

# **ACTIONS DU VENT SUR LES OUVRAGES EFFETS DYNAMIQUES**

*Olivier Flamand*

## TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>2</b>
<b>1 LA MODELISATION DU VENT</b> .....	<b>3</b>
1.1 LA COUCHE LIMITE TURBULENTE ATMOSPHERIQUE.....	3
1.2 ECHELLES DE FLUCTUATION DU VENT .....	3
1.3 LE VENT MOYEN .....	5
1.4 LE VENT TURBULENT.....	7
<i>Ecarts types et intensité de turbulence</i> .....	7
<i>Coefficients de corrélation et échelles de turbulence</i> .....	8
<i>Densités (inter)spectrales de puissance</i> .....	9
<b>2. CONTOURNEMENT D'UNE CONSTRUCTION PAR LE VENT ET CHAMP DE PRESSION INDUIT</b> .....	<b>10</b>
<i>Equation de Bernoulli</i> .....	10
<i>Principe de conservation de la masse</i> .....	10
2.1. CONTOURNEMENT D'UNE CONSTRUCTION PAR LE VENT .....	10
2.2. CHAMP DE PRESSION ET COEFFICIENTS DE PRESSION .....	12
2.3. COEFFICIENTS AERODYNAMIQUES.....	15
2.4. ETUDE DES SILLAGES - INFLUENCE DU NOMBRE DE REYNOLDS .....	15
2.5. ROLE DE LA TURBULENCE .....	21
<b>3. EFFETS DYNAMIQUES DU VENT</b> .....	<b>24</b>
3.1. SYSTEME A UN DEGRE DE LIBERTE .....	24
3.2. CONSTRUCTIONS ELANCEES : MODES PROPRES.....	26
3.3. EXEMPLES DE MODES DE VIBRATIONS DE STRUCTURES ELANCEES .....	27
3.4. EFFETS DYNAMIQUES INDUITS PAR LA NATURE TURBULENTE DU VENT SUR LES CONSTRUCTIONS ELANCEES : APPROCHE SPECTRALE .....	29
3.5. EFFETS DYNAMIQUES PARTICULIERS .....	31
3.5.1. <i>Effets dynamiques créés par le détachement tourbillonnaire</i> .....	31
3.5.2. <i>Phénomène de galop</i> .....	33
3.5.6. <i>Phénomènes de flottement</i> .....	34
3.5.7. <i>Effets de sillage et d'interaction</i> .....	34
4. REDUCTION DES EFFETS DYNAMIQUES : L'AMORTISSEUR DYNAMIQUE ACCORDE .....	34
<b>5. SIMULATION PHYSIQUE DES PHENOMENES AERODYNAMIQUES</b> .....	<b>37</b>
5.1 SIMULATION DU VENT A ECHELLE REDUITE EN SOUFFLERIE A COUCHE LIMITE .....	37
5.2 LA MAQUETTE SOUFFLERIE ET SON INSTRUMENTATION .....	38
5.2.1 <i>Etude sur maquette rigide</i> .....	38
5.2.2 <i>Etude sur maquette aéroélastique (dynamiquement semblable)</i> .....	42

Actions du vent sur les ouvrages - Effets dynamiques.

Maîtrise de Mécanique - Université de Nantes - décembre 2003

## INTRODUCTION

Le vent naturel turbulent est un paramètre important dans le dimensionnement des ouvrages modernes de plus en plus légers et élancés. La vitesse du vent dans les basses couches de l'atmosphère varie d'un point à un autre de l'espace et fluctue dans le temps. Ce champ de vitesse engendre sur les parois des constructions des pressions aérodynamiques, donc des forces aérodynamiques dans les structures, elles-mêmes fluctuantes. L'objet de ce cours n'est pas tant les pressions aérodynamiques appliquées à la « peau » des structures que la réponse de la construction à ces pressions, en termes de moments, contraintes, déplacements, accélérations, instabilités... La relation peut être complexe entre les forces aérodynamiques et la réponse de la construction, notamment lorsque la construction est élancée ou de grandes dimensions. Les effets dynamiques avec excitation des modes propres de la construction par le vent incident, par les écoulements de contournement de la construction ou éventuellement l'apparition d'instabilités aéroélastiques, deviennent alors prépondérants.

Il existe des modèles de vent, notamment pour les sites plats, fonctions de la géographie, de la topographie, de la rugosité du site et de la hauteur au dessus du sol. Cependant le passage des vitesses de vent aux pressions aérodynamiques n'est pas accessible actuellement par modélisation numérique de mécanique des fluides, en particulier l'action instantanée ou ses caractéristiques statistiques, extrêmes, écarts types, densités spectrales.

Il faut donc avoir recours à des approches théoriques, basées sur une modélisation simplifiée des forces aérodynamiques associées à des calculs de dynamique des structures ou à une modélisation physique par simulation en soufflerie "à couche limite" (complétée éventuellement par une démarche théorique), pour déterminer la réponse de la structure considérée.

Mais la première inconnue de ce type d'étude reste le vent. Savoir l'estimer, à défaut de savoir le prévoir, sera le premier souci de l'ingénieur.

## 1 LA MODELISATION DU VENT

### 1.1 La couche limite turbulente atmosphérique

Pour une altitude supérieure à plusieurs centaines de mètres, la vitesse du vent résulte de l'équilibre des forces de Coriolis engendrées par la rotation de la terre et des forces créées par le champ de pression atmosphérique. Le vent est alors sensiblement parallèle aux isobares et sa turbulence est presque nulle.

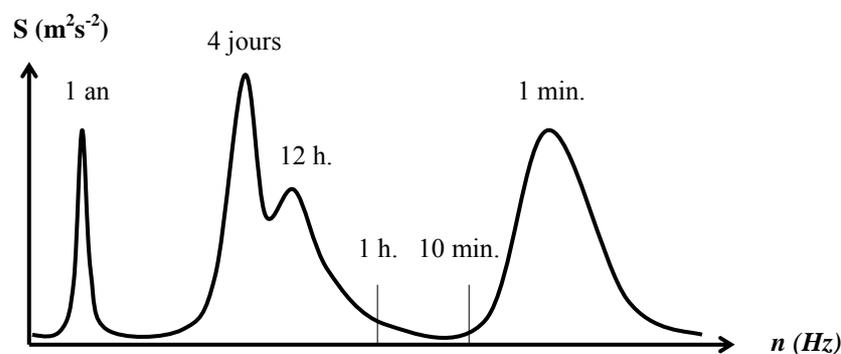
Pour une altitude inférieure à 1000 mètres environ, là où se trouvent les ouvrages bâtis, les forces de frottement dues à la rugosité du sol et les phénomènes thermiques deviennent prépondérants vis à vis des forces de Coriolis ; ils engendrent des fluctuations de la vitesse du vent, dans le temps et dans l'espace, susceptibles d'exciter les structures les plus souples. Cette zone est couramment nommée **couche limite turbulente atmosphérique**.

Toutes les constructions, même les plus élevées, sont soumises à l'effet de la turbulence.

Au plus près du sol, les forces de frottement sont très importantes, la vitesse moyenne du vent est faible et la turbulence élevée. L'altitude augmentant, la vitesse moyenne du vent augmente alors que sa turbulence décroît.

### 1.2 Echelles de fluctuation du vent

L'analyse spectrale de la vitesse du vent dans la couche limite turbulente permet de mettre en évidence plusieurs échelles temporelles de fluctuation. La figure 1 montre l'allure d'un spectre de densité de puissance représentatif de la vitesse horizontale du vent à 100 mètres au dessus du sol d'après Van der Hoven.



*Spectre de Van der Hoven*

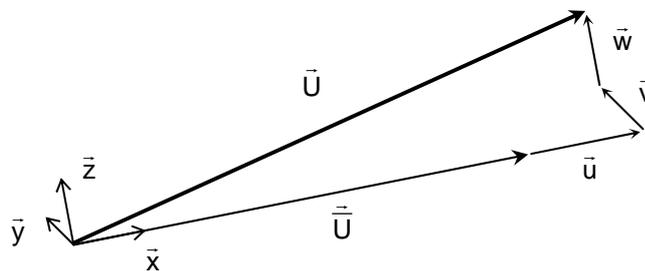
On constate qu'une partie importante de l'énergie est concentrée sur une période de l'ordre de la minute, correspondant à l'échelle des mouvements turbulents. On observe également un trou d'énergie pour des périodes comprises entre 10 minutes et une heure. Par conséquent, sur une période incluse dans ce trou d'énergie, la vitesse du vent pourra être localement considérée comme un processus **stationnaire**. On pourra alors considérer la vitesse du vent comme la somme d'une composante moyenne et d'une composante fluctuante.

Ainsi, par rapport à une base orthogonale  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$  où  $\bar{x}$  est horizontal et parallèle au flux moyen, la vitesse du vent peut s'écrire :

$$\vec{U} = (\bar{U} + u)\bar{x} + v\bar{y} + w\bar{z} \quad (1.1)$$

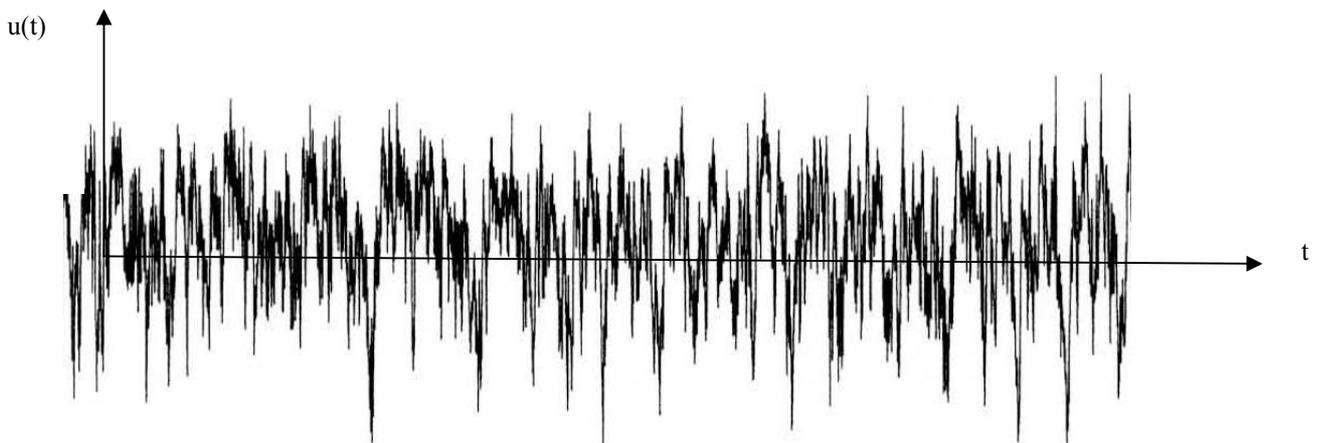
$\bar{U}$  est la vitesse moyenne au point considéré.

$u, v, w$  sont en réalité trois processus quasiment gaussiens, stationnaires centrés représentant les fluctuations du signal autour de la moyenne ; ils caractérisent les variations de la vitesse du vent dues aux passages des tourbillons.



#### *Décomposition du vecteur vitesse du vent*

Par souci de simplification on ne considérera, dans la suite du cours, que la composante  $u(t)$  de la turbulence. Elle est responsable de la fluctuation en module de la vitesse du vent, les composantes  $v$  et  $w$  induisant pour leur part une fluctuation en direction, de l'ordre de quelques degrés.



#### *Exemple d'enregistrement du vent naturel*

Actions du vent sur les ouvrages - Effets dynamiques.

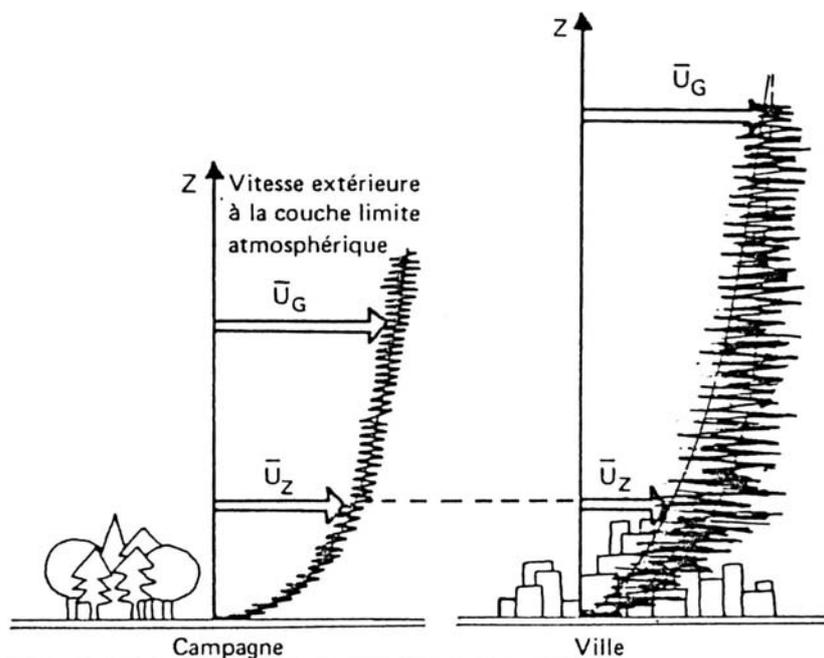
Maîtrise de Mécanique - Université de Nantes - décembre 2003

Ces variations ne sont prises en compte que pour certaines structures particulières, comme les ponts élancés par exemple, pour lesquels la composante verticale  $w$  est responsable de l'essentiel de l'excitation des modes verticaux du tablier et la composante  $v$  responsable de l'excitation des pylônes.

La turbulence, c'est à dire la dispersion de la vitesse autour de sa valeur moyenne, peut être caractérisée sur une période  $T$  par l'écart type de la fluctuation :

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}$$

La composante  $u$  étant traitée comme une fonction aléatoire stationnaire (à l'échelle de la période  $T$ ) et gaussienne, on peut estimer la vitesse de pointe du vent par  $\hat{U} = \bar{U} + 3.5\sigma_u$ .



Si la vitesse moyenne du vent varie avec la hauteur  $z$ , la rugosité du sol et la topographie du site considéré, la turbulence est, elle, essentiellement fonction de la rugosité.

### 1.3 Le vent moyen

En aval d'un site relativement homogène (étendue de mer, bois, ville), on peut considérer que la direction moyenne du vent est identique en tout point et que son module ne dépend que de la hauteur. Différentes lois de variation, empiriques ou théoriques, sont utilisées pour décrire la variation de la vitesse moyenne avec l'altitude :

La loi logarithmique, fondée sur la théorie de la couche limite donne :

$$\bar{U}(z) = k_T U_{ref} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

Actions du vent sur les ouvrages - Effets dynamiques.

Maîtrise de Mécanique - Université de Nantes - décembre 2003

où  $z$  est la hauteur du point considéré au dessus du sol,  $z_0$  le paramètre de rugosité en mètres,  $k_T$  un coefficient adimensionnel fonction de la rugosité, et  $U_{ref}$  la vitesse de référence. Ce modèle n'est applicable qu'à partir d'une altitude  $z > 20 z_0$ .

A titre d'exemple, le tableau ci-dessous indique les ordres de grandeur prescrits par l'Eurocode 1 :

Site	$k_T$	$z_0$ (m)
Océans et grands lacs	0,16	0,005
Aéroport, rase campagne	0,189	0,05
Bocage, banlieue	0,21	0,2
Zones urbaines	0,23	0,75
Très grande ville	0,25	2

*Coefficients  $k_T$  et  $z_0$*

Dans certains cas, une loi puissance s'ajuste mieux aux valeurs mesurées :

$$\bar{U}(z) = U_{ref} \left( \frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha$$

où  $U_{ref}$  est la vitesse à la hauteur  $z_{ref}$ , et  $\alpha$  un exposant sans dimension dépendant de la rugosité du site.

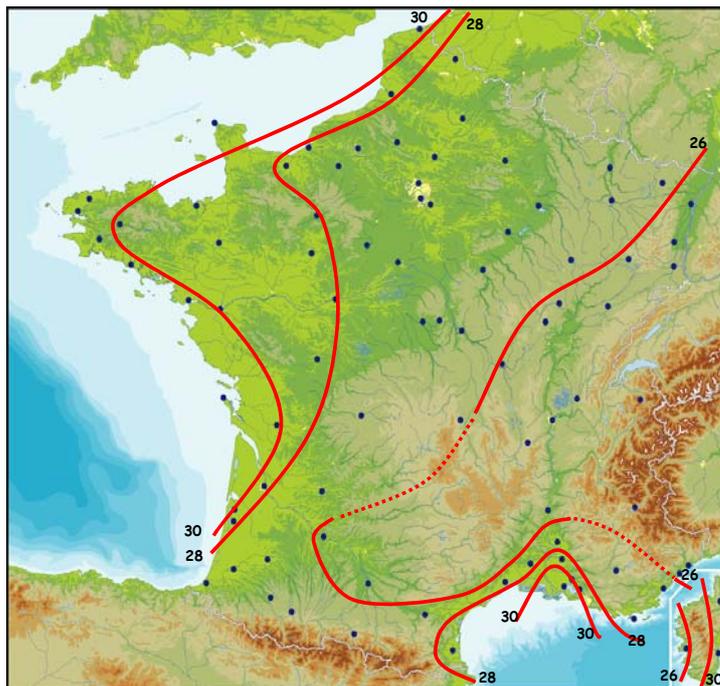
Le tableau ci-dessous donne l'équivalence entre  $\alpha$  et  $z_0$ .

