

# Analyse de comportement d'ouvrages du génie civil en formes de cylindres placés en écoulement turbulent, mesures effectuées en soufflerie aérodynamique

Autor(en): **Hertig, Jacques-André**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **103 (1977)**

Heft 22

PDF erstellt am: **26.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-73269>

## **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.

## Analyse du comportement d'ouvrages du génie civil en forme de cylindres placés en écoulement turbulent, mesures effectuées en soufflerie aérodynamique

par JACQUES-ANDRÉ HERTIG, Lausanne

### Avant-propos

Les aménagements de production d'énergie comportent un certain nombre de structures de grandes dimensions, en particulier de grandes hauteurs, dont plusieurs sont généralement légères et, partant, sensibles au vent. Qu'il s'agisse de cheminées, de tours de réfrigération, de confinements nucléaires, de chaufferies, les forces d'origine aérodynamique sont importantes et peuvent parfois constituer un cas de charge déterminant.

Il est d'autant plus important de mieux connaître ces forces que

- ces structures deviennent de plus en plus grandes (par exemple cheminées de 200 à 300 m de hauteur, tours de réfrigération de 150 à 200 m de hauteur) ;
- la vitesse du vent croît lorsqu'on s'élève au-dessus du sol, et la pression dynamique de l'air encore davantage, puisqu'elle est proportionnelle au carré de la vitesse ;
- l'évolution technologique conduit à rechercher des structures de plus en plus légères par souci évident d'économie, et qu'elles sont donc plus sensibles aux charges horizontales.

A ces considérations s'ajoute la constatation que les constructions étudiées comportent souvent des surfaces courbes (cylindriques, sphériques ou autres), pour lesquelles les points de décollement de l'écoulement de l'air ne sont pas fixés comme ils le sont en général par les angles de construc-

tions usuelles ; les forces aérodynamiques sont ainsi plus difficiles à déterminer.

Pour toutes ces raisons l'Institut de production d'énergie (IPEN) du Département de génie civil de l'EPFL a été de longue date conduit à approfondir les problèmes posés par la détermination des charges dues au vent. Ces études ont été dès le début conduites par M. J.-A. Hertig, auteur du présent article. Elles ont porté aussi bien sur des questions générales à l'intention de l'enseignement, que sur des recherches de base, et d'autre part sur des problèmes particuliers.

Ces recherches ont remis en cause certains aspects de la similitude, ce qui n'est pas sans importance puisque tous les coefficients donnés dans les normes sont basés sur des essais sur modèles réduits, en soufflerie. M. Hertig a notamment mis en évidence le rôle joué par la turbulence, en sus de celui, déjà bien connu, du profil de vitesse du vent.

Le présent article expose les résultats d'études particulières, faites à la demande de la Société Alusuisse Engineering (ALES) et de l'Institut fédéral de recherches en matière de réacteurs (IFR, Institut annexe des EPF), dans le cadre de la collaboration germano-suisse en cours pour le développement d'un réacteur nucléaire à haute température refroidi à l'hélium, collaboration menée du côté Suisse par l'IFR, sous la conduite du professeur G. Sarlos.

Professeur D<sup>r</sup> ANDRÉ GARDEL,  
directeur de l'IPEN

### 1. Introduction

L'étude du comportement aérodynamique des grandes constructions du génie civil se fait encore actuellement essentiellement à l'aide d'essais en soufflerie aérodynamique. Par le passé, ces essais ont été effectués dans des souffleries destinées à l'aéronautique et fort mal adaptées à la création des conditions auxquelles sont soumis les bâtiments. En particulier, elles permettent difficilement de créer une couche limite turbulente en similitude avec la couche limite atmosphérique. De nombreuses installations ont vu le jour dernièrement en Europe en vue d'effectuer des essais permettant la détermination des effets du vent sur les bâtiments. Ces installations, dites souffleries à couche limite ou souffleries environnementales, permettront la prise en compte de la turbulence du vent d'une manière très satisfaisante.

Les essais relatés ici ont été effectués de 1971 à 1976 en vue de définir l'influence des conditions d'essais sur le comportement aérodynamique des modèles réduits de constructions du génie civil, en particulier l'influence de la turbulence de l'écoulement. En effet, il est notoire que les différences entre les caractéristiques des souffleries aérodynamiques ou les différences des conditions d'essais entraînent parfois des résultats sans lien apparent entre des essais effectués sur différents modèles réduits de même

type d'ouvrage. Ce fait est particulièrement marqué pour les ouvrages cylindriques tels que les tours de réfrigération ou les cheminées. Etant donné l'inexistence des souffleries environnementales en Suisse au début de l'étude, il a été nécessaire de recourir à des souffleries classiques (souffleries aéronautiques) en vue de cette détermination. Toutefois, des modifications sensibles ont été apportées à l'écoulement de manière à créer une turbulence approximativement semblable à celle du vent.

La démarche de l'étude fut la suivante :

- a) Etablissement par voie théorique de critères de similitude entre écoulements turbulents [1]<sup>1</sup>.
- b) Création d'écoulements en couche limite turbulente, en similitude au sens des critères établis précédemment. Ces écoulements ont été créés dans différentes souffleries aéronautiques.
- c) Analyse de l'influence de ces écoulements turbulents sur des ouvrages en forme de cylindres circulaires. Le choix de ce type de forme réside dans la grande sensibilité des cylindres aux petites variations de conditions expérimentales et au fait que les grands ouvrages du génie civil faisant actuellement l'objet d'étude et de

<sup>1</sup> Les chiffres entre crochets renvoient à la liste bibliographique en fin d'article.

développements nouveaux sont les grands réfrigérants de centrales thermiques ou nucléaires.

Le but de la présente communication est de présenter les résultats obtenus quant aux répartitions de pression autour de ces ouvrages.

