur au-dessus du sol [m]
- k_t : facteur tenant compte de la topographie
- k_i : facteur d'interférence tenant compte de l'influence des objets à proximité

La pression du vent servant au calcul se calcule comme suit :

$$w(z) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v(z)^2 \cdot C_D \cdot d(z) \cdot G \text{ [N/m]}$$

où :

- ρ : densité de l'air à h_1 m de hauteur $\rho = 1,25 - h_1/8000$ [kg/m³]
- C_D : facteur de forme (fonction du nombre de Reynolds)
- d : diamètre extérieur de la cheminée [m]
- G : coefficient de rafale.

Le coefficient de rafales permet de définir les propriétés dynamiques de la cheminée. Il est principalement fonction de la hauteur, de la fréquence propre et du coefficient d'amortissement propre de la cheminée ainsi que de son amortissement aérodynamique.

La charge due au vent dans sa direction ne provoque pas d'oscillations durables, comme c'est le cas dans la direction transversale au vent. Les turbulences peuvent toutefois produire des oscillations, mais leur nombre reste relativement faible par rapport à la durée de vie de la cheminée. Une vérification de la résistance à la fatigue due à la charge dans la direction du vent n'est donc pas exigée.

Oscillations transversales à la direction du vent

La magnitude des oscillations dues au vent (provoquée par des détachements de tourbillons) est fonction, entre autres, de l'amortissement de la construction. Sur la base de nombreuses mesures, il a été possible d'établir une relation empirique entre le déplacement maximal du sommet de la cheminée dans les limites de sécurité et deux

grandeurs sans dimension, nommées Re (Reynolds) et Sc (Scruton) :

$$Re = \frac{v \cdot d}{\mu} = 69000 \cdot v \cdot d,$$

$$Sc = 4 \cdot \pi \cdot \frac{m_o \cdot D}{\rho \cdot d^2},$$

où :

- v : vitesse du vent au sommet de la cheminée [m/s]
- d : diamètre moyen du tiers supérieur de la cheminée [m]
- μ : viscosité cinématique de l'air [m²/s]
- m_o : masse par mètre de la partie oscillante de la cheminée [kg/m]

$$m_o = \frac{\int m(z) \cdot u(z)^2 \cdot dz}{\int u(z)^2 \cdot dz}$$

où :

- $m(z)$: masse par m à la hauteur z [kg/m]
- $u(z)$: taux de variation de forme à la hauteur z [m]
- D : taux d'amortissement (amortissement c divisé par l'amortissement critique c_{cr})

Le déplacement du sommet de la cheminée atteint son maximum à la résonance, autrement dit, lorsque la fréquence propre de la cheminée correspond à celle du détachement de tourbillons. Cet effet a lieu à la vitesse critique du vent, qui peut être déterminée par l'équation suivante :

$$v_{cr} = \frac{f \cdot d}{St}$$

où :

- f : fréquence propre de la cheminée [s⁻¹]
- d : diamètre extérieur dans la zone des tourbillons [m]
- St : nombre de Strouhal ($St \approx 0,2$ pour un cylindre de révolution)

Il ne se produit pas d'oscillations transversales sensibles lorsque v_{cr} atteint une valeur supérieure à 120% de la vitesse de calcul du vent au sommet de la cheminée.

Le rapport entre le déplacement du sommet de la cheminée et le diamètre (w/d) en fonction des nombres Re et Sc est illustré à la figure 2. Le calcul des courbes a été effectué selon la référence [4].

Les nombres de Reynolds et de Scruton pour les cheminées d'un diamètre sensiblement constant peuvent être obtenus par approximation à l'aide des trois grandeurs de la cheminée suivantes : le diamètre d [m], la hauteur h [m] et l'épaisseur de paroi équivalente t_m [m]. Pour les cheminées métalliques, on a :