$z_0$ (m)	0,005	0,07	0,3	1,0	2,5
$\alpha$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,35

*Coefficients  $\alpha$*

La vitesse de référence est souvent celle issue des données météo,  $U_{ref} = U_{10 \text{ météo}}$ , qui est une vitesse moyenne sur 10 minutes, mesurée à 10 m de hauteur sur un terrain plat de rugosité faible (type rase campagne, aéroport). Les valeurs élevées de cette vitesse moyenne de référence sont qualifiées par leur probabilité annuelle de dépassement ; elles définissent la « force » de la tempête que l'on considère.

Dans les réglementations modernes des périodes de retour de 10 à 100 ans sont considérées pour définir ce vent de référence, correspondant peu ou prou dans leur durée aux assurances (décennales, cinquanténales) en vigueur dans le domaine de la construction. Dans l'Eurocode (approche semi-probabiliste) le vent cinquanténa (de probabilité d'occurrence de 2% par an) est retenu pour dimensionner les ouvrages.



Carte des vents forts (édition 2000) donnant les valeurs de la vitesse cinquanténaire de référence par région.

A cette vitesse de référence est associé un coefficient de sécurité (état limite), qui vaut par exemple 1.5 sur les effets (actions) ou 1.2 sur la vitesse si certains types d'instabilités sont à craindre.

Le concepteur doit de plus vérifier que certains phénomènes aérodynamiques (détachement tourbillonnaire) ne sont pas apparus de manière importante dans certaines gammes de vitesse de vent en deçà de la vitesse de référence.

## 1.4 Le vent turbulent

On note  $[u, v, w]$  le vecteur représentant les composantes fluctuantes de la vitesse du vent en un point donné de l'espace;  $u$  représente la composante longitudinale parallèle au flux moyen,  $w$  la composante verticale et  $v$  est la composante latérale.

Il s'agit alors d'en décrire les variations temporelles et spatiales ; ces dernières jouent un rôle essentiel dans l'étude des structures élancées dont la taille est largement supérieure aux dimensions caractéristiques des tourbillons. Chacune des composantes  $u, v, w$ , en un point de l'espace donné, peut être assez fidèlement modélisée par un processus gaussien centré, stationnaire. On peut ainsi appliquer un certain nombre d'outils statistiques permettant de les caractériser dans l'espace et dans le temps.

### *Écart-types et intensité de turbulence*

On caractérise tout d'abord l'énergie cinétique fluctuante massique moyenne du flux par l'écart-type de chaque composante turbulente:

$$\sigma_{u_i} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_i^2(t) dt} \quad u_i = u, v, w$$

Actions du vent sur les ouvrages - Effets dynamiques.

où T est la durée d'observation du signal. Pour T de l'ordre de 10 minutes, on a vu que le vent pouvait être assimilé à un signal stationnaire. On constate expérimentalement que ces écarts-types sont proportionnels à la vitesse moyenne  $\bar{U}$ . On remarque également que, pour des sites suffisamment homogènes, ils sont indépendants de la position spatiale et, en particulier, ne dépendent pas de l'altitude z. Par contre, ils augmentent avec la rugosité du sol.

Une loi simple donne l'ordre de grandeur de l'écart type de la composante u :

$$\sigma_u = k_T \cdot \bar{U}_{10\text{météo}}$$

On utilise également souvent les notions d'intensités de turbulence. Adimensionnelles, elles sont définies par:

$$I_u = \frac{\sigma_u}{\bar{U}}, \quad I_v = \frac{\sigma_v}{\bar{U}}, \quad I_w = \frac{\sigma_w}{\bar{U}}$$

Elles décroissent avec la hauteur puisque la vitesse moyenne  $\bar{U}$  croît et que  $\sigma_u$  est quasiment indépendant de celle-ci.

### ***Coefficients de corrélation et échelles de turbulence***

Le vent, par la dimension de ses bouffées et de ses rafales, possède une échelle « spatio-temporelle ». On peut caractériser cette dimension dynamique du vent par des échelles de turbulence, qui sont à relier avec la dimension des objets affectés par le vent.

D'une manière générale, afin de traduire la concomitance entre deux composantes de la vitesse du vent en deux points P et P' et à deux instants t et t+τ, on introduit la notion statistique de coefficient de corrélation défini par :

$$\rho_{u_i, u_j}(P, P', \tau) = \frac{1}{T} \int_0^T u_i(t) u_j(t + \tau) dt \quad u_i, u_j = u, v, w$$

vérifiant notamment l'inégalité  $-\sigma_{u_i} \sigma_{u_j} < \rho_{u_i, u_j} < \sigma_{u_i} \sigma_{u_j}$

Dans la plupart des cas, on se limite au cas où  $i = j$  ; on parle alors de corrélations spatiales ( $\tau = 0$ ), temporelles ( $P = P'$ ), ou spatio-temporelles ( $\tau \neq 0, P \neq P'$ ) pour une composante de vent donnée. Ces dernières permettent notamment de définir les notions d'échelles de turbulences qui, physiquement, caractérisent les dimensions spatiales des plus gros tourbillons, mathématiquement, les distances à partir desquelles deux signaux, en deux points de l'espace, ne sont plus corrélés :

$$L_{u_i}^x(P) = \bar{U} \int_0^\infty \rho_{u_i}(P, P, \tau) d\tau \quad u_i = u, v, w$$

$$L_{u_i}^y(P) = \int_0^\infty \rho_{u_i}(y_P, y_P + \Delta y, 0) d\Delta y \quad u_i = u, v, w$$

$$L_{u_i}^z(P) = \int_0^\infty \rho_{u_i}(z_P, z_P + \Delta z, 0) d\Delta z \quad u_i = u, v, w$$

On remarquera que l'échelle de turbulence suivant la direction moyenne du vent  $L_{u_i}^x$  se calcule en faisant varier le temps plutôt que la distance.

Actions du vent sur les ouvrages - Effets dynamiques.

Maîtrise de Mécanique - Université de Nantes - décembre 2003

Inversement, la connaissance expérimentale des valeurs  $L_{u_i}^x, L_{u_i}^y, L_{u_i}^z$ , permet d'estimer la corrélation spatiale par la formule empirique suivante :

$$\rho_i(\mathbf{P}, \mathbf{P}', 0) \approx \exp \left( - \sqrt{ \left( \frac{\Delta x}{L_{u_i}^x} \right)^2 + \left( \frac{\Delta y}{L_{u_i}^y} \right)^2 + \left( \frac{\Delta z}{L_{u_i}^z} \right)^2 } \right) \quad u_i = u, v, w$$

$$\Delta x = x - x' \quad \Delta y = y - y' \quad \Delta z = z - z'$$

Ces échelles augmentent avec la hauteur et diminuent avec la rugosité. Elles sont l'expression statistique des dimensions des tourbillons qui constituent la turbulence : les fortes rugosités (bâtiments, arbres, ...) « éclatent » les gros tourbillons en plus petits et réduisent donc les échelles de turbulence, et cela d'autant plus que l'on est proche du sol. Il y a en quelque sorte « dégradation » de l'énergie cinétique du vent en énergie cinétique turbulente.

Pour un vent de type « bocage, banlieue » les échelles de turbulence ont les ordres de grandeur suivants à l'altitude  $z = 25$  m :

$$L_u^x \cong 120 \text{ mètres}$$

$$L_u^y \cong 60 \text{ mètres}$$

$$L_u^z \cong 40 \text{ mètres}$$

### **Densités (inter)spectrales de puissance**

Plutôt que de travailler directement avec les fonctions de corrélation, on préfère manipuler leurs transformées de Fourier, appelées densités (inter)spectrales de puissance. Dans le cas particulier où  $i = j$  et  $P = P'$ , on parle simplement de densité spectrale de puissance  $S_u(n)$  ; celle-ci représente la répartition de l'énergie turbulente en un point  $P$  donné et pour une composante  $i$  donnée en fonction de la fréquence  $n$ . Dans les cas plus généraux où  $i \neq j$  et/ou  $P \neq P'$ , les densités inter-spectrales de puissance indiquent, pour chaque gamme de fréquence, avec quel degré de corrélation l'énergie cinétique est fournie à deux signaux distincts.

La densité spectrale d'une composante de la turbulence est reliée à l'écart type de cette composante :

$$\sigma_u^2 = \int_0^{\infty} S_u(n) \cdot dn \quad \sigma_u^2 = \int_0^{\infty} S_u(n) dn$$

Cette densité spectrale est fonction de la hauteur et de la rugosité. La gamme de fluctuation du vent en vraie grandeur s'étend du continu à quelques Hertz. L'excitation du mode propre d'une construction à la fréquence  $n_0$  sera d'autant plus forte que le contenu spectral du vent à cette fréquence,  $S_u(n_0)$ , sera grand.

Il existe de nombreuses formulations de la densité spectrale du vent. L'une des plus utilisée est celle de Von Karman :

$$\frac{n S_u(n)}{\sigma_u^2} = \frac{4f}{(1 + 70.8f^2)^{5/6}} \quad \text{avec } f = \frac{nL_u^x}{U_z}$$

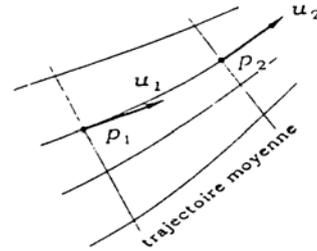
Actions du vent sur les ouvrages - Effets dynamiques.

Maîtrise de Mécanique - Université de Nantes - décembre 2003

## 2. CONTOURNEMENT D'UNE CONSTRUCTION PAR LE VENT ET CHAMP DE PRESSION INDUIT

### Equation de Bernoulli

Le vent étant un écoulement non visqueux, il suit une équation de Bernoulli simplifiée. Celle-ci indique que, sur une trajectoire moyenne, d'un point à un autre, la somme de la pression locale  $P$  (ou pression statique) et de la pression dynamique  $\frac{1}{2}\rho\bar{U}^2$  va rester constante.



$$P_1 + \frac{1}{2}\rho\bar{U}_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho\bar{U}_2^2$$

Une augmentation de vitesse est accompagnée d'une chute de pression et réciproquement.

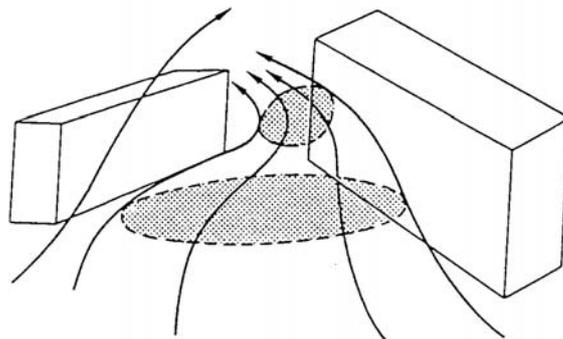
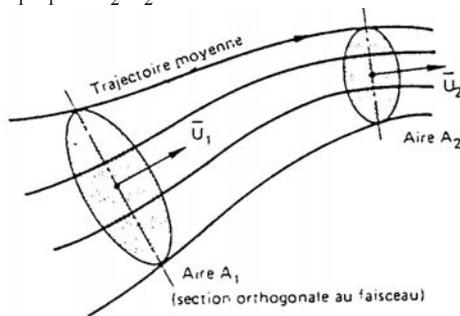
Dans les problèmes d'aérodynamique de la couche limite atmosphérique, les termes de pesanteur sont négligeables et la masse volumique de l'air constante, exception faite des effets de la pression atmosphérique et de la température.

### Principe de conservation de la masse

Les trajectoires moyennes (tangentes à la vitesse moyenne en tous points) évoluent spatialement d'une zone de pression à une autre, et peuvent s'épanouir ou se resserrer (présence d'une paroi, par exemple).

On peut introduire la notion de faisceau ou tube de courant moyen qui regroupe un certain nombre de lignes de trajectoire moyenne. Le principe de la conservation de la masse indique que le débit massique moyen se conserve tout au long d'un tube de courant. Ainsi, pour l'air que l'on considère comme un fluide incompressible (dans la gamme des vitesses du vent), nous obtenons entre les sections 1 et 2 :

$$A_1\bar{U}_1 = A_2\bar{U}_2$$



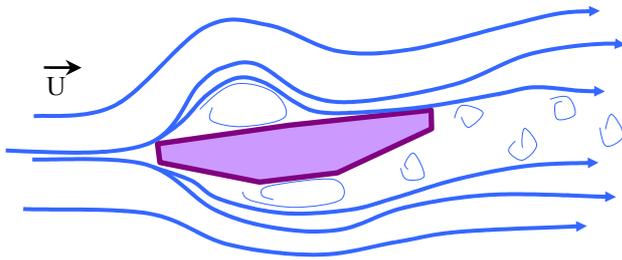
Une application concrète de ce résultat est la formation d'une zone de survitesse au niveau de l'étranglement constitué par deux bâtiments dessinant un angle ouvert au vent. Ce phénomène est habituellement appelé "effet Venturi".

### 2.1. Contournement d'une construction par le vent

Tout obstacle perturbe, par sa présence, l'écoulement du vent, en l'obligeant à le contourner. Ce contournement se fera différemment suivant la géométrie de l'obstacle et ses dimensions par rapport à l'échelle de la turbulence. On distingue les régions schématisées ci-après :

Actions du vent sur les ouvrages - Effets dynamiques.

Maîtrise de Mécanique - Université de Nantes - décembre 2003

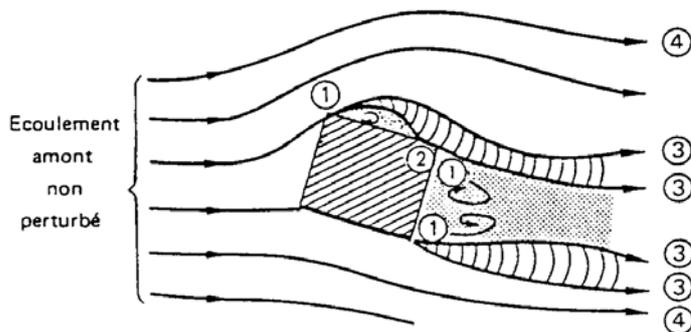


Contournement d'un tablier de pont

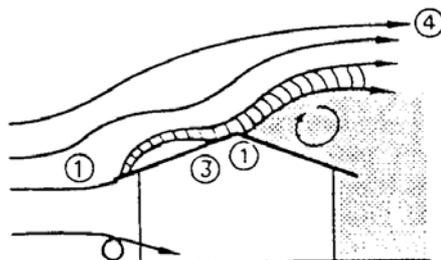
Les filets fluides sont désorganisés par la présence de l'obstacle : l'écoulement décolle au niveau des arêtes vives et peut venir se rattacher sur la forme. Au niveau de la paroi, les phénomènes visqueux sont prépondérants et induisent des forces de cisaillement particulièrement élevées. Sauf sur les formes profilées (rares dans le milieu bâti), on ne peut pas parler de développement de couche limite, les aspérités de surface venant perturber les écoulements de paroi. Par contre au-delà des zones de décollement, on identifie bien une couche de cisaillement qui vient délimiter le sillage où apparaissent de larges mouvements tourbillonnaires.

La turbulence du sillage vient se combiner à la turbulence amont et finit (loin à l'aval, environ 10 fois les dimensions latérales de l'obstacle) par disparaître. On retrouve alors les caractéristiques générales de l'écoulement amont.

Les mêmes principes s'appliquent autour de tous les objets bâtis, qui sont généralement à arêtes vives, mais aussi autour des corps profilés.



- ① Points de décollement
- ② Points de recollement
- ③ Lignes de séparation
- ④ Lignes de flux moyen ou trajectoire moyenne
- Zone décollée avec recirculation
- Sillage et circulation tourbillonnaires
- Couche de cisaillement : zone de mélange entre l'écoulement moyen et le sillage



Actions du vent sur les ouvrages - Effets dynamiques.