## 2. Répartition des pressions autour de cylindres placés en écoulement laminaire

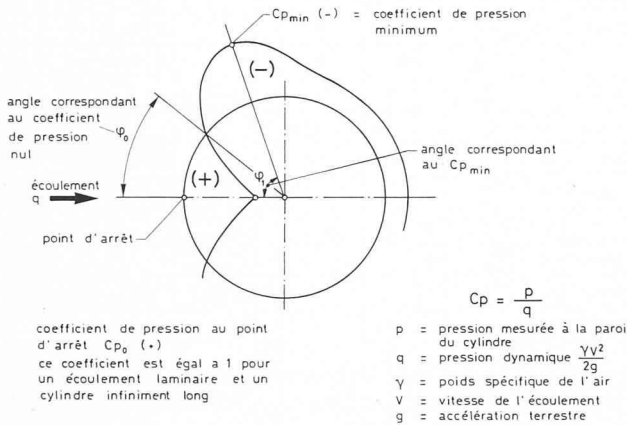


Fig. 1. — Définition des grandeurs caractéristiques de la répartition de pression autour d'un cylindre.

La répartition des pressions autour des ouvrages de forme cylindrique a l'allure présentée sur la figure 1. On définit quatre grandeurs significatives, à savoir :

- l'angle correspondant au coefficient de pression nul ( $\varphi_0$ ),
- la valeur du coefficient de pression minimum, correspondant à la dépression maximale ( $C_{p_{min}}$ ),
- l'angle correspondant au coefficient de pression minimum ( $\varphi_1$ ),
- le coefficient de pression uniforme dans la zone aval de l'écoulement.

Dans le cas d'un écoulement laminaire, la valeur du coefficient ( $C_{p_0}$ ) situé au point d'arrêt en amont de l'écou-

lement est toujours égale à 1 pour le cylindre infini. Il n'en est plus de même pour le cylindre de longueur finie où l'on est en présence d'un écoulement tridimensionnel dans les extrémités. Dans le cas d'un écoulement en couche limite, la définition de la valeur de référence est délicate, comme nous le verrons plus loin, et le coefficient ( $C_{p_0}$ ) est parfois différent de l'unité.

Considérons tout d'abord le cas du cylindre en écoulement laminaire uniforme qui est le plus largement étudié : il est intéressant d'analyser les variations de la valeur du coefficient de pression minimum avec le nombre de Reynolds et avec l'angle correspondant.

Niemann [1], dans son excellente synthèse « Zur stationären Windbelastung rotations-symmetrischer Bauwerke im Bereich transkritischer Reynoldszahlen » a montré qu'il existait une relation linéaire entre le  $C_p$  minimum et l'angle correspondant à cette valeur dans le cas de l'écoulement initial uniforme (fig. 2).

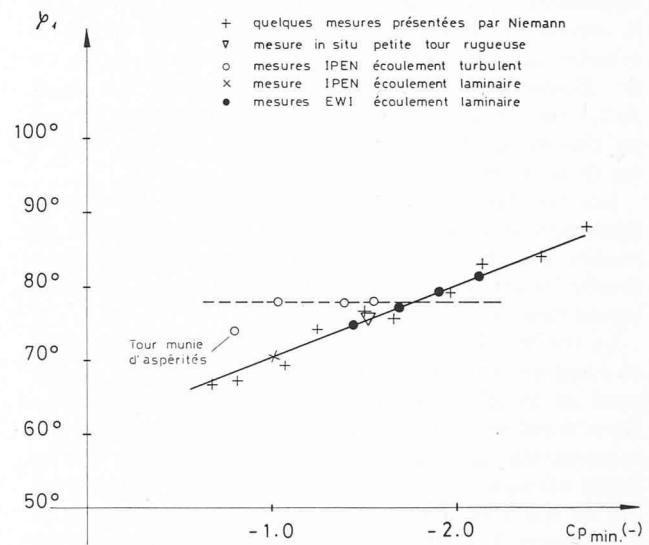


Fig. 2. — Angle correspondant au coefficient de pression minimum en fonction de la valeur de ce coefficient.

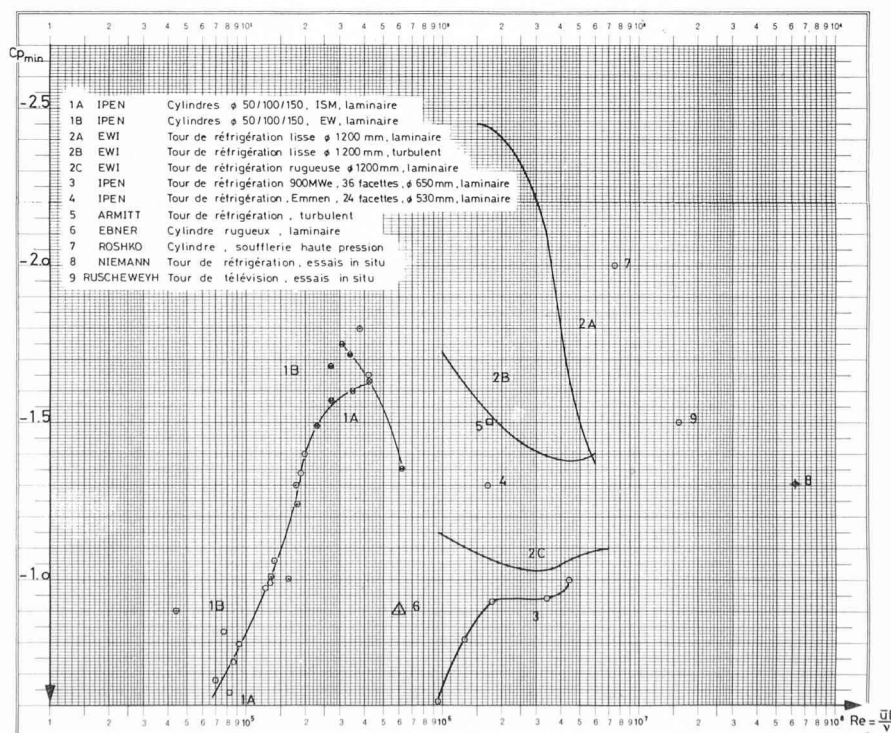


Fig. 3. — Coefficient de pression minimum en fonction du nombre de Reynolds.