$$v = f \cdot d / St = v_{cr}$$

$$f = 1028 \cdot d / h^2$$

$$m_o = \pi \cdot d \cdot t_m \cdot 7800 \text{ [kg/m]}$$

$$D = 0,005$$

$$t_m = \text{épaisseur de la paroi métallique équivalente, possédant la même}$$

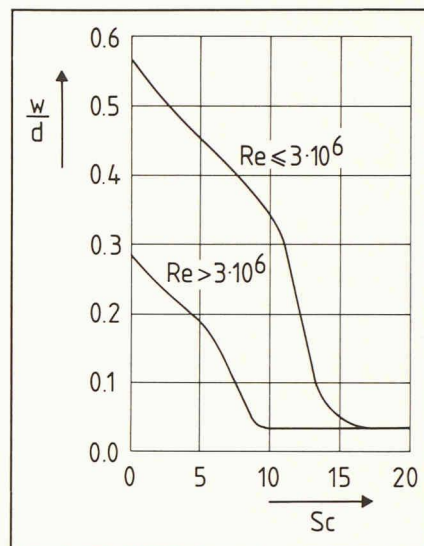


Fig. 2. – Comparaison entre
– le rapport du déplacement du sommet dû à la flexion provoquée par la poussée du vent
– le nombre de Scruton
et le nombre de Reynolds en paramètre.

masse que la paroi effective avec revêtement [m].

$$Re \approx 3,5 \cdot 10^8 \cdot \frac{d^3}{h^2}$$

$$Sc \approx 1200 \cdot \frac{t_m}{d}$$

Comme le montre la figure 2, le déplacement du sommet de la cheminée reste inférieur à 5% du diamètre de la cheminée si le nombre de Scruton est supérieur à 10. C'est le cas pour des épaisseurs de paroi équivalentes t_m supérieures à 1% du diamètre de la cheminée. Toutefois, des épaisseurs de paroi de cet ordre de grandeur sont souvent peu économiques. Dans de tels cas, on utilisera des dispositifs aérodynamiques tels que des ailettes hélicoïdales ou des amortisseurs.

La cheminée ne subit que très peu d'oscillations provoquées par des rafales dans la direction du vent. En revanche, des oscillations permanentes sont possibles dans la direction transversale au vent. Aussi une vérification de la résistance à la fatigue est-elle nécessaire ici.

Oscillations de déformation de la section (ovalisation)

Une répartition non uniforme de la pression du vent sur la circonférence de la cheminée a pour effet une ovalisation de sa section circulaire. Il en résulte des tensions de flexion dans les sections verticales.

La valeur maximale du moment fléchissant peut être calculé à l'aide de la formule suivante :

$$M_{max} = 0,09 \cdot w_s(z) \cdot d(z) \text{ [N} \cdot \text{m/m]}$$

où :

$w_s(z)$: pression moyenne du vent à la hauteur z pendant 5 secondes

$$w_s(z) \approx 1,25 \cdot v_b^2 \cdot (z/10)^{0,28} \text{ [N/m}^2\text{]}$$

Aux vitesses critiques du vent, la section peut en outre être soumise à une contrainte dynamique due aux détachements de tourbillons (vibrations). Cet effet survient lorsque la fréquence de détachement des tourbillons correspond à la fréquence de résonance de la cheminée dans le plan du périmètre. La vitesse critique du vent est obtenue par la formule suivante :

$$v_{cr} = 6500 \cdot \frac{t}{d} \text{ [m/s]}$$

où :

t : épaisseur moyenne de la paroi du tiers supérieur de la cheminée [m]

d : diamètre de la cheminée [m]

Les vibrations dangereuses peuvent être supprimées à l'aide d'anneaux raidisseurs qui ont pour effet d'augmenter v_{cr} à une valeur supérieure à celle du vent sur le site.

Le programme informatique Chimney

Le comportement statique et dynamique des cheminées est influencé par un grand nombre de facteurs, tels qu'amortissement longitudinal et transversal, isolations et parois, anneaux raidisseurs, brides, ouvertures, etc.

Un projet efficace ne peut donc être réalisé qu'à l'aide d'un programme informatique. Le programme Chim-

ney [5], fondé sur le code CICIND [2], a été écrit dans ce but. Les calculs selon la norme DIN 4133 [3] peuvent être effectués moyennant quelques légères modifications des données d'entrée. Le programme Chimney - utilisé en mode projet - permet de déterminer les épaisseurs optimales des parois des différentes parties de la cheminée, relativement aux critères de tension, de fatigue et de stabilité. Du à la non-linéarité très marquée de certains mécanismes, le processus de calcul se fait de manière itérative. Ainsi, la fréquence de résonance est recalculée après chaque itération.