Maîtrise de Mécanique - Université de Nantes - décembre 2003

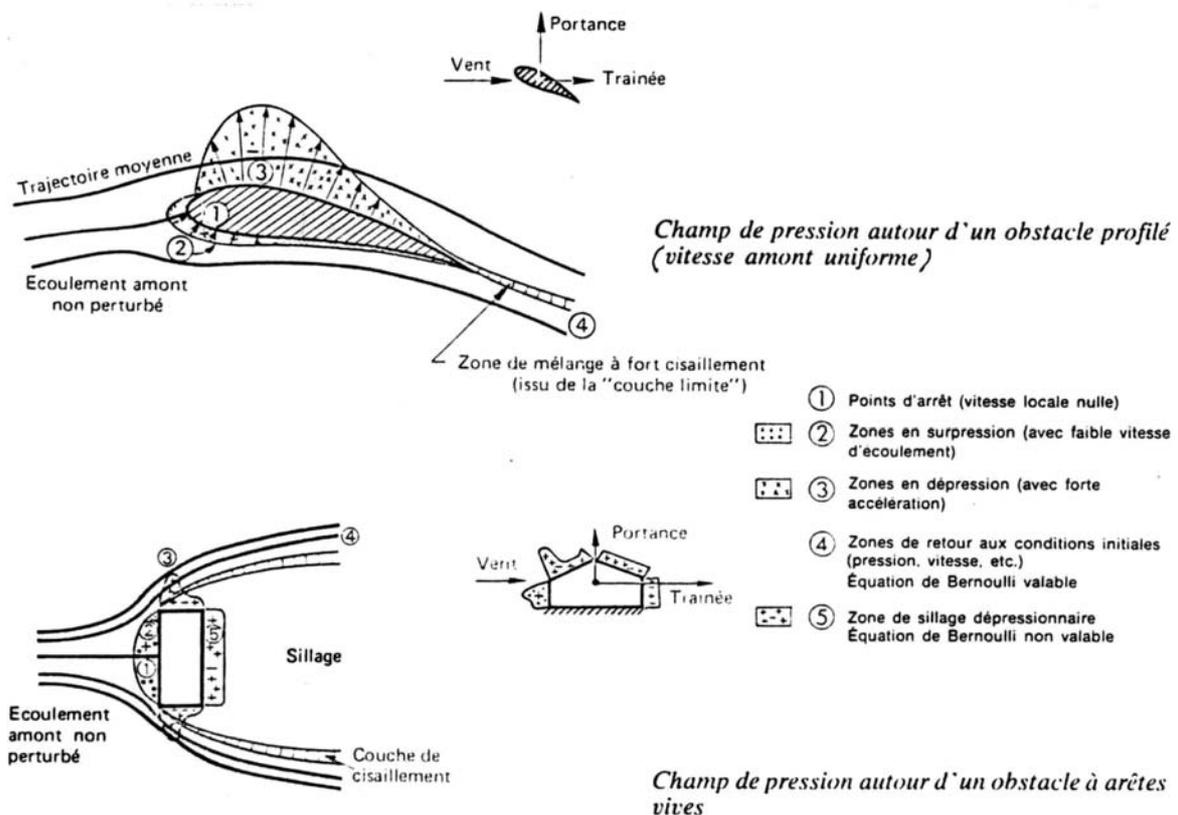
La schématisation présentée ne doit pas être vue comme un état figé, mais plutôt comme une situation moyenne (dans le temps), autour de laquelle l'ensemble fluctue plus ou moins suivant les zones. On peut noter le caractère particulièrement instable des zones de recollement ou des lignes de séparation. Dans le sillage, les mouvements tourbillonnaires ont des échelles caractéristiques liées aux dimensions de la construction et non plus à celles du vent naturel.

Dans le cas de structures poreuses (30 à 40 %) le sillage est constitué d'une turbulence à très petite échelle créée par les éléments individuels de la structure (cubes, cornières...) qui se mélange rapidement à la turbulence incidente.

## 2.2. Champ de pression et coefficients de pression

Le niveau des pressions et leur distribution sur un obstacle résultent de l'interaction entre l'écoulement incident (gradient de vitesse moyenne, caractéristiques de la turbulence etc...), l'obstacle (par le jeu de sa forme, de ses dimensions, de sa rugosité de surface) et les obstacles environnants (ou environnement proche).

Les champs de pression mesurés sur deux formes d'obstacles très dissemblables sont illustrés ci-après :

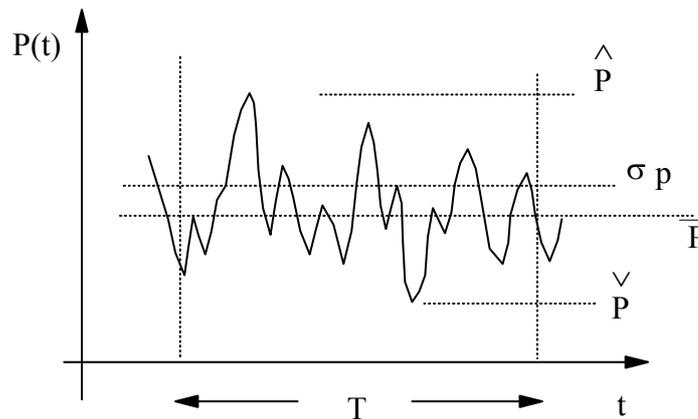


Il y a en général plus de zones en dépression (forces d'arrachement) qu'en surpression (enfouissement) sur l'obstacle. Les dépressions les plus fortes apparaissent dans les zones détachées notamment à l'aval des arêtes mais ces zones sont relativement réduites en surface, par contre les zones de sillage sont plus homogènes avec des dépressions plus modérées.

La pression  $P(t)$  que l'on observe en un point d'une façade est fluctuante dans le temps. C'est une fonction aléatoire, que l'on peut décrire en termes statistiques, notamment par sa moyenne  $\bar{P}$ , par son écart-type  $\sigma_P$ , sa distribution statistique, etc...

Actions du vent sur les ouvrages - Effets dynamiques.

Maîtrise de Mécanique - Université de Nantes - décembre 2003



Signal instantané de pression généré par le vent

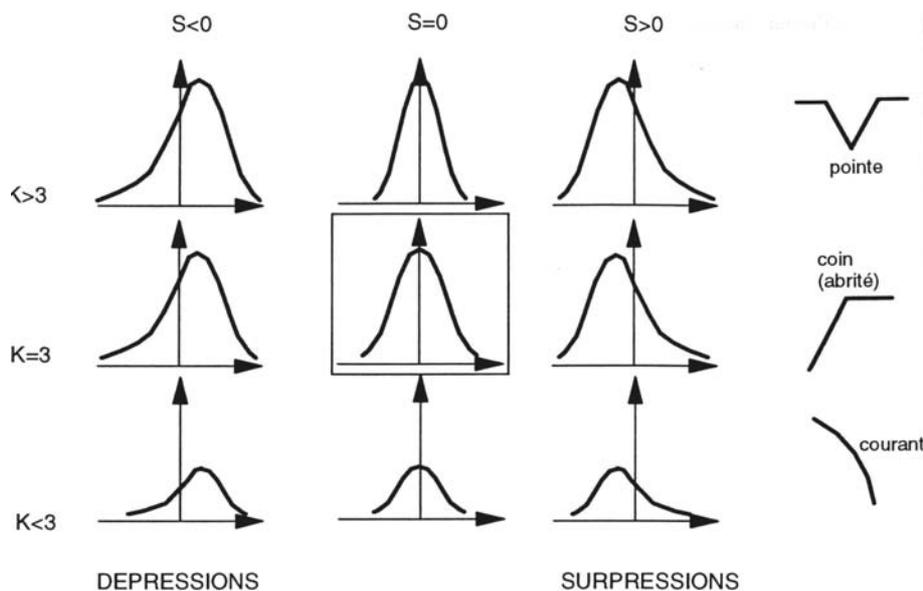
La moyenne et l'écart-type de cette fonction aléatoire peuvent être estimés par les relations suivantes, où  $T$  désigne une séquence de durée suffisamment longue (10 minutes à 1 heure).

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt$$

$$\sigma_p^2 = \frac{1}{T} \int_0^T (P(t) - \bar{P})^2 dt$$

Par convention, l'origine des pressions est prise égale à la pression atmosphérique.

On remarque généralement que, si le vent est approximativement gaussien, les pressions qu'il engendre ne le sont pas obligatoirement. Ainsi les zones en dépression, derrière une arête vive, ont habituellement une fonction de répartition non symétrique autour de la valeur moyenne, avec des pointes de pressions négatives très importantes. Cet aspect trouve sa meilleure application dans les études à la fatigue des composants du bâtiment (bardages, fenêtres, vêtements, ...) et dans le calcul prévisionnel des sollicitations extrêmes, la pression maximum  $\hat{P}$  atteinte au cours de la séquence de durée  $T$ , où la pression minimum  $\tilde{P}$ .



Allure de la fonction de répartition de la pression selon la zone concernée sur un bâtiment,  $S$ =skewness,  $K$ =kurtosis.

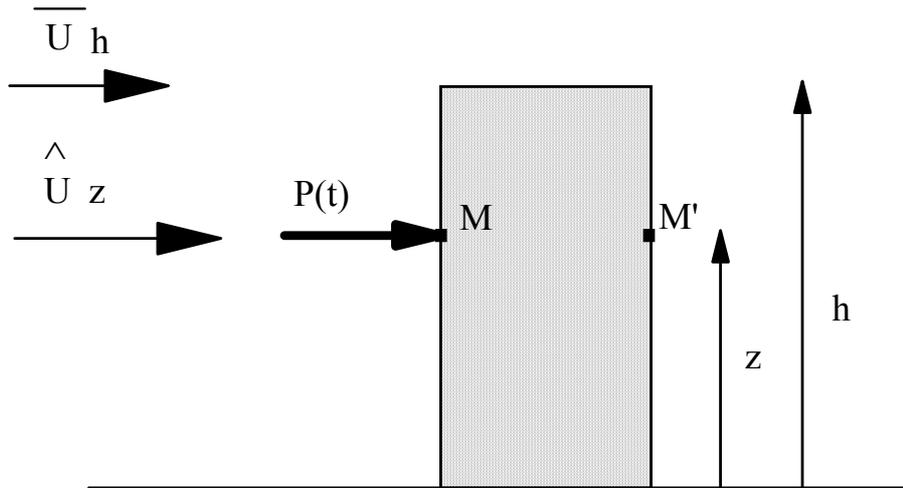
Actions du vent sur les ouvrages - Effets dynamiques.

Maîtrise de Mécanique - Université de Nantes - décembre 2003

Toutes ces variables sont évidemment reliées à la vitesse du vent. Mais on sait que cette vitesse est elle-même une fonction aléatoire du temps, qui dépend de la hauteur  $z$  au-dessus du sol et de la rugosité du terrain. Il est donc nécessaire de choisir conventionnellement une variable de référence caractérisant l'écoulement.

Soit  $U_{ref}$  cette vitesse de référence que l'on peut relier à la vitesse météorologique de référence définie précédemment par la loi logarithmique.

Selon le cas, on retient la vitesse moyenne  $\bar{U}_h$  à une hauteur  $h$  égale à celle de la construction ou à une autre hauteur pour des raisons de commodité de mesure en soufflerie à couche limite ; ou encore la vitesse de pointe  $\hat{U}_z$  à la hauteur  $z$  du point  $M$  où l'on étudie la pression aérodynamique. Cette dernière convention est très généralement adoptée dans les codes de calcul.



Pression sur un bâtiment pour une vitesse de référence  $U_{ref}$

Les relations de similitude amènent à rapporter les pressions observées à la pression dynamique de référence

$$q_{ref} = \frac{1}{2} \rho U_{ref}^2 \text{ correspondant à la vitesse de référence choisie}$$

*Rappel : dans le système S.I, les vitesses sont exprimées en m/s et les pressions en Pascal ( $P_a$  ou  $N / m^2$ ).*

On définit ainsi un coefficient de pression  $C_p(t)$ , généralement indépendant de la vitesse du vent et caractéristique de la construction considérée, de la rugosité du sol et du point de la façade où l'on observe la pression :

$$C_p(t) = \frac{P(t)}{q_{ref}}$$

Ce coefficient de pression est, par nature, sans dimension. Mais, comme la pression  $P(t)$ , c'est une fonction aléatoire du temps  $t$ , que l'on décrit en termes statistiques par sa moyenne  $\bar{C}_p$ , son écart-type  $\sigma_{C_p}$ , sa valeur maximum  $\hat{C}_p$  ou minimum  $\check{C}_p$  au cours d'une séquence de durée  $T$ .

$$\bar{C}_p = \frac{\bar{P}}{q_{ref}} \quad \hat{C}_p = \frac{\hat{P}}{q_{ref}}$$

$$\sigma_{C_p} = \frac{\sigma_P}{q_{ref}} \quad \check{C}_p = \frac{\check{P}}{q_{ref}}$$

Actions du vent sur les ouvrages - Effets dynamiques.

Maîtrise de Mécanique - Université de Nantes - décembre 2003

Les valeurs extrêmes  $\hat{C}_p$  et  $\check{C}_p$  intéressent particulièrement les constructeurs qui doivent dimensionner les éléments de façade et de couverture en fonction des pressions extrêmes qu'ils auront à subir.

### 2.3. Coefficients aérodynamiques

Le champ de pression s'exerçant sur un obstacle induit globalement un torseur d'efforts où l'on considère généralement :

- une force de poussée (ou traînée)  $F_x$ , parallèle à la direction moyenne de l'écoulement, supposée dans le plan horizontal ;
- une force de dérive  $F_y$ , perpendiculaire à la direction de l'écoulement et dans le plan horizontal ;
- une force de portance  $F_z$ , verticale et perpendiculaire à la direction moyenne de l'écoulement.

Ces forces sont présentées sous forme d'un ensemble de coefficients de force adimensionnels, de traînée ( $C_x$ ), de dérive ( $C_y$ ) et de portance ( $C_z$ ) de la forme :

$$C_{x,y,z} = \frac{F_{x,y,z}}{q_{\text{ref}}A}$$

où A est une surface de référence. Conventionnellement, on la choisit représentative des dimensions de l'obstacle, par exemple l'aire de la projection frontale ou "maître couple".

Si l'on considère les moments  $M_x$ ,  $M_y$  et  $M_z$  associés à ces forces par rapport à un système d'axes, on définira les coefficients de moments sous la forme :

$$CM_{x,y,z} = \frac{M_{x,y,z}}{q_{\text{ref}}AL}$$

où L est une longueur supplémentaire de référence.

Dans le cas d'écoulements turbulents comme le vent naturel, on caractérise statistiquement ces coefficients de forces et de moments de la même manière que pour les coefficients de pression.

Les pressions aérodynamiques et les efforts résultants, tout comme le vent naturel, sont des fonctions aléatoires. A la différence de certaines pressions locales, les efforts globaux engendrés par les pressions gardent généralement, et hormis effet particulier, le caractère gaussien du vent naturel.

*Remarque : Outre les forces de pressions qui induisent une traînée de pression, il existe également, du fait de l'action de la viscosité à la paroi, une force de frottement et par suite une traînée de frottement qui vient s'ajouter à celle déjà évoquée. Néanmoins, sur les bâtiments plongés dans la couche limite atmosphérique, même de forme arrondie, la traînée de frottement est au moins dix fois plus petite que celle de pression sauf pour des constructions de grandes superficies (les toitures terrasse d'hypermarchés par exemple).*

### 2.4. Etude des sillages - influence du nombre de Reynolds

Les écoulements qui se développent au contournement des obstacles, et en particulier dans la zone de sillage, ainsi que la distribution associée des pressions autour de l'obstacle, sont liés à la valeur du nombre de Reynolds (1).

$$\Re_D = \frac{\bar{U}D}{\nu}$$

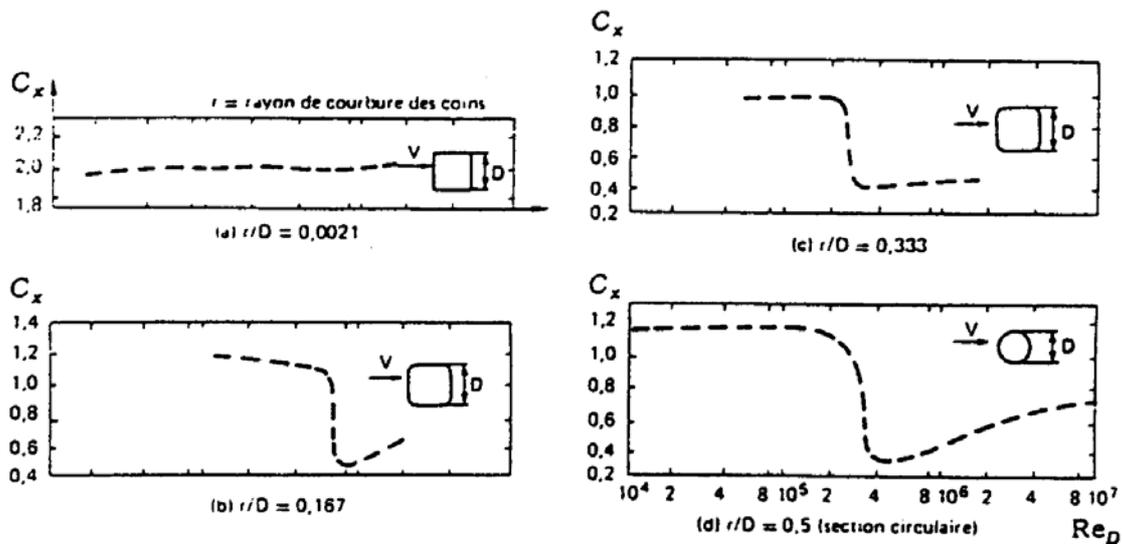
où D est une dimension caractéristique de l'obstacle et  $\nu$  la viscosité cinématique du fluide ( $\nu \cong 15.10^{-6} \text{ m}^2$  pour l'air).

Actions du vent sur les ouvrages - Effets dynamiques.

Maîtrise de Mécanique - Université de Nantes - décembre 2003

Ce nombre exprime le rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité. Cependant, on peut montrer que dans le cas des formes à angles vifs, le processus de décollement est déclenché par la présence des coins ou arêtes vives et les écoulements de contournement sont alors fixés par la géométrie de l'obstacle indépendamment du nombre de Reynolds (figure ci-après).