### 3. Coefficient de pression minimum en fonction du nombre de Reynolds dans le cas d'écoulement laminaire ou de turbulence uniforme

La variation de la valeur du coefficient de pression minimum en fonction du nombre de Reynolds ne suit, apparemment, aucune loi simple. Le  $C_p$  minimum dépend de la rugosité de la surface, de la turbulence initiale et du nombre de Reynolds. A titre d'exemple, nous avons reporté quelques résultats obtenus pour les grands cylindres en soufflerie aérodynamique et par mesures sur ouvrages réels (fig. 3).

La courbe n° 1 montre le comportement de trois cylindres en forme de réservoirs sphériques de petites dimensions ( $\varnothing$  50, 100 et 150 mm) placés dans deux souffleries aérodynamiques différentes. L'influence du changement de soufflerie se fait sentir en dessous de  $10^5$  et en dessus de  $2,5 \cdot 10^5$ .

Pour les petites valeurs du nombre de Reynolds, la différence obtenue pour  $C_{p_{min}}$  s'explique par l'influence de la couche limite de la soufflerie dans laquelle baigne le cylindre de la courbe 1B, alors que celui de la courbe 1A est disposé sur une plaque simulant le sol. Au-dessus de  $2,5 \cdot 10^5$ , on voit l'influence de la turbulence initiale qui est plus élevée dans le cas de la courbe 1A que dans le cas de la courbe 1B.

Les courbes n° 2 ont été obtenues par Electrowatt Ingénieurs-conseils SA [3] lors d'essais en soufflerie sur un modèle à l'échelle 1/60 d'une tour de réfrigération. La courbe 2A est relative au modèle lisse soumis à un écoulement laminaire.

La courbe 2B correspond au même modèle lisse placé en écoulement turbulent uniforme et la courbe 2C correspond au modèle rugueux placé en écoulement laminaire. Dans le cas de l'écoulement turbulent, on observerait une augmentation de 5 % environ. On peut constater que les angles correspondant au  $C_p$  minimum sont, pour tous ces cas, en bon accord avec la courbe de Niemann (fig. 2).

La courbe 3 est obtenue par nous-mêmes sur un modèle de tour de réfrigération en construction métallique formée de 36 facettes. L'écoulement initial est uniforme et a une intensité de turbulence de 4 % [8]. Le point 4 correspond à une autre tour de réfrigération à 24 facettes placée dans un écoulement à faible turbulence initiale (4 ‰) [9].

Le point 5 a été obtenu par J. Armit [4] et correspond au cas d'une tour lisse placée en écoulement turbulent.

Le point 6 a été obtenu par Ebner [5] pour un cylindre rugueux en écoulement laminaire.

Le point 7 représente une valeur obtenue par Roshko [6] en soufflerie à haute pression et correspond à l'un des nombres de Reynolds les plus grands obtenus en soufflerie aérodynamique.

Les deux points 8 et 9 sont relatifs à des mesures in situ, le point 8 obtenu par Niemann [2] et le point 9 par Ruscheweyh [7].

Il existe bien entendu encore de très nombreux résultats et la liste précédente ne se veut pas exhaustive. Elle a pour but de montrer les très grandes variations obtenues dans les résultats et qu'il est nécessaire d'affiner la méthode de mesure en soufflerie afin de s'assurer de la similitude entre les mesures effectuées sur modèle et les charges auxquelles la construction sera soumise effectivement.

Ces questions sont en fait plus généralement celles de la similitude à adopter afin d'effectuer valablement des essais sur modèles réduits placés en soufflerie aérodynamique. Bien que cette question ait été étudiée parallèlement à l'évolution des connaissances en mécanique des fluides et par là même soit largement discutée, nous avons été frappé

Nom	Symbole	Définitions	Origine							Domaine d'application						
			Equation de mouvement	Equation d'énergie	Equation de diffusion	Equation de mouvement turbul.	Equation d'énergie turbulente	Equation de diffusion turbulente	Equations de conditions aux limites	Autres origines	Conditions de vitesse imposées			Convection		
											Stationnaire	Instation.	Diffusion	Stationnaire	Instation.	Diffusion
Froude	$\mathcal{F}$	$\frac{V}{\sqrt{g D_0}}$	●				●					●	●	●	●	
Euler	$\mathcal{E}_u$	$\frac{p}{\rho_0 V^2}$	●									●	●	●	●	
Mach	$\mathcal{M}$	$\frac{V}{a}$								Nombre d'Euler et définition de la célérité du son		●	●	●	●	
Reynolds	$\mathcal{R}_e$	$\frac{V_0 D_0}{\nu_0}$	●	●			●					●	●	●	●	
Eckert	$\mathcal{E}$	$\frac{V_0^2}{k_0} + \frac{V_0^2}{C_0 T_0}$	●				●					●	●	●	●	
		$\frac{k_0 T_0}{V_0^2 D_0 \rho_0}$					●					●	●	●	●	
Strouhal	$\mathcal{S}$	$\frac{V_0}{D_0 \nu_0}$								$f_0 = \frac{D_0}{V_0}$ Nbre. d'homocronne			●	●		
Schmidt	$\mathcal{S}_c$	$\frac{\nu_0}{D_0}$		●			●									
Péclet	$\mathcal{P}$	$\frac{V_0 D_0 \rho_0 C_p}{k_0}$								$\mathcal{R}_e \cdot \mathcal{P}$		●	●	●	●	
Prandtl	$\mathcal{P}$	$\frac{C_p \mu_0}{k_0}$								$\frac{k_0 T_0}{V_0^2 D_0 \rho_0}$		●	●	●	●	●
		$\frac{\Delta T_0}{T_0} ; \alpha T_0$	●							Fluide dilatable $p = p_0 (1 + \alpha \Delta T)$					●	●
Grashof	$\mathcal{G}$	$\frac{g \Delta T_0 D_0^3}{\nu_0^2}$	●							Fluide dilatable $p = p_0 (1 + \alpha \Delta T)$					●	●
Nusselt	$\mathcal{N}$	$\frac{V_0 D_0}{k_0 T_0}$								Equation du flux $\dot{Q} = -K \nabla^2 T$					●	●
		$\frac{V_0^2 \lambda_0^2}{D_0 \nu_0^2 V_0}$								et définition turbul. $U = V_0 \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)$					●	●
Reynolds turbulent	$\mathcal{R}_t$	$\frac{V_0 D_0}{\nu_0}$					●								●	●
Euler turbulent	$\mathcal{E}_t$	$\frac{\sqrt{\rho_0}}{\rho_0} = \frac{\sqrt{\rho_0}}{\rho_0}$					●								●	●
Prandtl turbulent	$\mathcal{P}_t$	$\frac{C_p (\mu_0 + \mu_{t0})}{k_0 + k_{t0}}$					●			$\frac{k_0 T_0}{V_0^2 D_0 \rho_0}$ et définition turbul.					●	●
Grashof turbulent	$\mathcal{G}_t$	$\frac{g \Delta T_0 D_0^3}{\nu_0^2 (V_0 + V_{t0})^2}$					●			Fluide dilatable $p = p_0 (1 + \alpha \Delta T)$ et définition turbul.					●	●
		$\frac{\sqrt{\rho_0}}{\rho_0}$					●	●							●	●
		$\frac{\sqrt{\rho_0}}{\rho_0}$					●								●	●
		$\frac{\sqrt{\rho_0}}{\rho_0}$					●								●	●
		$\frac{\sqrt{C_p}}{C_p}$					●								●	●