Le programme Chimney - utilisé en mode vérification - permet de calculer les charges et les limites relativement aux charges admissibles et aux instabilités de cheminées existantes.

Exemple

L'influence de mesures aérodynamiques est illustrée par un exemple simple.

On suppose une cheminée non isolée de 60,00 m de hauteur et de 1,60 m de circonférence. Sans dispositifs aérodynamiques, l'épaisseur de paroi exigée à l'extrémité inférieure de la cheminée est de 11 mm. La masse métallique nécessaire de la cheminée atteint 30 400 kg.

Si l'on installe des ailettes hélicoïdales sur le tiers supérieur de la cheminée, la résistance dans la direction du vent

Bibliographie

- [1] PRITCHARD, B. N. : « Steel Chimney Oscillations », *Engineering Structures*, 1984, Vol. 6, October.
- [2] CICIND : *Model Code for Steel Chimneys*, May 1988, Zurich.
- [3] DIN 4133 : *Schornsteine aus Stahl - Statische Berechnung und Ausführung*, August 1973.
- [4] VICKERY, B. J. ; DALY, A. : « Evaluation of Methods of the Across Wind Response of Chimneys », *CICIND-Report*, Vol. 2, 1986.
- [5] *Chimney, A Program to Design Steel Chimneys*, H. van Koten and G. K. Verboom, NL-2714 Zoetermeer.

sera augmentée au détriment de l'épaisseur de paroi à l'extrémité inférieure de la cheminée, qui atteint alors 13 mm. Dans la partie supérieure, en revanche, les épaisseurs peuvent être sensiblement diminuées de sorte que la cheminée ne nécessite plus qu'une masse métallique totale de 20 900 kg.

Adresses des auteurs :

Tullio Frangi, Dr ès sc. techn.
Geilinger SA
Grüzfeldstrasse 47
8401 Winterthur

Henk van Koten, ing. dipl.
Adviesbureau voor dynamisch belaste constructies
2° Stationsstraat 232
NL-2718 AC Zoetermeer

« Ces nouvelles cheminées, source d'ennuis pour les chaudières à condensation »

Améliorer le rendement

La crise du pétrole a eu pour effet d'intensifier la mise en place d'installations de chauffage à haut rendement. C'est ainsi qu'on a actualisé des systèmes « nouveaux », tels que les groupes

PAR MICHEL BOREL,
VERSOIX-GENÈVE

chaleur-force, les pompes à chaleur, les chaudières à condensation, pour ne citer que ceux-là.

Dans les installations de chauffage, une partie de la chaleur produite par la combustion va sortir directement par la cheminée. On appelle cela perte par

chaleur sensible ; elle abaisse le rendement annuel moyen d'une installation et implique une surconsommation de combustible bien inutile.

Le besoin d'améliorer cette situation s'est vite fait sentir et on a donc cherché des solutions pour abaisser la température des gaz de fumée à la sortie de la chaudière. La chaleur ainsi récupérée permet d'augmenter le rendement. On peut grosso modo estimer le gain en rendement annuel. Nous appellerons la température des gaz de fumée T_f .

Vieille chaudière,
jusqu'à ~ 1975
(sans condensation) :
 $T_f = 280^\circ\text{C}$ Rendement = 75 %

Chaudière actuelle
(sans condensation) :
 $T_f = 160^\circ\text{C}$ Rendement = 85 %

Chaudière actuelle
(avec condensation) :
 $T_f = 60^\circ\text{C}$ Rendement = 95 %

Les chiffres ci-dessus sont très relatifs car les valeurs de rendement sont également liées à d'autres améliorations, mais une importante part de l'amélioration est due à l'abaissement de la température des gaz de fumée. Le bond de 20 % obtenu permet d'économiser 20 % de combustible chaque année, si on remplace une vieille chaudière par une chaudière à condensation. D'où l'installation généralisée de chaudières à basse température des gaz de fumée, voire de chaudières à condensation.

Les chaudières à condensation fonctionnent de préférence avec le gaz naturel. Mais pour les grosses chaudières, l'interruptibilité est parfois requise lors d'hivers très froids de sorte qu'elles sont équipées de brûleurs bicom bustibles gaz/mazout.