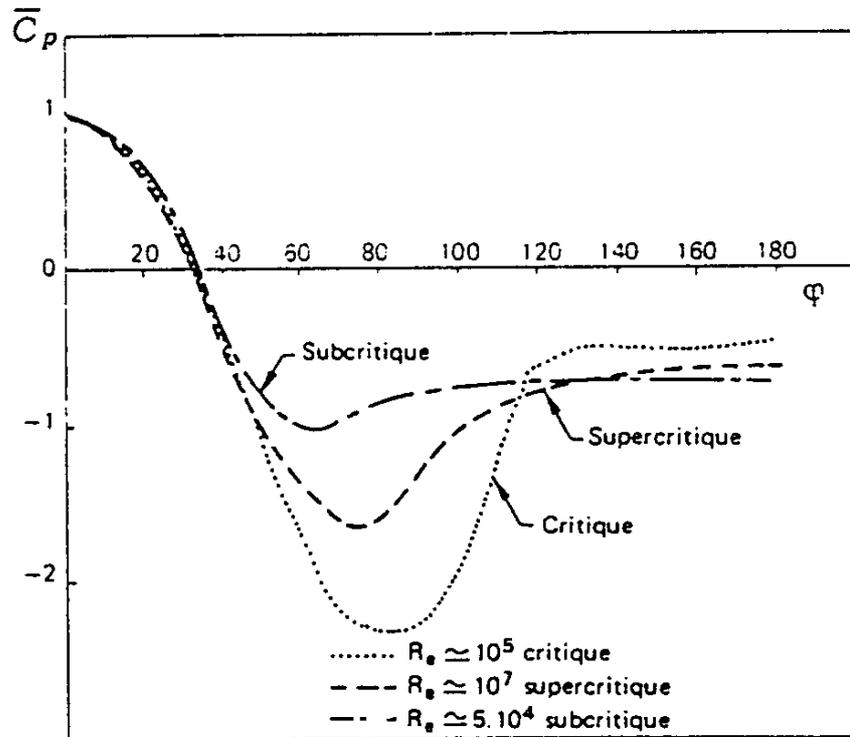
- (1) Osborne Reynolds 1842-1912 ingénieur anglais qui travailla sur les régimes d'écoulement des liquides et fluides visqueux en 1883. Il montra entre autre l'existence d'une vitesse critique (transition écoulement laminaire/écoulement turbulent) et l'importance du rapport  $\frac{\bar{U}D}{\nu}$ .



- (2)

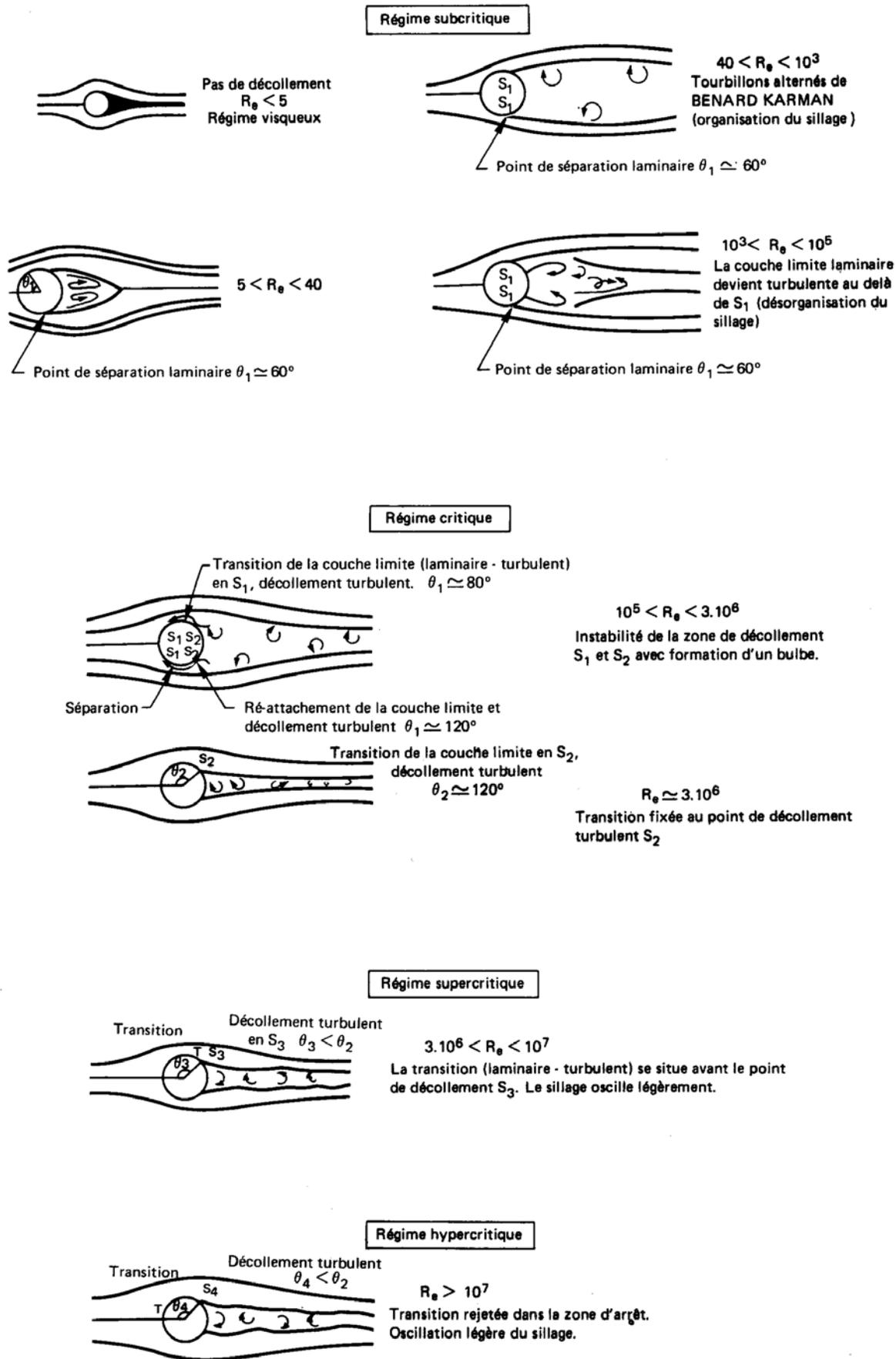
**Influence du nombre de Reynolds et de la forme sur le coefficient de traînée d'un obstacle lisse et bidimensionnel (d'après FAGE A. et WARSAP J.H. - 1930)**

Par contre, dès que les formes sont arrondies ou profilées, le décollement, l'expansion et la largeur du sillage ainsi que le champ de pression sont largement gouvernés par le nombre de Reynolds  $Re_D$  (figure ci-dessous).



### Répartition des coefficients de pression sur un cylindre pour différents régimes d'écoulement

Différents régimes d'écoulements apparaissent en fonction du nombre de Reynolds. Cela se traduit par des distributions de pression très différentes, une évolution de la position du décollement et surtout une organisation du sillage très évolutive comme le montre la figure ci-après.



**Différents régimes d'écoulements autour d'un cylindre infini en fonction du nombre de Reynolds**

Actions du vent sur les ouvrages - Effets dynamiques.

On note en particulier que le régime critique se caractérise par un sillage plus large et par des instabilités de la zone de décollement. Sur les courbes de répartition de pression cela s'accompagne par des dépressions très importantes autour de  $80^\circ$  et une réduction de la "dépression de culot" au-delà de  $120^\circ$ .

Dans le sillage apparaissent des organisations plus ou moins périodiques, telles que le détachement tourbillonnaire alterné (tourbillons de Bénard-Karman, voir aussi paragraphe 3.5.1 du cours), qui sont liées en grande partie au nombre de Reynolds de l'écoulement.

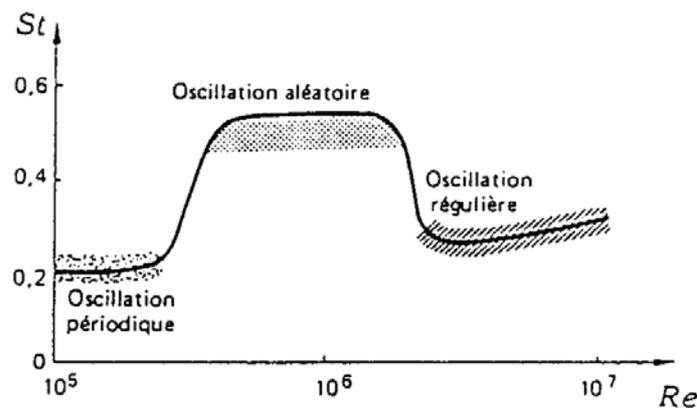
Le nombre de Strouhal caractérise ce phénomène tourbillonnaire dans les sillages :

$$St = \frac{nL}{\bar{U}}$$

où  $L$  est une dimension caractéristique de l'obstacle, orthogonale à la direction de la vitesse moyenne  $\bar{U}$  et  $n$  est la fréquence correspondant à une "allée" de tourbillons alternés bien développée.

Dans le cas d'un écoulement uniforme et pour un cylindre, le nombre de Strouhal est voisin de 0.2 en régime subcritique, et de 0.5 en régime critique (figure suivante).

Au-delà, il retombe aux environs de 0.26 - 0.30 avec la réorganisation des oscillations du sillage.



### Relation entre le nombre de Strouhal et le nombre de Reynolds pour un cylindre (L.R.WOOTON et C.SCRUTON 1971)

A l'aval des formes à angles vifs, le phénomène est observable de la même façon malgré l'indépendance du nombre de Reynolds. Le nombre de Strouhal évolue grossièrement entre 0.12 et 0.16.

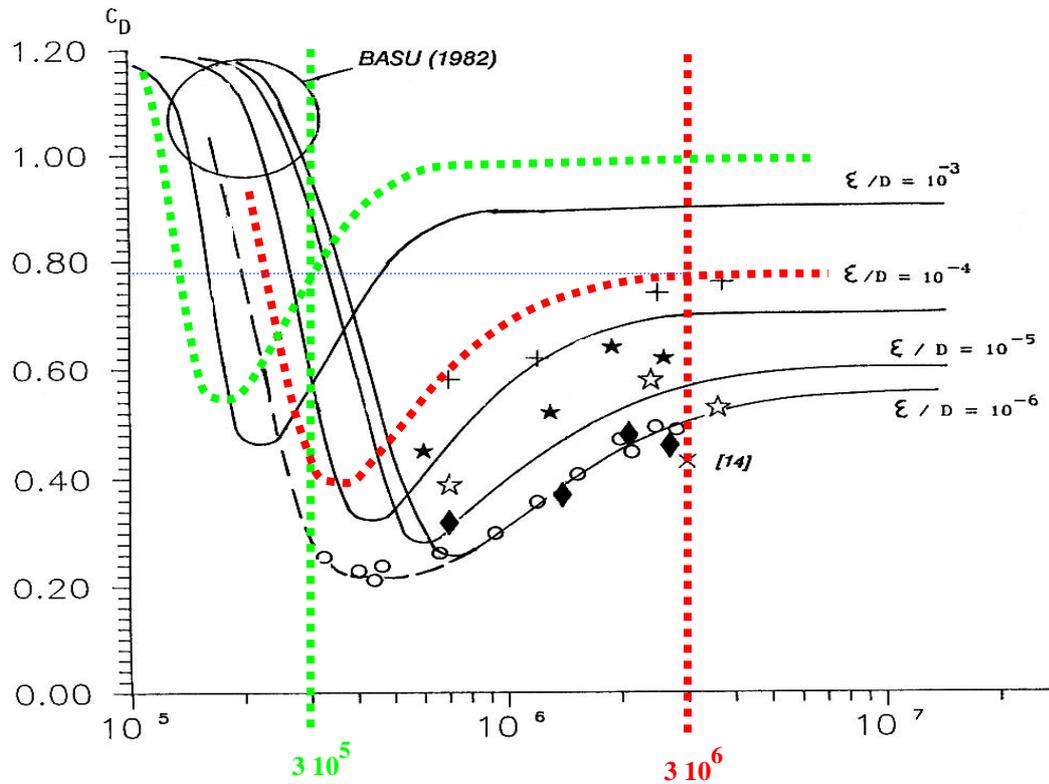
Il subsiste une réelle incertitude quant à l'existence de ce type d'organisation pour les grands nombres de Reynolds et au mécanisme d'amorçage du système.

En conséquence, dans le cadre de l'étude des sillages de formes plongées dans l'écoulement turbulent qu'est le vent, il faut avoir présent à l'esprit la potentialité d'une organisation plus ou moins régulière.

Dans le cas des structures élancées, le phénomène peut devenir spectaculaire lorsque la fréquence propre de la structure correspond sensiblement à la fréquence privilégiée du sillage (Strouhal).

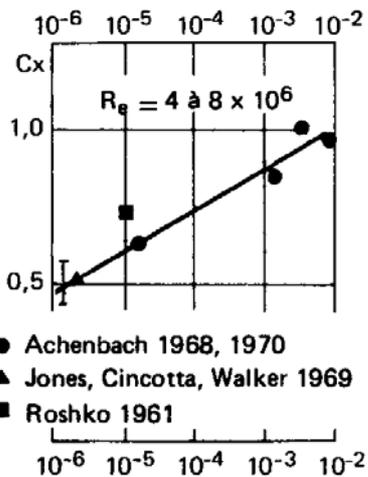
Enfin, il faut souligner que la rugosité de surface de l'obstacle vient se conjuguer à l'influence du nombre de Reynolds décrite ci-dessus. Ainsi, plus la rugosité de paroi est importante, plus le nombre de Reynolds correspondant au régime critique est faible. Tout se passe comme si la rugosité augmentait le nombre de Reynolds "effectif".

*Remarque : La reproduction en soufflerie de grands nombres de Reynolds sur les formes rondes utilise largement ce principe (voir chapitre 5.2). Les maquettes sont « rugosifiées » artificiellement pour reproduire en soufflerie un régime d'écoulement à la paroi correspondant à celui de la vraie grandeur.*



Evolution du coefficient de traînée pour un cylindre lisse ou rugueux en fonction du nombre de Reynolds de l'écoulement

Dimension de la rugosité rapportée au diamètre du cylindre



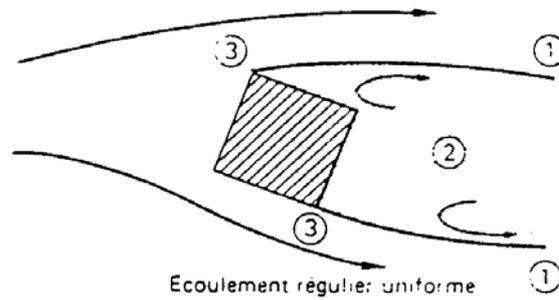
Coefficient de traînée d'un cylindre en fonction de la rugosité de surface à des nombres de Reynolds élevés

## 2.5. Rôle de la turbulence

Une augmentation de turbulence se traduit systématiquement par une accélération des mélanges, notamment dans les couches limites ou les couches de cisaillement.

Il en résulte l'apparition, pour des nombres de Reynolds moins élevés, des phénomènes de transition ou de régimes critiques (formes rondes) ; de même, l'expansion et la dissipation des sillages et des couches de cisaillement se font différemment. Des zones de recollement peuvent apparaître sur les corps (leur formation est liée aux dimensions relatives de l'obstacle et de la turbulence).

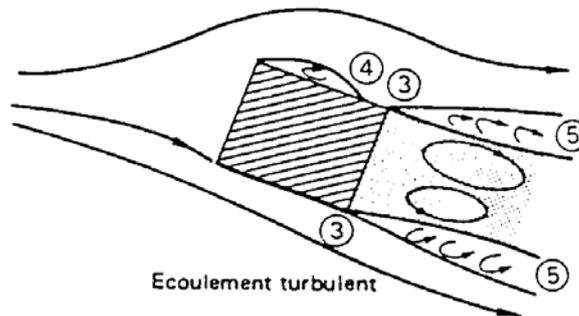
La figure ci-contre schématise le contournement que l'on peut observer autour d'un obstacle à arêtes vives en fonction des caractéristiques du flux incident.



Écoulement régulier: uniforme

### Légende

- ① Ligne de séparation
- ② Sillage et circulation tourbillonnaires
- ③ Point de décollement
- ④ Point de recollement
- ⑤ Epaissement des limites de séparation entre le sillage et l'écoulement



Écoulement turbulent

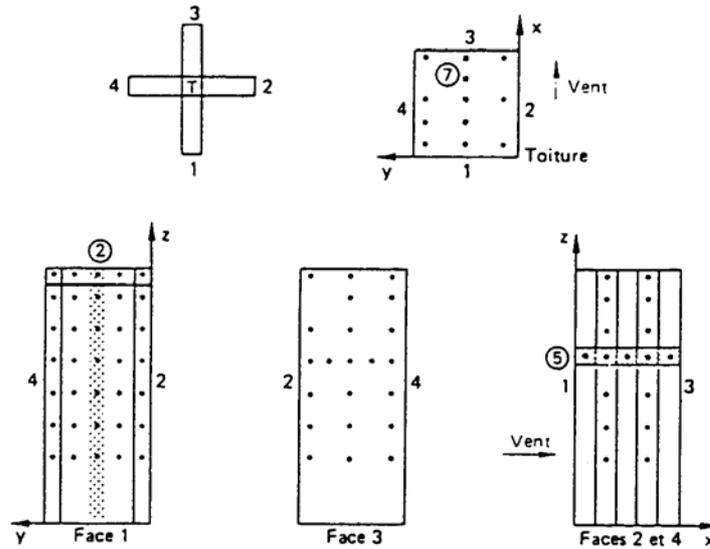
Au niveau des écoulements entre bâtiments et des phénomènes d'interaction correspondants, le champ de vitesse résultant va être directement influencé par la turbulence incidente.