Fig. 4. — Tableau récapitulatif des nombres sans dimension.

par le manque de synthèse, et par conséquent de rigueur, à la base de la transposition modèle-réalité. En effet, il est de coutume de ne considérer que quelques nombres adimensionnels devant avoir la même valeur pour le modèle et pour le prototype.

Comme le respect de ces conditions n'est pas toujours possible, principalement en regard du nombre de Reynolds (voir fig. 4, tableau des nombres sans dimension), on effectue généralement diverses mesures en fonction de ce nombre en vue d'une extrapolation.

Nous avons entrepris une étude à caractère plus général de la similitude en vue de chercher une amélioration de la transposition modèle-réalité. Les résultats de cette étude sont présentés au paragraphe suivant.

### 4. Similitude entre écoulements turbulents isothermes

Pour que le comportement du modèle soit en similitude avec celui du prototype, il faut que l'écoulement soit en similitude, c'est-à-dire que les lignes de courant et trajectoires soient géométriquement semblables.

On sait que la répartition des pressions autour d'un solide dépend uniquement des caractéristiques de la couche limite, région de l'écoulement en contact avec ce solide. Cette couche limite doit présenter une similitude géométrique, par conséquent elle doit avoir la même structure sur le modèle et sur le prototype. Le comportement de la couche limite dépend de sa turbulence propre,

appelée turbulence induite et de la turbulence de l'écoulement entourant l'obstacle, appelée turbulence initiale. La rugosité de l'ouvrage et la turbulence initiale ont pour effet de modifier la turbulence propre de la couche limite. On a vu que les coefficients de pression minimum varient fortement en fonction de la turbulence et de la rugosité, donc en fonction des interactions entre la rugosité et la turbulence induite d'une part et entre la turbulence induite et la turbulence initiale d'autre part.

En terme de similitude, l'étude du comportement d'une couche limite revient donc à rechercher les critères de similitude entre écoulements turbulents.

Pour établir ces critères, nous avons formulé le système d'équations différentielles exprimant le comportement du fluide turbulent. A l'aide d'un changement de variables adéquat, ces équations ont été rendues adimensionnelles. Les paramètres sans dimension multiplicatifs des termes des équations sont les nombres qu'il est nécessaire de maintenir constants entre le modèle et la réalité. Ces nombres sont résumés sur le tableau récapitulatif des nombres sans dimension (fig. 4).

Dans le cas d'un écoulement autour d'un obstacle, seuls les nombres relevés dans la colonne : « écoulements turbulents stationnaires à conditions de vitesse imposées » doivent être considérés. Il s'agit de 15 conditions.

Si l'on admet que l'écoulement est très turbulent et que la vitesse est grande, les nombres de Froude et de Reynolds peuvent être négligés. On remarquera que le nombre de Reynolds turbulent doit par contre être conservé. Si de plus l'écoulement peut être considéré comme isotherme, les nombres d'Eckert, Peclet, Prandtl, Prandtl turbulent, les rapports des écarts-type aux valeurs moyennes de température et de masse spécifique ainsi que le nombre

$\frac{k_0 T_0}{V_0^3 D_0 \rho_0}$  peuvent être négligés.

Il ne reste à considérer que six nombres marqués d'un astérisque dans le tableau de la figure 4.

Ces nombres sont compatibles entre eux si les vitesses et les intensités de turbulence sont identiques en tous points homologues des écoulements se produisant autour de corps géométriquement semblables.

Ceci signifie que les grandes échelles de turbulence doivent être modifiées dans le rapport de l'échelle et que les profils de vitesse, d'intensité de turbulence doivent être à l'échelle.