De même, le champ de pression autour d'un obstacle ou d'un bâtiment va se trouver modifié par le jeu de la turbulence.

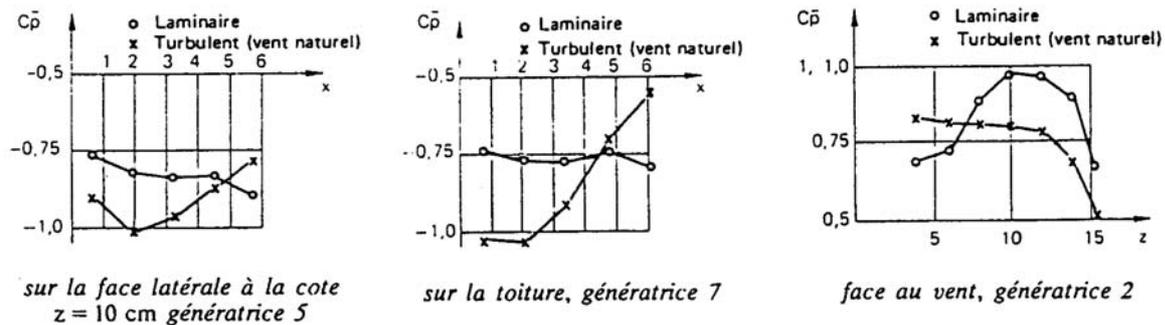
La figure ci-dessous donne sur plusieurs génératrices d'une tour R + 15 les coefficients de pression moyenne :

$$\bar{C}_{p_z} = \frac{\bar{p}}{\frac{1}{2}\rho\bar{U}_z^2}$$

pour un écoulement laminaire et une turbulence reproduisant le vent naturel. Les divergences sont éloquents.

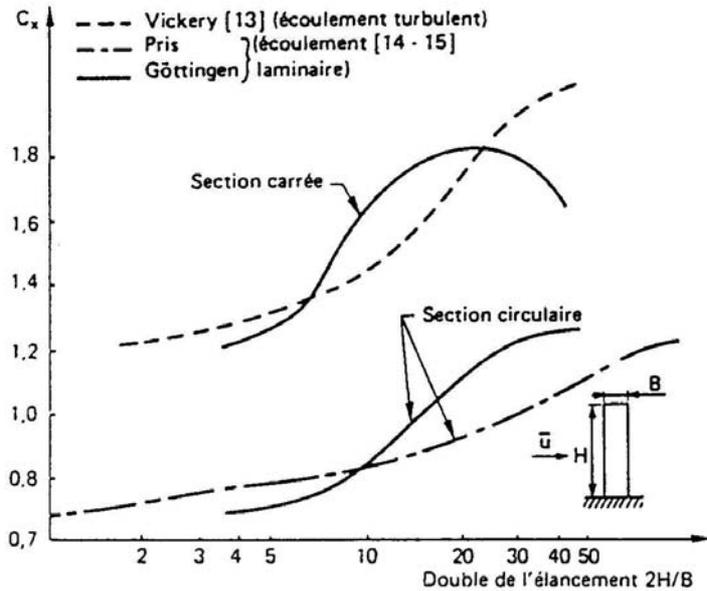


Maquette d'une tour R + 15 : position des prises de pression et zones par faces



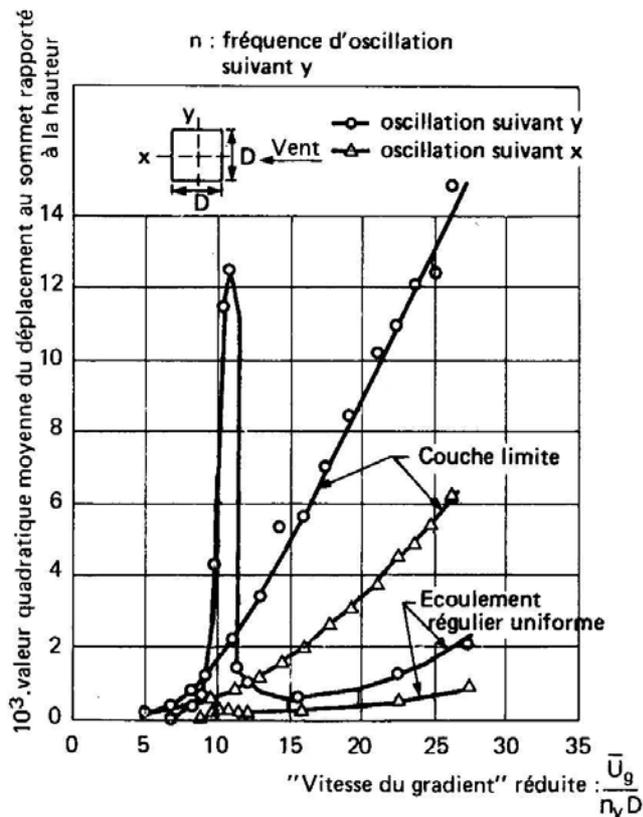
### Coefficients de pression moyenne

Sous l'angle global de la forme, la traînée moyenne se trouve directement affectée par la nature turbulente de l'écoulement (exemple d'un bloc à section carrée, puis à section circulaire pour un écoulement laminaire et un écoulement turbulent). L'influence de cette dernière devient encore plus démonstrative dès que l'on aborde le problème de la réponse dynamique des structures. Les oscillations d'une structure aéroélastique à section carrée (élancement 7, amortissement rapporté à l'amortissement critique  $\sim 1\%$ ) sont déterminées par la turbulence de l'écoulement.



Ces quelques exemples mettent en évidence l'importance fondamentale du paramètre turbulence. Lors des études des effets du vent autour des bâtiments (champ de pression) ou sur les structures (effets locaux ou globaux), il sera donc indispensable de tenir compte de la turbulence et de sa reproduction correcte en laboratoire pour les études expérimentales sur maquettes (voir cours « interaction fluide-structure expérimentale »).

### Influence de la turbulence sur le coefficient de traînée $C_x$ d'une tour à section carrée et d'une tour à section circulaire



### Réponse d'un parallélépipède d'élanement 7 dans une couche limite turbulente et dans un écoulement régulier uniforme

(amortissement rapporté à l'amortissement critique  $\sim 1\%$ )

Actions du vent sur les ouvrages - Effets dynamiques.

### 3. EFFETS DYNAMIQUES DU VENT

La grande majorité des structures et constructions usuelles ont des déplacements négligeables sous l'action du vent et peuvent donc être considérées comme raides. La structure développe alors des forces résistantes qui, à chaque instant, s'opposent exactement aux forces aérodynamiques. Le dimensionnement au vent consiste alors à estimer les actions globales induites par les pressions aérodynamiques qui s'appliquent sur la « peau » de la construction. Par exemple, on calculera la force totale de soulèvement d'une couverture pour dimensionner une charpente, un moment fléchissant ou la force horizontale qui tend à renverser un bâtiment, etc...

Ces actions peuvent être estimées comme la combinaison de forces élémentaires. Par exemple, pour calculer la force horizontale totale due au vent, on imagine un découpage des façades au vent et sous le vent en éléments d'aire  $A_k$  et on additionne algébriquement (c'est-à-dire en tenant compte du sens dans lequel s'exercent les pressions) les forces  $F_k(t)$  s'exerçant sur ces éléments.

Plus généralement, en désignant par  $\beta_k$  le coefficient d'influence de la force élémentaire  $F_k$  pour l'action d'ensemble  $F$  considérée, on a :

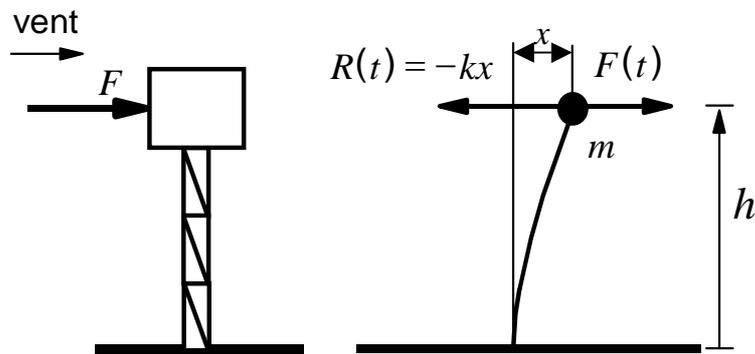
$$F(t) = \sum_k \beta_k F_k(t) = \sum_k \beta_k A_k P_k(t)$$

L'action d'ensemble  $F(t)$ , somme pondérée de fonctions aléatoires, est donc elle-même une fonction aléatoire.

Cependant les constructions modernes sont de plus en plus élancées et légères, on peut alors observer des déplacements importants de celles-ci (quelquefois supérieurs au mètre pour les très grands ponts) avec un caractère vibratoire marqué : la construction présente un comportement dynamique en répondant selon ses modes de vibration. Cette participation dynamique observée sur les constructions "souples" s'ajoute aux effets statiques et quasi-statiques considérés jusqu'à présent. Dans les cas extrêmes, elle peut représenter l'essentiel de la réponse avec des déplacements de l'ouvrage quasi-sinusoïdaux : ce sont bien sûr des situations que l'on cherche à éviter. Pour les constructions "souples", les forces d'inertie ne sont plus négligeables et doivent être considérées dans l'étude de la structure.

#### 3.1. Système à un degré de liberté

Considérons le cas simple d'un réservoir porté par un pylône de masse et de "prise au vent" supposées négligeables devant celles du réservoir lui-même :



Le vent turbulent exerce sur le réservoir la force  $F(t)$ , fluctuante dans le temps. Le réservoir se déplace de la quantité  $x(t)$  comptée à partir de sa position de repos (sans vent). Ce déplacement génère une force élastique de rappel  $R(t)=-kx$ .

En négligeant pour le moment les forces dissipatives d'amortissement, on peut écrire la relation fondamentale de la mécanique :

$$F + R = m\ddot{x} \text{ ou } F - kx = m\ddot{x}$$

$$\ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2} \text{ désigne l'accélération}$$

L'ingénieur chargé du dimensionnement de l'ouvrage s'intéresse essentiellement, non pas à la force  $F$ , mais à la réaction élastique  $R$  (plus précisément aux valeurs extrêmes de cette réaction).

En effet,  $R$  est l'effort tranchant dans le pylône ;  $hR$  est le moment fléchissant à la base du pylône. L'état des contraintes extrêmes dans les matériaux constituant la structure est directement lié à la réaction  $R$ .

Dans le cas de constructions "raides", le terme d'inertie peut être négligé devant les forces  $F$  et  $R$ , de sorte que :

$$R = -kx \cong -F$$

On peut remarquer que le terme d'inertie est négligeable devant le terme de rappel élastique si

$$\left| \frac{m\ddot{x}}{kx} \right| \ll 1.$$

Cette condition est d'autant mieux remplie que la raideur  $k$  de construction est grande, à masse

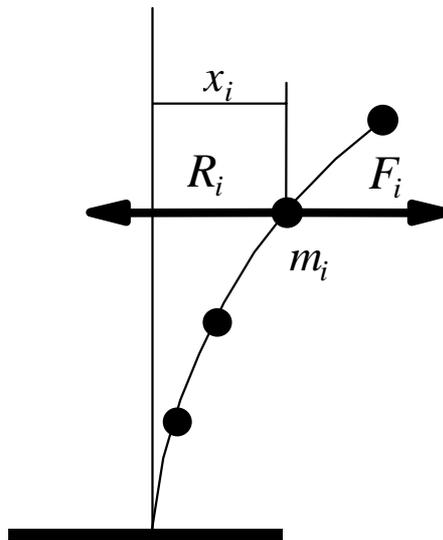
donnée. Le rapport  $\frac{k}{m}$ , qui fixe la fréquence propre de la construction  $\left( n_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \right)$ , joue donc

un rôle essentiel. Les constructions raides sont celles dont les fréquences propres sont élevées, en pratique supérieures à 1 ou 2 Hz. Les fluctuations de vitesse du vent, donc celles des forces aérodynamiques qui en résultent, se situent dans une gamme de fréquence inférieure. Par rapport à ces fluctuations, les constructions raides ont un temps de réponse faible : elles ont une réponse "quasi-statique" à ces fluctuations qu'elles suivent fidèlement.

Au contraire, les constructions "souples", dont les fréquences propres sont inférieures à 1 Hz ont une réponse plus complexe aux fluctuations temporelles des forces aérodynamiques auxquelles elles sont soumises : réponse "quasi-statique" aux fluctuations "lentes" (de basses fréquences par rapport aux fréquences propres) + réponse "résonante" aux fluctuations de fréquences égales aux fréquences propres ou proches d'elle.

### 3.2. Constructions élancées : modes propres

Considérons une construction verticale élancée, modélisée par un ensemble de  $n$  masses, schématisée sur la figure suivante :



Sur le tronçon  $i$  de masse  $m_i$  s'exercent :

- la force  $F_i$
- la force  $R_i$ , force résistante due à la structure qui s'oppose au déplacement.

Par application de la relation fondamentale de la mécanique, on obtient, en négligeant pour le moment les forces dissipatives d'amortissement les  $n$  équations différentielles suivantes (une par tronçon) :

$$F_i + R_i = m_i \ddot{x}_i$$

Les forces résistantes  $R_i$  sont liées linéairement aux  $n$  déplacements  $x_i$  de la structure, dans l'hypothèse habituelle d'un comportement élastique linéaire des matériaux.

Ces  $n$  équations différentielles ont donc l'inconvénient d'être "couplées", c'est-à-dire que le déplacement  $x_i$  n'intervient pas seul dans l'équation  $i$  : la force résistante  $R_i$  est une combinaison linéaire de tous les déplacements aux différents niveaux de la structure.

Pour traiter ce système de  $n$  équations différentielles, il est préférable de procéder à un changement de variables spécialement choisi pour simplifier l'étude. Ce changement de variables (base des "modes propres") fait passer des  $n$  déplacements  $x_i$  aux "coordonnées généralisées"  $y_j$  telles que le système soit transformé en un système équivalent d'équations différentielles "découplées" en  $y_j$ .

Chacune de ces nouvelles équations est de forme simple, caractérisant le comportement d'un système vibrant simple, à un seul degré de liberté.

Ces équations sont celles des modes propres de la structure.

A chacun de ces modes correspond la déformée ; c'est-à-dire que si la construction oscille selon un mode et un seul, tous les déplacements  $x_k$  sont proportionnels à la coordonnée généralisée  $y_j$  de ce mode.

L'équation différentielle d'un mode s'écrit :

Actions du vent sur les ouvrages - Effets dynamiques.

$$M(\ddot{y} + 2\beta\omega_0\dot{y} + \omega_0^2 y) = Q = \sum_i \mu_i F_i$$

où :

$y$  désigne la coordonnée généralisée du mode

$M$  est la masse généralisée du mode

$\beta$  est le coefficient d'amortissement (par rapport à la valeur critique)

$\omega_0 (= 2\pi n_0)$  est la fréquence angulaire propre (et  $n_0$  la fréquence propre) du mode

$\mu_i$  est la déformée modale

$Q$  est la force généralisée

La déformée modale est définie à un coefficient multiplicateur près. Une convention habituelle consiste à donner la valeur 1 à la plus grande des valeurs  $\mu_i$  définissant la déformée (en valeur absolue).

Les déplacements  $x_i$  sont, par construction du changement de variable, donnés par :

$$x_i = \mu_i \cdot y$$

et la masse généralisée  $M$  par :

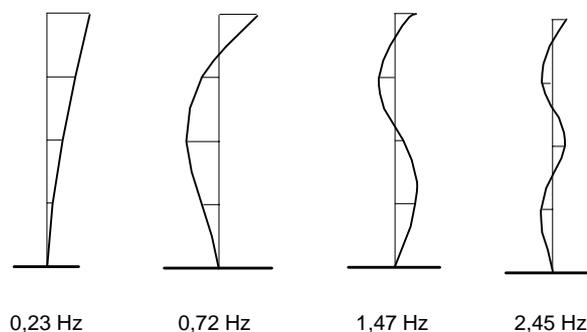
$$M = \sum_i \mu_i^2 \cdot m_i$$

On obtient ainsi des équations caractérisant le comportement des systèmes à un degré de liberté dont les termes (masse, force, ...) sont généralisés.

Le vent turbulent exerce aux différents niveaux de la construction des forces  $F_i(t)$  aléatoires. Par conséquent, la force généralisée  $Q$ , second membre des équations différentielles à traiter, est une fonction aléatoire du temps.

### 3.3. Exemples de modes de vibrations de structures élancées

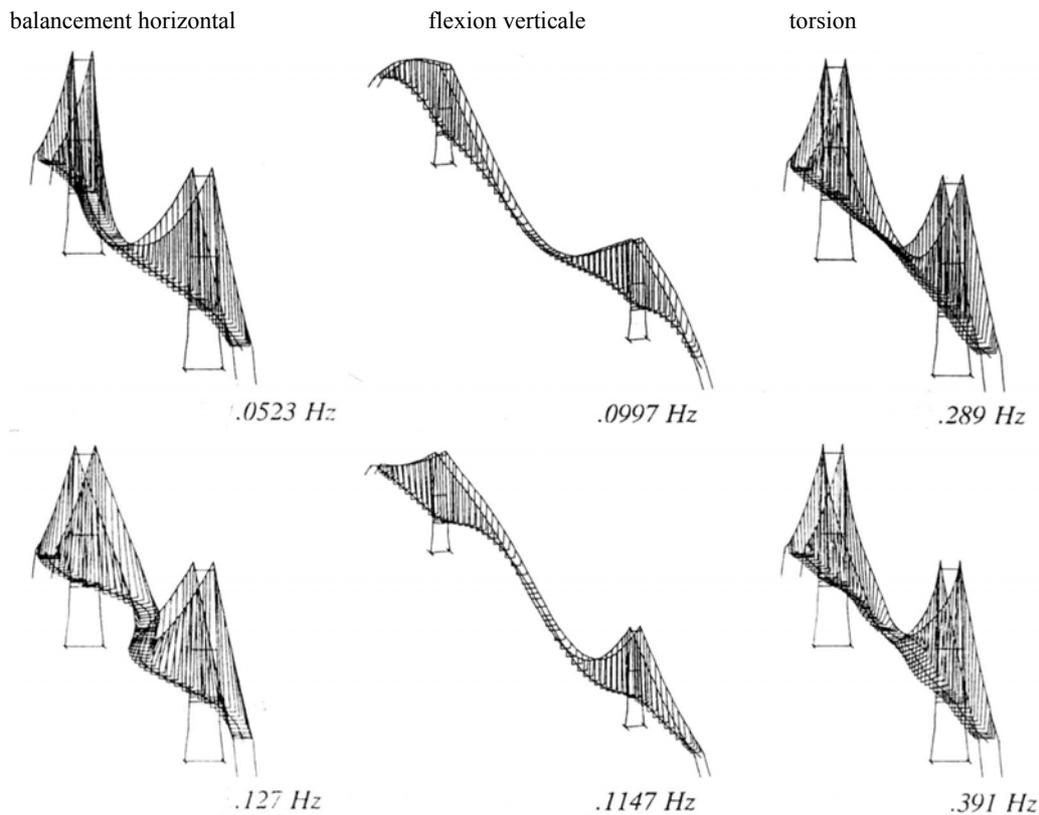
Les modes de vibration qui ressortent dans les déplacements engendrés par le vent dépendent essentiellement de la nature de l'ouvrage : par exemple pour un immeuble tour vertical élancé ou une cheminée, le premier mode représente généralement l'essentiel de la réponse et l'on ne prend en considération le second mode que pour d'éventuels problèmes d'inconfort dus aux accélérations.



*Déformées correspondant aux 4 premiers modes de vibration d'un immeuble tour*

Il faut considérer plus de modes pour un pont suspendu ou à haubans de grande portée en particulier des modes de balancement horizontal, flexion verticale et torsion du tablier.

Actions du vent sur les ouvrages - Effets dynamiques.



*Modes de vibration d'un grand pont suspendu*

A titre d'exemple, c'est le premier mode antisymétrique de torsion qui a provoqué la destruction du pont suspendu de Tacoma en 1941. L'étude aérodynamique du pont de Saint-Nazaire effectuée par l'ONERA montre que le premier mode de flexion verticale était sensible au détachement tourbillonnaire dont nous reparlerons ultérieurement. Le pont à haubans de l'Elorn présente son comportement dynamique le plus marqué pour les 2ème et 3ème modes de flexion verticaux. Enfin, la réponse d'une dizaine de modes, dont les modes de balancement horizontaux a été étudiée pour le pont à haubans de Normandie.

Pour les réfrigérants, structures de grandes dimensions à parois très minces, le vent provoque la mise en vibration d'un nombre important de mode d'ovalisation couplés ou non de la flexion.

Pour les haubans, les câbles, ..., le vent par des effets de sillage particuliers qui seront décrits ultérieurement peuvent faire ressortir des modes d'ordre très élevés (20ème, 30ème harmonique...).

Les effets dynamiques induits par le vent ne sont importants que si l'amortissement de la structure considérée est faible, en tout cas très inférieur (quelques %) à l'amortissement critique, ce qui est généralement le cas. Cela est d'autant plus vrai avec certaines techniques de construction modernes tel le béton précontraint ou l'acier soudé.

Les câbles tendus et les haubans ont généralement des taux d'amortissement très faibles :  $\cong 1/1000$  de l'amortissement critique.

A l'amortissement structurel de base de la construction peut venir s'ajouter (ou se retrancher en fonction de son signe) un "amortissement aérodynamique" dépendant de la vitesse du vent et de la forme géométrique et de la masse de la construction considérée. Par exemple, par vents forts, pour les ponts à haubans, un important amortissement aérodynamique s'ajoute à l'amortissement structurel en flexion verticale mais pas en balancement horizontal.

Actions du vent sur les ouvrages - Effets dynamiques.

Maîtrise de Mécanique - Université de Nantes - décembre 2003

### 3.4. Effets dynamiques induits par la nature turbulente du vent sur les constructions élancées : approche spectrale

Sans développer les théories de processus stochastiques relativement complexes, nous présentons seulement une description qualitative des phénomènes en cause. Ceci est illustré par la figure ci-après pour une structure à un mode de vibration excitée par la turbulence longitudinale du vent : les autres composantes (latérale et verticale) de la turbulence ont aussi un rôle important, par exemple c'est la turbulence verticale du vent qui est souvent la cause des vibrations en flexion verticale d'un pont.

La densité spectrale  $S_u(n)$  indique comment est répartie "l'énergie" du vent (composante longitudinale  $u$ ) en fonction de la fréquence  $n$ . Par exemple, étape a/, on voit que "l'énergie" contenue dans la fluctuation de vitesse du vent (la turbulence) décroît à mesure que la fréquence augmente. Elle devient négligeable dans la gamme des fréquences supérieures à quelques Hertz.

Ces fluctuations de vitesse du vent engendrent des fluctuations de la force exercée par le vent sur la construction étudiée, dont on peut étudier la densité spectrale, étape c/. Cette densité spectrale est liée à celle de la vitesse du vent par "l'admittance aérodynamique"  $J(n)$  (étape b/).

$$S_F(n) = J(n).S_u(n)$$

L'"admittance aérodynamique" rend compte du fait que les rafales correspondant aux fréquences les plus élevées sont aussi celles qui ont, dans l'espace, les plus petites dimensions. De ce fait, elles n'agissent plus, simultanément sur toute la surface de la construction, en particulier si cette dernière est de grandes dimensions. Autrement dit, cette fonction d'"admittance aérodynamique" traduit un effet réducteur de "dimensions". La force aérodynamique donc sa densité spectrale  $S_F(n)$  peut être directement mesurée sur maquette rigide en soufflerie.

Les fluctuations de la force aérodynamique engendrent à leur tour des fluctuations de la "réponse" de la construction, c'est-à-dire de ses déplacements  $y$  (oscillations autour de la déformée moyenne). Ces fluctuations sont à nouveau analysées en terme de densité spectrale  $S_y(n)$ . L'"admittance mécanique" (impédance complexe)  $H^2(n)$  (étape d/) permet de passer de la densité spectrale de la force aérodynamique à celle du déplacement  $y$  (étape e/).

$$S_y(n) = H^2(n).S_F(n)$$

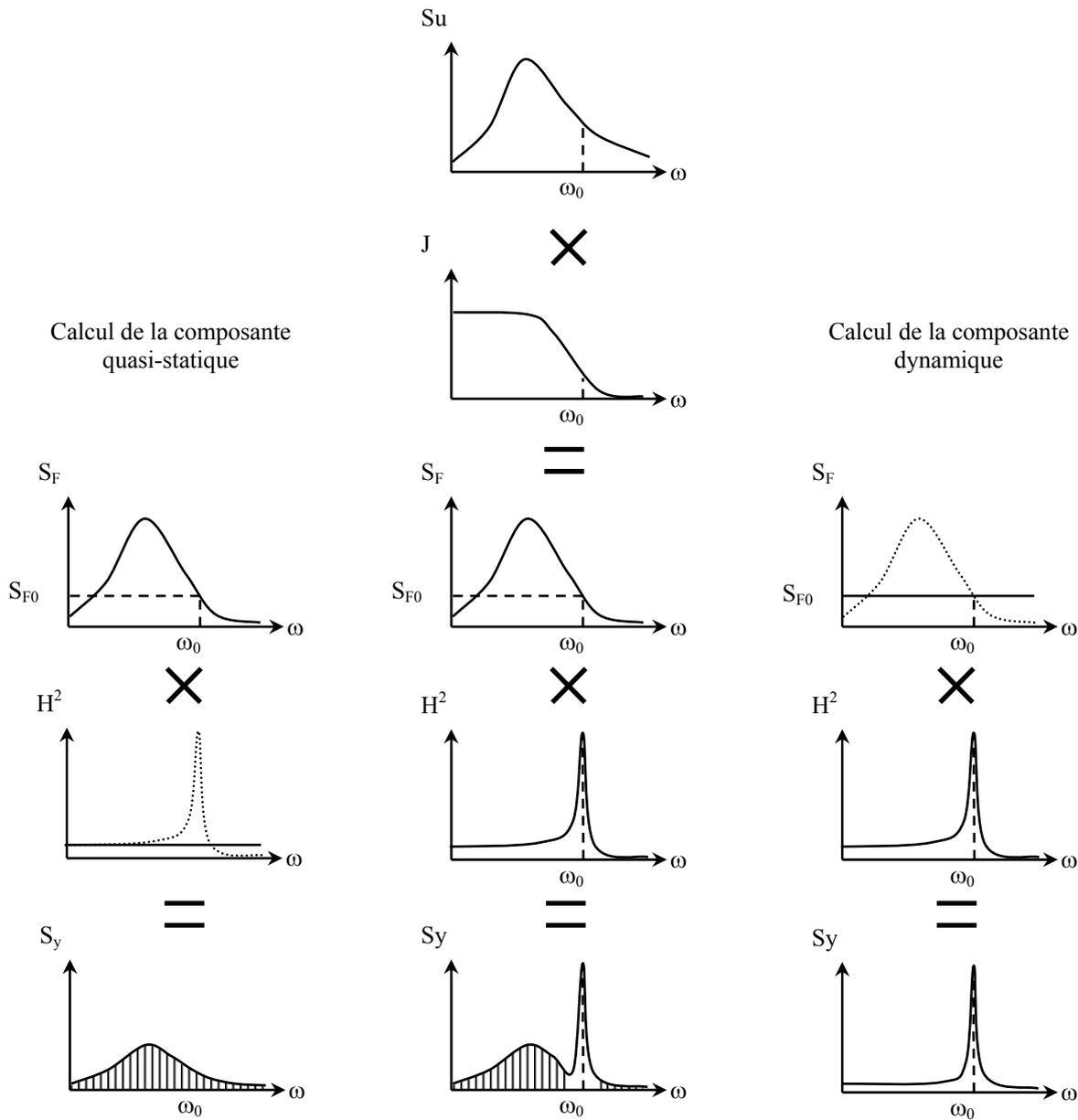
L'admittance mécanique  $H^2(n)$  traduit l'effet très variable sur la construction des fluctuations de la force aérodynamique, selon leur fréquence.

Les composantes de la force qui ont des fréquences élevées par rapport à la fréquence  $n_0$  du mode fondamental sont pratiquement sans effet sur le déplacement (elles sont trop "rapides" pour que la construction ait le temps de les suivre).

Les composantes à fréquence très inférieure à la fréquence propre  $n_0$  sont au contraire parfaitement "vues" par la construction qui les "suit" fidèlement.

Quant aux composantes dont la fréquence est proche de  $n_0$ , elles ont des effets très amplifiés sur la construction, par le phénomène analogue à celui, classique de la résonance des oscillateurs.

C'est ce phénomène qui est responsable des "effets dynamiques" et qu'il faut considérer chaque fois que l'on étudie une construction haute et élancée, dite "souple".



*Effets dynamiques induits par la turbulence du vent*

Le carré de l'écart-type  $\sigma_y^2$  du déplacement généralisé  $y$  est l'intégrale de la densité spectrale  $S_y(n)$ .

$$\sigma_y^2 = \int_0^\infty S_y(n) dn$$

Sur la figure précédente, étape c/,  $\sigma_y^2$  est l'aire hachurée sous la courbe de  $S_y(n)$ . Cette aire peut être décomposée en deux parties :

$$\sigma_y^2 = \sigma_S^2 + \sigma_R^2$$

$\sigma_S^2$  correspond à la réponse que l'on trouverait s'il n'y avait pas d'amplification dynamique à la fréquence propre  $n_0$ . Ce serait le cas d'une construction "raide" dont les fréquences propres sont grandes ; dans la gamme de fréquence où la densité spectrale  $S_Q(n)$  n'est pas négligeable, l'admittance mécanique  $H^2(n)$  serait sensiblement constante,  $\sigma_S^2$  correspond à un comportement "statique" de la structure".

$\sigma_R^2$  correspond à l'amplification dynamique proprement dite. Il est proportionnel à la densité spectrale  $S_u(n_0)$  du vent pour la fréquence propre  $n_0$  et à l'admittance aérodynamique  $J(n_0)$  pour cette même fréquence ; on montre qu'il est inversement proportionnel au coefficient d'amortissement  $\beta$ .

$$\sigma_R^2 \propto \frac{J(n_0) \cdot S_u(n_0)}{\beta}$$

On voit l'influence du coefficient d'amortissement sur le comportement dynamique de la structure.

L'exemple que nous venons de traiter concerne les effets de la turbulence longitudinale sur une structure élancée. En fonction de la forme géométrique de la structure les autres composantes de la turbulence peuvent avoir un rôle important (nous l'avons signalé pour les ponts) de même que la turbulence créée dans le sillage de l'ouvrage.

Dans les codes de calcul, les effets dynamiques de la turbulence sont traduits par un "coefficient d'effet dynamique" (ou "coefficient dynamique") dont la signification peut varier d'un code à l'autre, mais, dans tous les cas, exprimé sous une forme adimensionnelle.

### 3.5. Effets dynamiques particuliers

#### 3.5.1. Effets dynamiques créés par le détachement tourbillonnaire

Derrière un cylindre à section circulaire, placé dans un écoulement uniforme, le sillage prend des allures différentes selon le nombre de Reynolds. Pour des nombres de Reynolds compris entre 30 et 5 000, on observe dans le sillage des tourbillons "alternés" (dits de "Bénard-Karman") qui se détachent alternativement d'un côté du cylindre puis de l'autre. Ce phénomène périodique a pour conséquence la création d'une force périodique perpendiculaire à la direction du vent. La fréquence  $n_1$  de cette force est repérée par le nombre de Strouhal :

$$S_t = \frac{n_1 D}{U}$$

D : diamètre du cylindre

U : vitesse de l'écoulement

( $S_t \cong 0.2$  pour une section circulaire).

Actions du vent sur les ouvrages - Effets dynamiques.

Si l'on augmente le nombre de Reynolds, on observe d'abord l'atténuation de ce phénomène périodique au profit d'un sillage plus aléatoire ; puis pour un nombre de Reynolds encore plus élevé, une certaine organisation du sillage réapparaît. Le nombre de Strouhal dépend du nombre de Reynolds et de la forme de la section. Ces mêmes phénomènes peuvent être observés avec d'autres formes que la section circulaire, ils sont en fait caractéristiques de toute forme élancée bidimensionnelle à faible allongement dans le sens du vent.

La force de "portance", perpendiculaire au vent, correspondant à cet "échappement tourbillonnaire" a pour conséquence un comportement oscillatoire de la structure, perpendiculairement au vent. Ce comportement peut devenir dangereux si la fréquence  $n_1$  de l'excitation coïncide avec la fréquence propre  $n_0$  du mode fondamental (perpendiculaire au vent) de la structure mise en résonance. La relation suivante permet d'estimer la vitesse critique  $\bar{U}_c$  du vent pour laquelle cette mise en résonance aura lieu :

$$\bar{U}_c = \frac{n_0 D}{S_t}$$

Si cette vitesse critique est très faible, le phénomène est sans conséquence, puisque la force d'excitation croît comme le carré de la vitesse ; si elle est très élevée, elle correspond à un vent de probabilité négligeable et le phénomène n'est donc pas à redouter.

Si, au contraire, la vitesse critique est "raisonnable", le phénomène peut devenir dangereux (rupture par dépassement des limites d'élasticité ou par fatigue). Ce problème est particulièrement important pour les cheminées, généralement très élancées.

Il faut reconnaître que la prévision de l'importance de ce phénomène est loin d'être parfaitement maîtrisée et les diverses méthodes de calcul tirées des études menées ces dernières années conduisent parfois à des résultats très différents.

En effet, le détachement des tourbillons n'est pas synchrone sur toute la hauteur de la structure ; d'autre part, la vitesse du vent varie avec la hauteur (sans parler de sa fluctuation temporelle) et la dimension transversale  $D$  de la structure peut également évoluer avec la hauteur (cheminée tronconique par exemple).