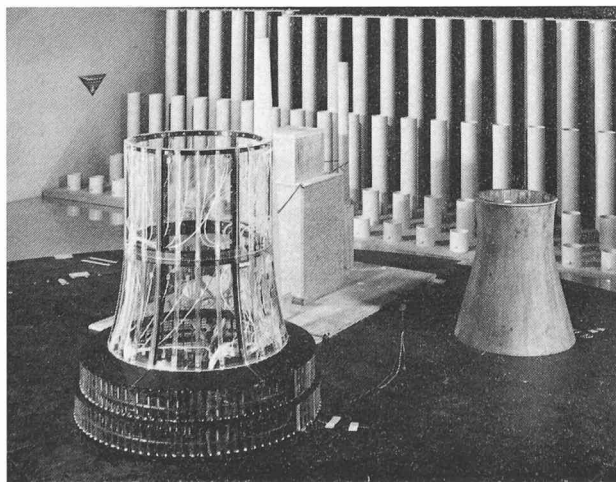
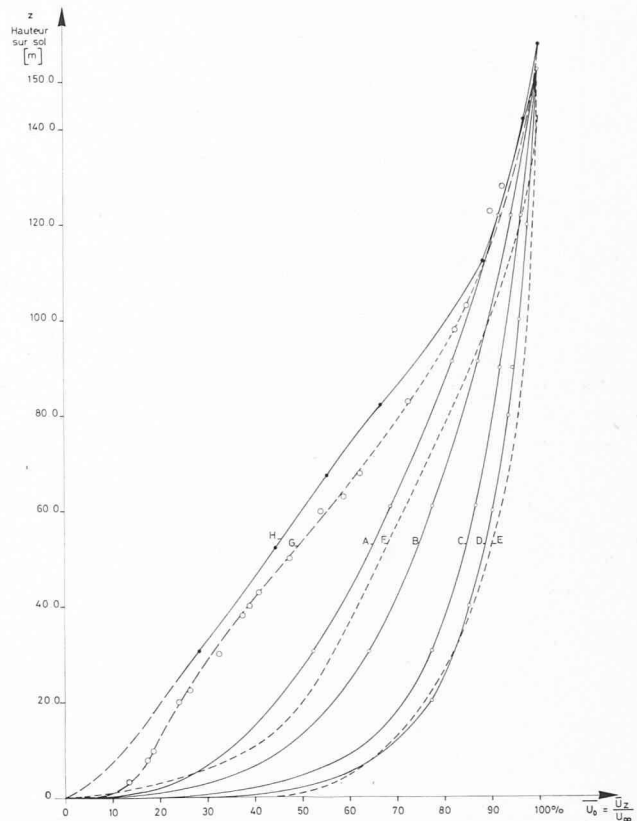


Fig. 5. — Essais en soufflerie aérodynamique.  
1<sup>er</sup> plan : modèle tour de réfrigération ;  
2<sup>e</sup> plan : bâtiments de la centrale existante ;  
arrière-plan : générateur de turbulence à barreaux  $\varnothing$  113 mm.



*Composantes longitudinales*

$$A B C \quad \frac{\bar{u}_z}{u_\infty} = \left(\frac{z}{Z_0}\right)^\alpha \quad Z_0 = 152,4 \text{ m}$$

*Profils relevés dans la nature*

- A Davenport, zone urbaine  $\alpha = 0,4$
- B Davenport, zone campagne  $\alpha = 0,28$
- C Davenport, zone côtière  $\alpha = 0,16$
- D Règle définissant les effets de la neige et du vent, France (AFNOR)  
— site normal région 2 —

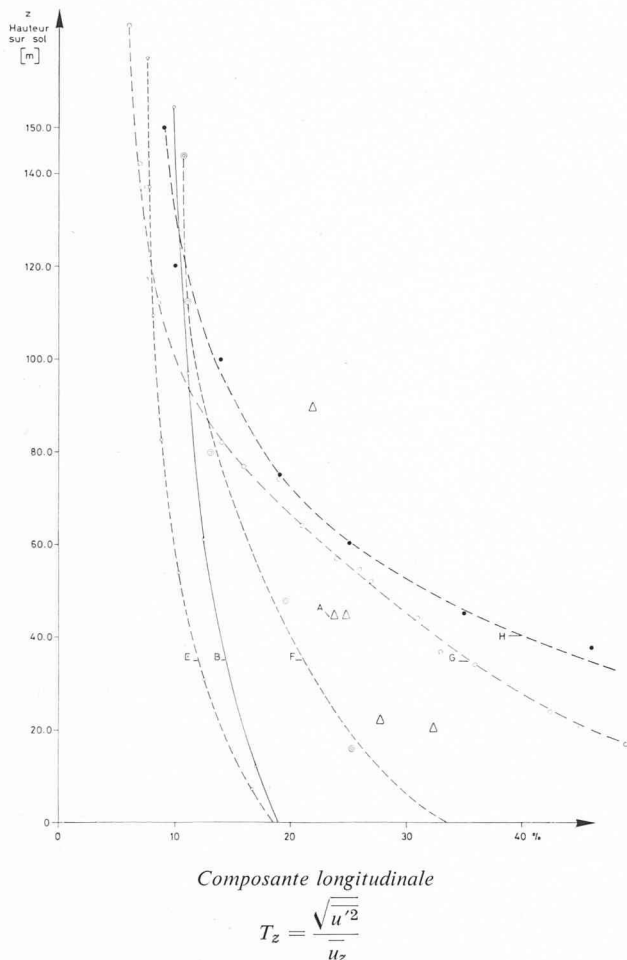
*Profils reproduits en soufflerie*

- E soufflerie F + W Emmen.  $\varnothing$  113 mm
- F soufflerie EPFZ  $\varnothing$  80 mm
- G soufflerie EPFL-ISM  $\varnothing$  16 mm
- H soufflerie EPFL-ISM  $\varnothing$  10 mm

Fig. 6. — Profils de vitesses moyennes en fonction de la hauteur.

Nous avons ainsi les conditions à réaliser lors de l'essai en soufflerie. Il faut encore connaître les caractéristiques de l'écoulement sur le site de la construction et savoir les reproduire en soufflerie, ce qui est très important.