Et surtout, si les oscillations de la structure ne sont plus très petites, il y a une interaction forte entre le phénomène aérodynamique et le comportement dynamique de la structure. L'échappement tourbillonnaire se synchronise sur les oscillations de la structure. Sa fréquence  $n_1$  reste égale à celle ( $n_0$ ) de la structure, même si la vitesse du vent n'est plus égale à la vitesse critique ; d'autre part, le détachement synchrone des tourbillons, commandé par les oscillations de la structure, intéresse une plus grande partie de la construction.

Les méthodes de calcul proposées ces dernières années, compte tenu de l'état des connaissances, doivent être utilisées avec prudence.

Le paramètre qui caractérise la sensibilité d'une structure (forme géométrique mise à part) à l'excitation par le détachement tourbillonnaire (et à d'autres phénomènes aérodynamiques) est le nombre de Scruton  $Sc$  :

$$Sc = \frac{m\beta}{\rho D^2}$$

$m$  : masse linéique

$\rho$  : masse volumique de l'air

$\beta$  : amortissement

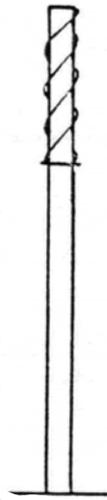
$D$  : dimension caractéristique

Actions du vent sur les ouvrages - Effets dynamiques.

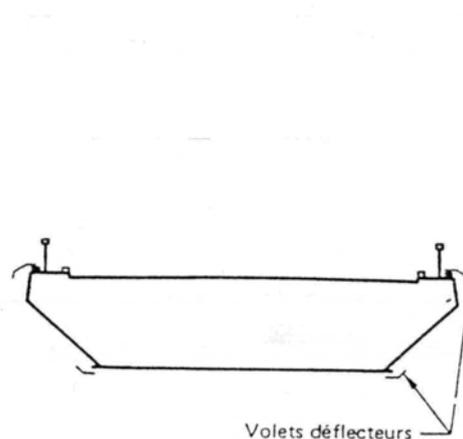
Maîtrise de Mécanique - Université de Nantes - décembre 2003

Plus le nombre de Scruton est faible, plus la structure est sensible au détachement tourbillonnaire. Il est possible d'atténuer les oscillations de la structure en augmentant son amortissement (amortisseur accordé par exemple) ou sa masse. Il est généralement préférable d'augmenter l'amortissement plutôt que la masse, car ceci n'est pas associé à un déplacement des fréquences propres.

Il est possible aussi d'intervenir au niveau du phénomène aérodynamique lui-même en modifiant la géométrie. Pour une cheminée, un dispositif efficace consiste à enrouler trois ailettes, en spirale, avec un pas de  $5D$  sur le tiers supérieur (largeur de l'ailette :  $0.1 D$ ). Dans le cas d'un pont à haubans (à Saint-Nazaire), la mise en place de volets déflecteurs le long des arêtes du tablier a complètement supprimé l'excitation par le sillage.



Ailettes sur une cheminée

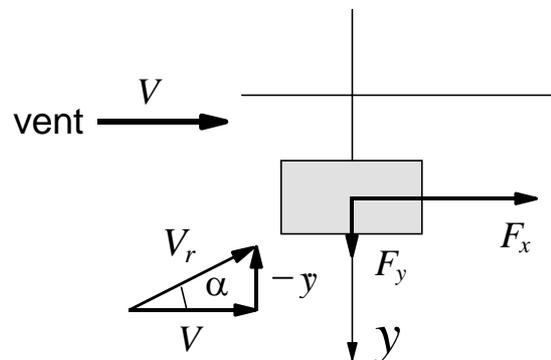


Section du pont de Saint-Nazaire équipée de volets déflecteurs

### 3.5.2. Phénomène de galop

Les phénomènes de galop trouvent leur origine dans une instabilité aérodynamique du profil de la structure. Ils concernent généralement les sections rectangulaires ou polygonales.

Considérant une structure verticale très élancée, se déplaçant perpendiculairement au vent avec une vitesse  $\dot{y}$ . La vitesse relative du vent  $U_r$  par rapport à la section, résulte de la composition vectorielle de la vitesse du vent  $U$  et de la vitesse  $-\dot{y}$ . Ce vent relatif aborde donc la section avec un angle d'incidence  $\alpha$  non nul. Dans certains cas (sections rectangulaires ou en D), la force aérodynamique engendrée par le vent relatif  $U_r$  a une composante  $F_y$  dirigée dans le même sens que la vitesse  $\dot{y}$ . Cette force  $F_y$  a donc tendance à accentuer le déplacement.



La force  $F_y$  est proportionnelle à la vitesse du vent  $U$  et à la vitesse de déplacement  $\dot{y}$  de la structure. Dans l'équation du mode fondamental de flexion, perpendiculairement au vent, elle peut être

Actions du vent sur les ouvrages - Effets dynamiques.

interprétée comme un "amortissement aérodynamique" s'ajoutant à l'amortissement mécanique. Dans le cas de sections défavorables, cet amortissement est négatif et donc diminue l'amortissement total, qui peut même s'annuler. Les oscillations de la structure peuvent alors croître jusqu'à la rupture.

Il a été montré qu'une approche quantitative du phénomène de galop est possible si l'on connaît la variation du coefficient  $C_y$  en fonction de l'angle d'incidence  $\alpha$  (variation mesurée sur une section immobile en faisant varier l'incidence) et qu'une condition nécessaire pour le galop existe est :

$$\left( \frac{dC_y}{d\alpha} \right)_{\alpha=0} > 0 \text{ (critère de Den Hartog)}$$

Cette condition n'est pas suffisante car elle ne fait ressortir qu'une propriété aérodynamique de la coupe transversale de la structure ; comme pour le détachement tourbillonnaire, une structure légère et/ou peu amortie est plus susceptible de galop que la même plus lourde et amortie (relation de Scruton).

En pratique, la vérification de la stabilité consiste à calculer, compte tenu des propriétés aérodynamiques de la section considérée, la vitesse du vent  $U$  telle que l'amortissement total (mécanique + aérodynamique) soit nul. La structure pourra être considérée comme stable si cette vitesse critique est suffisamment grande pour que sa probabilité d'occurrence puisse être réputée négligeable.

### 3.5.6. *Phénomènes de flottement*

Les phénomènes de flottement ont été d'abord observés et étudiés en aéronautique (flottement des ailes d'avion). Ces phénomènes sont maintenant pris en considération en génie civil, notamment pour les ponts suspendus ou à haubans, depuis la rupture du pont suspendu de Tacoma (1940).

Nous ne développerons pas l'étude de ces phénomènes complexes d'un point de vue théorique. Indiquons seulement qu'il existe plusieurs types de flottement (à un degré de liberté en torsion ou flexion pure, à deux degrés de liberté avec couplage entre les oscillations latérales de flexion et les oscillations de torsion, ...) qui seront abordés du point de vue expérimental.

Différentes techniques d'étude, sur modèle aéroélastique, sont utilisées en soufflerie. Elles visent à déterminer la vitesse du vent pour laquelle les oscillations auto-entretenues de flottement apparaissent. On vérifie alors que cette vitesse critique est assez élevée pour que sa probabilité d'occurrence puisse être retenue pour négligeable.

### 3.5.7. *Effets de sillage et d'interaction*

Les différents effets dynamiques précédemment décrits concernent une construction ou structure isolée. Très souvent c'est l'interaction avec un corps voisin qui fait apparaître, amplifier ou atténuer un comportement dynamique. Les exemples sont très nombreux et divers : câbles électriques, cheminées en groupe, réfrigérants, groupe de bâtiments ou pylônes, etc...

Le nombre de paramètres mis en jeu (direction du vent, espacement, propriétés de chaque structure...) ne permet pas une classification précise. Les effets de "galop de sillage" et de "galop d'interaction" sont les plus cités dans la littérature : un phénomène de galop apparaît sur une structure, celui-ci n'est pas dû comme en configuration isolée à la géométrie de cette structure mais au vent incident perturbé par une structure amont qui fait apparaître une force latérale sur la structure aval.

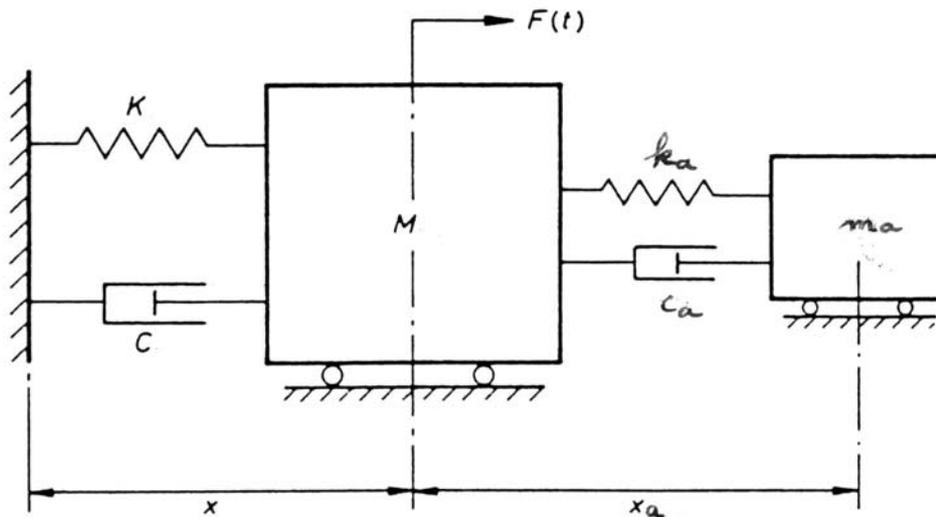
## 4. Réduction des effets dynamiques : l'amortisseur dynamique accordé

On a vu l'influence du coefficient d'amortissement sur le comportement dynamique de la structure considérée. Dans certaines réalisations de très grande hauteur on a augmenté ce coefficient en installant des amortisseurs répartis dans la structure (World Trade Centre). Une autre méthode pour

augmenter considérablement l'amortissement de la structure est d'y accrocher un amortisseur dynamique accordé.

Un étouffeur de vibration utilisé pour supprimer des vibrations induites par une excitation forcée sinusoïdale n'a plus d'utilité lorsque l'excitation couvre une large gamme de fréquences, cas du vent turbulent. L'amplification dynamique apparaît alors aux fréquences propres de ce système à deux degrés de liberté car la densité spectrale de vent y conserve une énergie significative. Un amortisseur accordé est un petit système vibratoire (masse, raideur, amortissement) accroché à la structure pour laquelle on veut réduire les vibrations ; c'est en fait un "étouffeur de vibrations" que l'on a complété par un amortisseur.

La figure ci-après est une représentation schématique d'une structure équipée d'un amortisseur accordé.



Représentation schématique d'un système amortisseur accordé

On utilise des développements théoriques similaires à ceux d'un système à deux degrés de liberté pour définir les caractéristiques optimales de cet amortisseur. On montre ainsi que l'amortissement global résultant  $\xi_e$  est peu dépendant de l'amortissement initial de la structure mais fortement de :

$m_a / M$  masse de l'amortisseur/masse (généralisée) de la structure

$n_a / n_0$  fréquence propre amortisseur/fréquence propre structure

$\xi_a$  taux d'amortissement de l'amortisseur

On montre que ce taux d'amortissement résultant  $\xi_e$  peut se s'estimer par:

$$\xi_e = \frac{1}{2} \cdot \frac{\alpha_1(\alpha_2\alpha_3 - \alpha_1) - \alpha_0\alpha_3^2}{\alpha_0(\alpha_2\alpha_3 - \alpha_1) + \alpha_3(\beta^2 - 2\alpha_0) + \alpha_1}$$

où:  $\alpha_0 = f^2$

$$\alpha_1 = 2f(\xi_0 f + \xi_a)$$

$$\alpha_2 = 1 + f^2(1 + \nu) + 4f\xi_0\xi_a$$

$$\alpha_3 = 2\xi_0 + 2\xi_a f(1 + \nu)$$

$$\beta = 2\xi_a f$$

Actions du vent sur les ouvrages - Effets dynamiques.

Maîtrise de Mécanique - Université de Nantes - décembre 2003

Par exemple pour  $\mu = 0.05$ , un ajustement optimal de  $f = 0.97$  et de  $\xi_a = 10\%$  permet d'obtenir un amortissement résultant global  $\xi_e$  de l'ordre de 5%, soit 5 à 10 fois l'amortissement initial de la structure.

Dans la conception de ce type d'amortisseur on doit tenir compte de déplacements importants de la masse de l'amortisseur, de l'ordre de 3 à 4 fois le déplacement de la construction considérée.

On montre ainsi que le rapport  $x_{norm}$  des déplacements dynamiques de la masse de l'amortisseur par rapport au déplacement dynamique de la structure primaire sans amortisseur s'exprime par:

$$x_{norm} = \sqrt{\frac{2\xi_0\alpha_1}{\alpha_1(\alpha_2\alpha_3 - \alpha_1) - \alpha_0\alpha_3^2}}$$

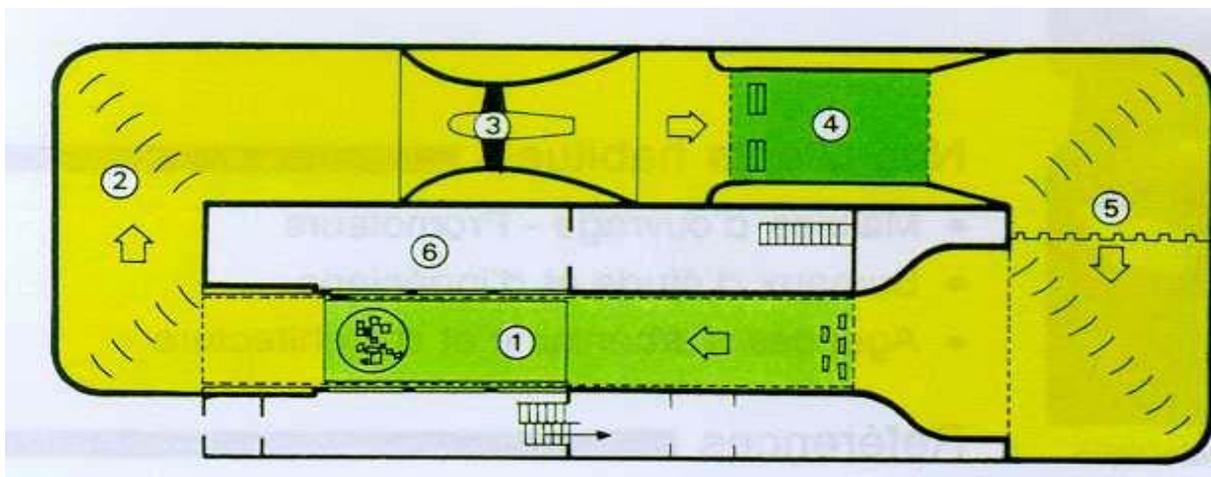
Exemples d'application : masses de béton (City Corp Center à New York, Pont de Normandie en phase de construction), réservoir d'eau suspendu (Tour de Sidney), pendules amortis (cheminées, passerelle de Solférino), masselottes (câbles).

## 5. SIMULATION PHYSIQUE DES PHENOMENES AERODYNAMIQUES

### 5.1 Simulation du vent à échelle réduite en soufflerie à couche limite

Jusqu'au début des années 60, les études des effets du vent sur les constructions ou ouvrages d'art étaient réalisées dans des souffleries de type aéronautique, sans turbulence. Beaucoup de réglementations (dont les règles NV 65) sont encore issues des résultats d'essais effectués dans ces conditions peu réalistes. Depuis cette époque, les souffleries à couche limite se sont développées et ont pour principe de recréer artificiellement une couche limite turbulente par l'intermédiaire de rugosités et de blocs distribués sur le plancher de longues veines d'essais à l'amont du modèle étudié. Le modèle lui-même est placé dans son environnement proche (reliefs, bâtiments ou structures voisines, végétation importante) qui perturbe et modère le vent incident à proximité de l'ouvrage. En jouant sur la taille et la distribution des rugosités distribuées sur le sol de la veine d'essais, il est possible de simuler différents types de vent (mer, campagne, ville, ...) à différentes échelles. En reproduisant à la fois le vent moyen (gradient vertical) et les caractéristiques de la turbulence exprimées sous leur forme réduite (intensités de turbulence, densités spectrales normalisées par la variance, coefficients de cohérence) on définit ainsi une échelle de simulation du vent qui doit être la même que l'échelle géométrique de l'ouvrage étudié. Dans la pratique, on concevra si possible la maquette à l'échelle du vent simulé car les souffleries à couche limite, malgré des dimensions de veine conséquentes, ne permettent qu'une gamme d'échelles de simulation restreinte, de l'ordre du 1/100 au 1/1000. Il est donc souvent plus difficile d'étudier en soufflerie des structures de taille relativement modeste que celles de dimensions exceptionnelles ; des maquettes de taille trop petite sont entachées d'imperfections géométriques et d'effet de nombre de Reynolds.