Il serait nécessaire de mesurer les profils de vitesse, d'intensité de turbulence ainsi que les échelles de turbulence sur chaque site et pour des conditions de vent maximum. Ces mesures sont longues et coûteuses. D'autre part, la création d'une couche limite turbulente en soufflerie nécessite le recours à des générateurs de turbulence, dispositif délicat à mettre au point, différent pour chaque cas. Toutefois, comme nous le verrons au paragraphe suivant, de petites variations dans la turbulence initiale ont très peu d'effet sur le comportement de l'écoulement. La part essentielle de l'influence réside dans la présence du profil de vitesse et le respect approximatif de la similitude entre les échelles de turbulence. Ainsi, il semble possible de définir une turbulence initiale type en similitude approximative avec la turbulence atmosphérique.



*Profils relevés dans la nature*

- A Davenport, mesures à Brookhaven
- B mesures à Sale

*Profils reproduits en soufflerie*

- E soufflerie F+W, Emmen  $\varnothing$  113 mm
- F soufflerie EPFZ  $\varnothing$  80 mm
- G soufflerie EPFL-ISM  $\varnothing$  16 mm
- H soufflerie EPFL-ISM  $\varnothing$  10 mm

Fig. 7. — Profils d'intensité de turbulence en fonction de la hauteur.

## 5. Création en soufflerie d'un écoulement turbulent semblable à la couche limite atmosphérique

Comme nous venons de le voir, il est nécessaire de simuler la couche limite atmosphérique dans sa nature turbulente. Lors des essais effectués par nos soins, les souffleries utilisées étaient des souffleries aéronautiques conventionnelles qui ne permettent pas la création d'une couche limite turbulente épaisse par frottement sur une longue surface rugueuse.

Pour pouvoir créer une couche limite épaisse sur la faible distance disponible, nous avons eu recours à des générateurs de turbulence à barreaux (photo fig. 5).

Des générateurs de turbulence de ce type, de différentes dimensions, mais géométriquement semblables ont été étudiés. Le diamètre des perturbateurs est de 10, 16, 80 et 113 mm pour les différents essais présentés ici.

La figure 6 montre les profils de vitesse obtenus dans ces écoulements comparés avec les profils obtenus par Davenport dans la nature, cas A, B, C de la figure 6. Les profils d'intensité de turbulence correspondants sont présentés sur la figure 7.

Les profils de vitesse et d'intensité de turbulence ne sont pas tous en bon accord avec ceux obtenus dans la nature. L'écart est plus important pour les profils correspondant aux générateurs de turbulence de petites dimensions  $\varnothing$  10 et 16. Ils sont par contre en bon accord dans le cas des générateurs de turbulence de grande dimension  $\varnothing$  80 et 113 mm. Les écarts observés sont à attribuer à l'influence de la micro-échelle de la turbulence. En effet, pour des obstacles géométriquement semblables, la micro-échelle n'évolue pas proportionnellement à l'échelle des obstacles qui correspond à la règle de similitude émise plus haut. Les micro-échelles évoluent comme la racine carrée de l'échelle. Notons toutefois que l'influence des différences observées dans les profils de vitesse ne semble pas avoir d'incidence importante sur les répartitions de pression.

## 6. L'influence de l'écoulement turbulent sur le comportement aérodynamique des cylindres

D'une manière générale, l'influence de la turbulence de l'écoulement peut être décomposée en deux parts :

- influence indirecte de la turbulence de l'écoulement par l'intermédiaire du profil des vitesses moyennes de la couche limite atmosphérique turbulente qui se développe sur le sol,
- influence de la nature turbulente de l'écoulement proprement dit par opposition à un écoulement laminaire.

Cette décomposition permet de séparer l'aspect tridimensionnel de l'écoulement autour d'un obstacle, de l'aspect du comportement de la couche limite de l'objet, ici le cylindre et la tour de réfrigération, sous l'influence de la turbulence. Toutefois, pratiquement ces deux aspects sont liés et cette décomposition n'a qu'un but académique permettant une meilleure compréhension des phénomènes.

### 6.1 Influence de l'allure du profil de vitesse

L'influence de l'écoulement moyen, c'est-à-dire de la couche limite représentant le vent, est très importante. On peut distinguer deux catégories :

- Constructions dont les dimensions géométriques sont dans un rapport constant ou sensiblement constant avec l'épaisseur de la couche limite, les résultats sont comparables pour des essais effectués à différentes échelles. Ils présentent en outre une répartition des pressions variant selon la hauteur.
- Comparaison entre constructions ayant des dimensions telles que le rapport à l'épaisseur de la couche limite varie, les résultats obtenus sont très différents.

Nous considérerons ici le cas de tours de réfrigération de grande dimension ou de cylindres placés dans une couche limite turbulente d'épaisseur légèrement supérieure à la hauteur de la tour.

Pour chaque essai le rapport entre la hauteur de la construction et celle des générateurs de turbulence a été conservé. Ainsi, on obtient une similitude de la dimension relative de l'ouvrage à l'épaisseur de la couche limite, correspondant à des constructions réelles d'une hauteur de 150 m environ.

Tous les essais effectués dans ces conditions montrent (fig. 8, haut) que la pression mesurée dans la zone de surpression située au voisinage de la ligne d'arrêt varie en fonction de la hauteur proportionnellement à la pression dynamique. Ceci est conforme aux hypothèses faites dans la plupart des normes et règlements. C'est également conforme à la première idée que l'on se fait de l'influence de ce type d'écoulement. Toutefois, les pressions relevées

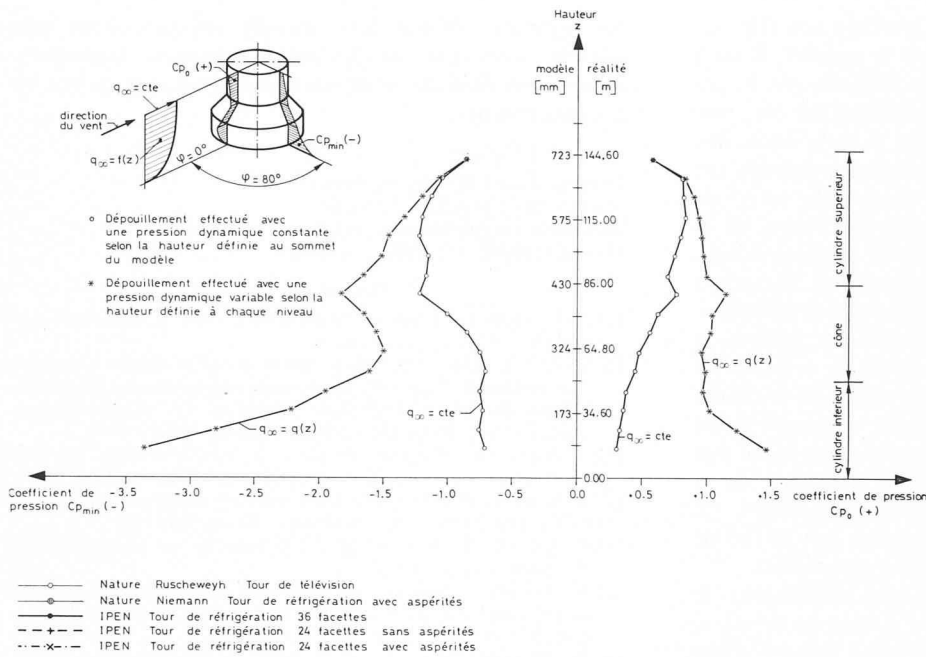


Fig. 8. — Coefficients de pression  $Cp_0$  et  $Cp_{min}$  en fonction de la hauteur.

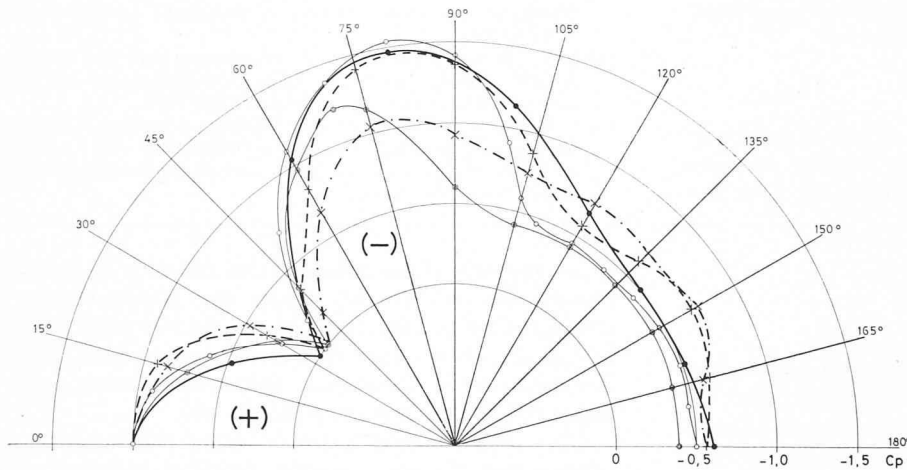


Fig. 9. — Coefficients de pression. Comparaison entre mesures effectuées en écoulement turbulent.

dans la zone de dépression (fig. 8, bas), c'est-à-dire de part et d'autre de la construction et dans le sillage, sont approximativement constantes et égales aux valeurs relevées au sommet de la construction. Ceci est surprenant.

Notons que les augmentations de charges statiques dues à cet effet sont faibles car cette uniformisation des pressions négatives a lieu à la base de la construction et de manière symétrique.

### 6.2 Influence de la nature turbulente de l'écoulement

Sur la figure 9 on peut voir l'influence de la rugosité ou des aspérités. Pour les cylindres lisses ou sans aspérité mais anguleux (24 et 36 facettes), l'angle  $\varphi_1$  est le même, mais la valeur  $Cp_{min}$  diminue avec l'augmentation du nombre des facettes.

Les aspérités ont pour effet de modifier l'angle correspondant à  $Cp_{min}$  (voir fig. 2 trait pointillé) pour une valeur de  $Cp_{min}$  inférieure à celle du cas d'ouvrage à 24 facettes.

Comme on peut le constater, ces mesures sont en bon accord avec le cas de la nature présentée par Ruscheweyh (x de la fig. 9) et par Niemann. Il faut relever que les courbes correspondent toutes à un anneau situé à un niveau moyen des constructions et qu'elles ont toutes été normalisées de manière à obtenir une valeur de  $Cp_0 = 1$ .

L'influence de la nature turbulente de l'écoulement se traduit également par une égalité des coefficients de pres-

sion relevés en écoulement à nombre de Reynolds variable. En effet, pour les cylindres lisses l'allure des courbes des coefficients de pression ne dépend plus du nombre de Reynolds.

Notons qu'il s'agit toujours de turbulence en similitude, c'est-à-dire que les rapports relatifs : hauteurs/diamètre du modèle, diamètre du modèle/épaisseur de la couche limite, diamètre du modèle/macro-échelles de la turbulence, étaient toujours approximativement conservés lors des divers essais.

### 7. Conclusions

La présente étude a permis de rappeler tout d'abord que le comportement aérodynamique des cylindres était fortement influencé par la nature turbulente de l'écoulement, la rugosité de la surface, le nombre de Reynolds et qu'il est rare de trouver un accord entre des essais effectués dans des souffleries différentes.

L'analyse des critères de similitude entre écoulements turbulents a permis de dégager diverses règles importantes relatives à la manière de simuler la turbulence et de les confirmer, dans leur ensemble, par l'expérimentation.

On a pu montrer également que des essais effectués dans des écoulements turbulents comparables conduisent à des répartitions de pression indépendantes du nombre de

Reynolds. Ceci permettant dès lors d'établir une règle de variation de la pression en fonction de la rugosité. Il est à relever que la turbulence initiale de l'écoulement a une influence beaucoup plus forte par l'intermédiaire du profil moyen de vitesse que par l'intensité de la turbulence. Par conséquent, lors de l'utilisation de résultats obtenus sur modèles, il est nécessaire de tenir compte du profil de vitesse correspondant et non du profil de vitesse de la norme en vigueur dans le pays du lieu de la construction. En conclusion, il nous apparaît nécessaire de recourir à des souffleries ad hoc comme les souffleries environnementales qui permettent la simulation de manière détaillée de la turbulence du vent, pour les études d'effet du vent sur les constructions. Ces outils rendent possible une meilleure approche que par le passé des effets de la couche limite atmosphérique sur le comportement aérodynamique des constructions ainsi qu'une analyse de l'influence de la structure fine de la turbulence sur ce comportement. Ce dernier point est particulièrement important lors de l'étude des effets dynamiques du vent sur ces constructions.

D'une manière générale, il n'est pas souhaitable de mélanger les résultats expérimentaux, il faut au contraire effectuer plusieurs dimensionnements en se référant d'une part aux normes et d'autre part aux résultats expérimentaux et choisir le cas le plus défavorable.

### Remerciements

L'auteur tient à remercier l'Institut fédéral de recherches en matière de réacteurs (IFR) et la Société Alusuisse Engineering SA (ALESA) qui lui ont permis de publier

les résultats obtenus lors d'essais effectués pour leur compte ainsi que la Société Electrowatt Ingénieurs-conseils SA pour les nombreux renseignements qu'elle lui a communiqués.

Adresse de l'auteur :

Jacques-André Hertig, ingénieur  
Institut de production d'énergie  
de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne  
avenue Dapples 17, 1006 Lausanne

### BIBLIOGRAPHIE

- [1] J.-A. HERTIG : *Etude de la similitude entre écoulements turbulents*. Thèse en préparation.
- [2] J.-J. NIEMANN : *Zur stationären Windbelastung rotations-symmetrischer Bauwerke im Bereich transkritischer Reynoldszahlen*. Rapports techniques. Institut für Konstruktiven Ingenieurbau Ruhr-Universität Bochum. Mars 1971.
- [3] B. HOPKIRK : *Tempêtes et tours de refroidissement*. Electrowatt Ingénieurs-conseils SA. Bulletin d'information 1975.
- [4] J. ARMITT : *Report of the Committee of Inquiry into Collapse of Cooling Towers at Ferrybridge*. November 1965.
- [5] H. EBNER, H. RUSCHEWEYH : *Windlasten an hyperbolischen Kühlturmschalen*. 1974.
- [6] A. ROSHKO : *Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds numbers*. Journal of Fluid Mechanics (vol. 10), p. 345-356, 1961.
- [7] H. RUSCHEWEYH : *Wind loadings on the television tower, Hamburg, Germany*. Journal of industrial aerodynamics. Août 1976.
- [8] J.-A. HERTIG : *Tour sèche de réfrigération pour une centrale de 900 MWe. Etude des effets aérodynamiques sur une variante en construction métallique*. Mai 1974.
- [9] J.-A. HERTIG : *Tour sèche de réfrigération, système Heller, en construction métallique. Centrales Ibbenbüren HHT. Etude des effets statiques du vent par essais en soufflerie aérodynamique*. Novembre 1976.

## Divers

### Musée technique de Baden

Un petit musée technique vient d'être inauguré dans le bâtiment de l'ancienne centrale hydro-électrique de Kappelerhof sur la Limmat, mise hors service le 15 mars 1976. Des quatre groupes de machines qui ont été remplacés dans une nouvelle centrale par une turbine Kaplan du type bulbe à axe incliné, une unité complète a pu être conservée. Le pertuis d'entrée de la turbine et l'aspirateur ont été obturés par un mur et mis à sec. Un étroit escalier donne accès à la turbine Francis d'Escher-Wyss, construite en 1918 et laissée à sa place originale. Dans une partie cloisonnée de la salle des machines de l'usine, mise en service en 1892, se trouve un générateur de Brown, Boveri & C<sup>ie</sup>, construit en 1925. L'engrenage conique construit en 1918 par Escher-Wyss a été partiellement découvert pour montrer la denture de bois.



Le groupe préservé ; à gauche, engrenage conique à denture de bois Escher Wyss et à droite, générateur BBC.

Les appareils et machines qui sont des dons de diverses provenances illustrent les débuts de l'électrotechnique : commutateurs pneumatiques, interrupteurs à huile, transformateurs, interrupteurs-séparateurs, coupe-circuit, matériel d'installation, téléphones, appareils d'alarme, compteurs, théodolites, niveaux à lunette, etc.

C'est principalement grâce à l'esprit d'initiative et à l'engagement de Josef Stalder, directeur technique des Services municipaux de Baden, que l'on doit ce petit musée dans lequel les objets sont présentés de façon claire et ordonnée. Il est à souhaiter que ce ne sera que le début d'un plus grand et plus riche musée, la ville de Baden étant étroitement liée à l'industrie électrique par BBC, NOK et Motor-Columbus.

G. WEBER.

## Carnet des concours

### Prix international AIMs

L'Association des ingénieurs de la Faculté polytechnique de Mons (AIMs) se propose de décerner son Prix international pour la période 1973-1977.

Ce concours, doté d'un prix de 50 000 fr. belges, est ouvert à tous les ingénieurs de niveau universitaire du monde entier.

Pour être pris en considération, les mémoires relatifs à ce concours doivent parvenir avant le 30 juin 1978.

Le prix est décerné à l'auteur du meilleur travail original se rapportant à l'art de l'ingénieur.

Les lauréats pourront porter le titre de : « Lauréat du Prix international de l'Association des ingénieurs de la Faculté polytechnique de Mons (AIMs). »

Renseignements complémentaires : Secrétariat de l'AIMs, 9, rue de Houdain, 7000 Mons, Belgique. Téléphone : (065) 33 32 61.