Le CSTB Nantes possède deux souffleries à couche limite atmosphérique avec des veines de 4 m de large et de 3 m de hauteur environ. L'action du vent sur les ouvrages n'est pas le seul domaine d'application de ces outils qui s'utilisent aussi pour l'étude du confort piétonnier dans les ensembles bâtis, la dispersion d'effluents et de polluants, la ventilation naturelle.



*Plan de la soufflerie atmosphérique NSA du CSTB :*

1. la veine principale
2. l'écoulement de retour
3. le propulseur
5. l'échangeur thermique
6. le caisson de mesures



*Aménagement intérieur de la veine de la soufflerie atmosphérique du CSTB  
Rugosité du type "centre de grande ville"*

## 5.2 La maquette soufflerie et son instrumentation

Il est alors naturel, dans une étude en soufflerie, d'associer une maquette rigide à une construction raide et une maquette "aéroélastique", dynamiquement semblable à une structure que l'on considère souple. Toutefois il est avantageux, dans un but de simplicité et d'économie, d'étendre le champ d'action des maquettes rigides à certaines constructions souples. Ceci est possible lorsque le déplacement de la construction sous l'action du vent n'interagit pas avec le champ aérodynamique induit par le vent. Cette interaction éventuelle, phénomène de galop ou de flottement, quelquefois de détachement tourbillonnaire, est la conséquence de la forme géométrique de la structure mais aussi de ses caractéristiques modales.

C'est sur la base de ces caractéristiques modales que l'on choisira de construire :

- une maquette rigide permettant la mesure des forces aérodynamiques. La réponse de l'ouvrage est alors calculée, en particulier par méthode spectrale (Cf 3.4)
- une maquette dynamiquement semblable reproduisant à échelle réduite le caractère vibratoire de l'ouvrage considéré.

### 5.2.1 Etude sur maquette rigide

Les conditions de similitude sont les plus réduites et se résument à :

- la similitude géométrique
- la simulation du vent turbulent
- l'indépendance de Reynolds (effets de la viscosité de l'air).

Le choix de la vitesse du vent en soufflerie est arbitraire. Dans la pratique on choisira une vitesse suffisamment élevée pour satisfaire à l'indépendance de Reynolds et avoir un bon rapport signal/bruit de l'instrumentation de mesure.

On a alors le choix entre deux techniques instrumentales qui conduisent à des conceptions de maquettes entièrement différentes :

- les mesures de pressions en parois de la structure
- la détermination des efforts globaux par pesée directe à l'aide de balances multi-composantes.

#### 5.2.1.1 Maquette instrumentée en pression

Actions du vent sur les ouvrages - Effets dynamiques.

La maquette de la structure considérée est équipée sur toute sa surface d'un nombre important de prises de pressions (plusieurs centaines). Ces prises sont reliées par l'intermédiaire de petits tubes souples à des capteurs à haute sensibilité. La résonance pneumatique introduite par les tubes est corrigée dans la bande passante utile (gamme des pressions aérodynamiques) par filtrage.

Jusqu'à ces dernières années, les mesures de pressions n'étaient utilisées que pour caractériser des actions locales (pressions exercées par le vent sur des éléments de faibles dimensions, quelques m<sup>2</sup>) car la scrutation de l'ensemble des prises de pressions n'était pas synchrone en raison d'un nombre insuffisant de capteurs. Des commutateurs pneumatiques permettaient de relier successivement les différentes prises de pressions aux capteurs.

Très récemment, les développements technologiques ont permis d'utiliser des capteurs piezo-résistifs multi-voies très compacts (environ 1 capteur/cm<sup>3</sup>) sous forme de modules de 16, 32, 64 voies. L'emploi de plusieurs modules permet l'acquisition synchrone d'un grand nombre de voies de pression (actuellement environ 200 voies synchrones au CSTB et plus dans certains laboratoires nord-américains ou japonais), chacune de ces voies de pression pouvant être elle-même une moyenne spatiale instantanée de plusieurs prises de pressions ; la limitation est, en dehors des problèmes de coûts, essentiellement liée aux capacités d'acquisition et de stockage de données du système informatique associé.

On obtient ainsi une image instantanée (suivi temporel) de la distribution de charges sur l'enveloppe. On peut alors calculer toute sollicitation ou action d'ensemble souhaitée par combinaison appropriée des ces forces élémentaires.

Le calcul de la participation dynamique est aussi effectué à partir des mesures de pression en calculant dans une première étape la force aérodynamique généralisée, puis en utilisant une approche spectrale pour calculer la participation dynamique (Cf. 3.4). C'est ainsi qu'ont été déterminées les sollicitations dues au vent sur de nombreux bâtiments prestigieux.



*Maquette de la tour Hines  
(Paris - la Défense) -  
Capteurs multivoies*

Actions du vent sur les ouvrages - Effets dynamiques.

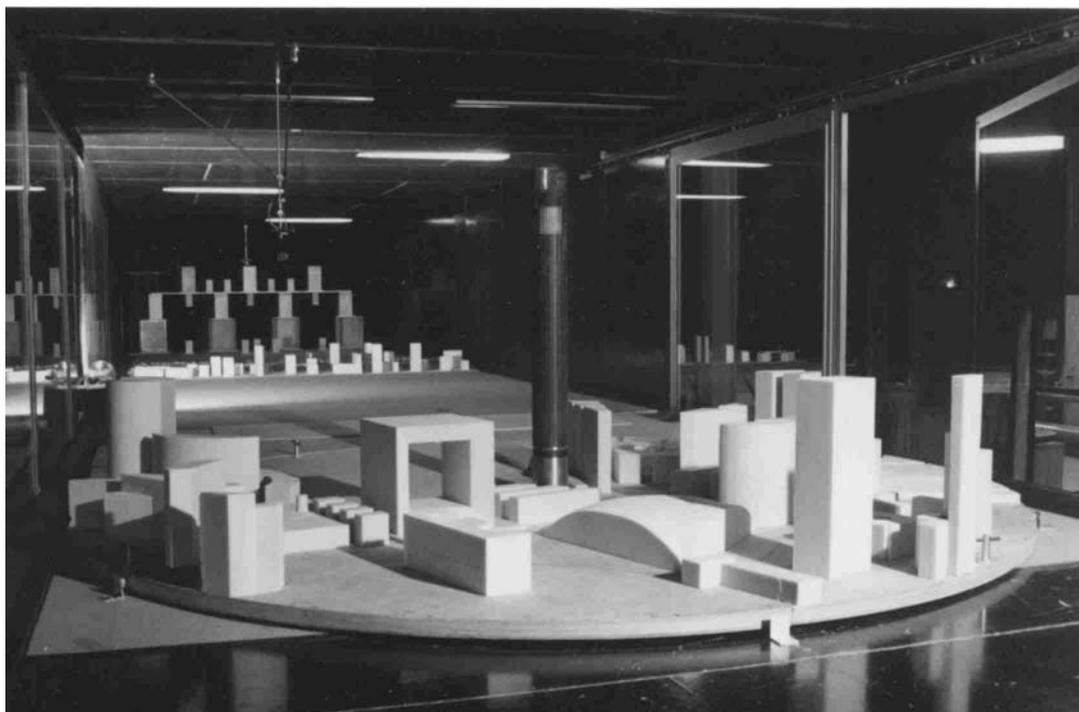
Maîtrise de Mécanique - Université de Nantes - décembre 2003

### 5.2.1.2 Maquette de mesure d'efforts

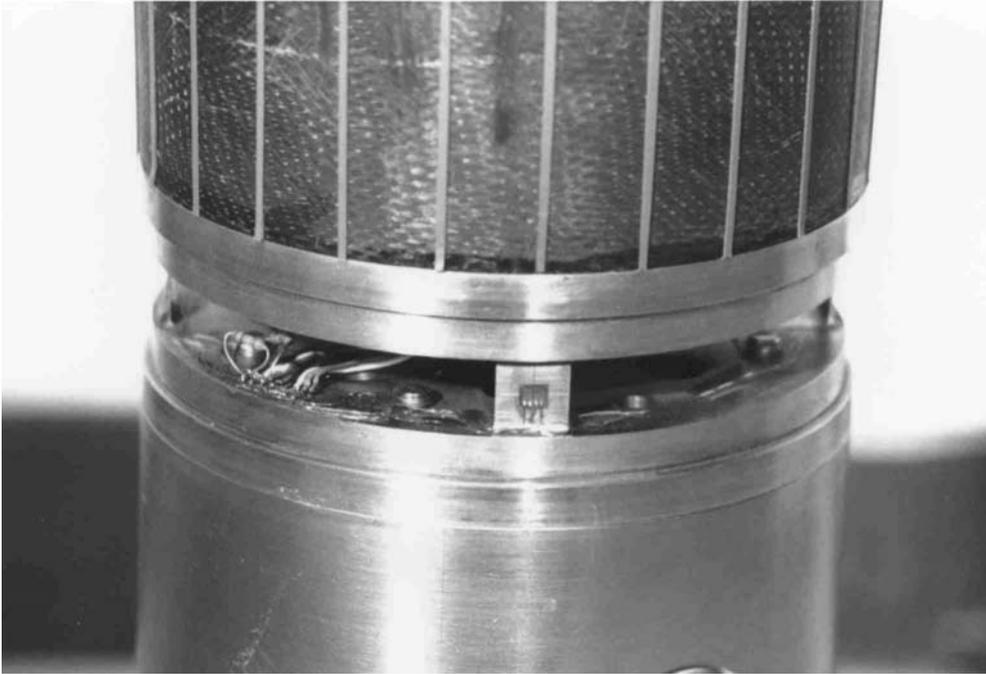
Le nombre de mesures de pressions nécessaires à la caractérisation d'une action d'ensemble est très important. Pour mesurer des efforts globaux sur un ouvrage on préfère souvent la "pesée" aérodynamique à l'aide de balances dynamométriques, on perd alors la notion de distribution de charges. Cette technique est couramment utilisée en aéronautique et en aérodynamique automobile ; coefficient de traînée  $C_x$  d'une voiture, appui, finesse... Son application est toutefois fondamentalement différente : on cherche ici à suivre l'évolution temporelle de la charge aérodynamique afin d'avoir accès à ses valeurs extrêmes alors que dans les applications classiques on se contente de mesurer des valeurs moyennes conséquence d'un écoulement uniforme. Il faut donc que le système de mesure ait une large bande passante, supérieure à celle des efforts aérodynamiques, ce qui conduit à associer à une maquette très légère et très raide (utilisation de noyaux internes en composites et d'habillage géométrique externe en mousse) une balance raide, elle aussi, mais cependant sensible. Dans certains cas la maquette est solidaire, par l'intermédiaire d'un bras, de la balance située sous la veine de la soufflerie. Plus fréquemment on choisira, si possible, d'inclure la balance à l'intérieur de la maquette afin de minimiser les bras de levier.

La balance est un ensemble mécanique constitué de barreaux dynamométriques (jauges de contraintes) sensibles à une composante (force ou moment) et découplés les uns des autres par l'intermédiaire de lames fines. On peut avoir ainsi des balances à 1, 2, ... 6 composantes (3 forces, 3 moments).

A titre d'exemple, nous présentons une application pratique pour l'étude en soufflerie (1/300) du projet de la Tour sans Fins dans l'environnement de la Défense la maquette rigide est réalisée en fibres de carbone et la balance de pied, très raide, permet de positionner le premier mode de vibration de la maquette bien au-delà de la gamme de fréquences des efforts aérodynamiques.



*Maquette rigide au 1/300 de la Tour sans Fins dans son environnement*



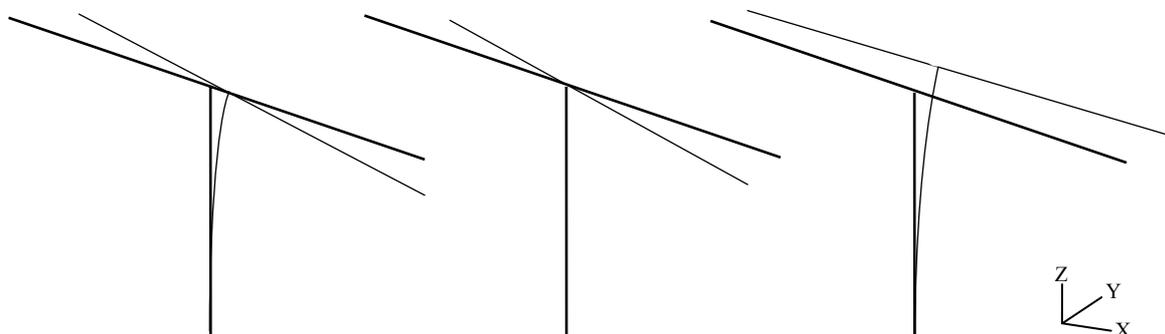
*Balance de pied de la maquette de la Tour sans Fins*

Le calcul de la participation dynamique n'est possible que si la force aérodynamique généralisée du mode considéré peut être évaluée à partir de la mesure des efforts globaux. C'est le cas, par exemple, lorsque l'on s'intéresse au mode fondamental de flexion d'un immeuble-tour élancé ou d'une pile de pont en phase de construction qui constitue généralement l'essentiel de la réponse dynamique au vent de ces ouvrages. Si la déformée est linéaire, la force généralisée du mode est directement proportionnelle au moment de renversement à la base  $m$  mesuré sur la maquette en soufflerie:

$$Q(t) = \frac{1}{h} \cdot m(t) \quad h \quad \text{hauteur de la tour}$$

Si la déformée n'est pas linéaire, cette approximation reste cependant très valable.

On utilisera ensuite des développements théoriques identiques à ceux de la maquette de pression pour calculer la participation dynamique.



*Mode 1*  
*Fréquence = 0.2982 Hz*

*Mode 2*  
*Fréquence = 0.3638 Hz*

*Mode 3*  
*Fréquence = 0.4025 Hz*

*Les trois premiers modes de la pile n°2 du viaduc TGV d'Avignon, hauteur 50 m.*

Actions du vent sur les ouvrages - Effets dynamiques.

Maîtrise de Mécanique - Université de Nantes - décembre 2003

Bien que limitée aux cas sans interactions, l'étude sur maquette rigide est très souple ... d'emploi. La construction de la maquette est aisée et son instrumentation est réutilisable. Elle permet aussi des études paramétriques en faisant varier la fréquence ou l'amortissement des modes considérés sans qu'un réglage de maquette et une série d'essais en soufflerie soient nécessaires pour chaque cas. Enfin elle n'apporte aucune information sur l'amortissement aérodynamique induit par le vent qui peut s'ajouter ou se retrancher suivant les cas à l'amortissement structurel. Si la structure est lourde, cet amortissement joue un rôle secondaire ; par contre, pour les structures légères, il peut avoir un rôle important. On essaiera alors de faire des estimations de cet amortissement à partir de valeurs trouvées dans la littérature sur des configurations analogues.

### 5.2.2 Etude sur maquette aéroélastique (dynamiquement semblable)

La construction étudiée doit être représentée par un modèle élastique ou aéroélastique ayant des caractéristiques dynamiques imposées.

La méthode la plus logique, a priori, est de concevoir le modèle comme une réplique exacte en forme géométrique et en distribution de masse et de raideur de la construction réelle. En pratique, cette approche n'est presque jamais adoptée car elle conduit souvent à des impossibilités de réalisation, notamment au niveau des épaisseurs, très faibles, des matériaux qui devraient constituer l'ossature de la maquette. En outre, elle ne permet aucun réglage a posteriori, notamment au niveau de l'amortissement, ce qui est rédhibitoire car il faut généralement plusieurs étapes d'ajustement pour obtenir une maquette conforme au prototype.

On se basera plutôt sur les caractéristiques dynamiques de l'ouvrage issues de l'analyse modale pour concevoir la maquette : masses généralisées, déformées, fréquences, amortissements. Si l'échelle des longueurs et celle des vitesses sont choisies, l'échelle des temps est fixée par la relation de Strouhal  $Sr$  : les fréquences propres du modèle doivent alors respecter cette échelle. Lorsque les forces de gravité sont à prendre en compte, la condition de Froude  $Fr$  s'ajoute, ce qui impose une échelle des vitesses égale à la racine carrée de l'échelle géométrique.

$$Sr = \frac{nD}{\bar{U}}, \quad Fr = \frac{\bar{U}}{\sqrt{D \cdot g}} \quad g : \text{accélération de la pesanteur}$$

Le coefficient d'amortissement doit être respecté lui aussi. Il peut être très difficile, techniquement, et également inutile, de reproduire fidèlement tous les modes propres de la structure, tout en gardant le contrôle de chacun des modes. C'est pourquoi on se contente généralement de simuler seulement les principaux modes, en général les plus bas en fréquence, par exemple les deux modes fondamentaux de flexion d'une tour rectangulaire. Souvent même on admet que les déformées de ces modes sont linéaires ; le modèle se ramène alors à une maquette rigide de la construction, montée à la base sur un pivot élastique convenablement réglé pour respecter les fréquences propres fixées par la similitude et équipé d'amortisseurs réglables électriquement ou pneumatiquement.

Dans des cas un peu plus complexes, on construira une maquette constituée d'une âme centrale ayant les inerties requises en flexion et torsion et d'un habillage géométrique, convenablement réglé en masse et inertie massique, connecté à l'âme centrale en des points discrets.

Pour les ponts suspendus et à haubans, exemples types de structures sensibles au vent, on peut distinguer plusieurs types d'essais :

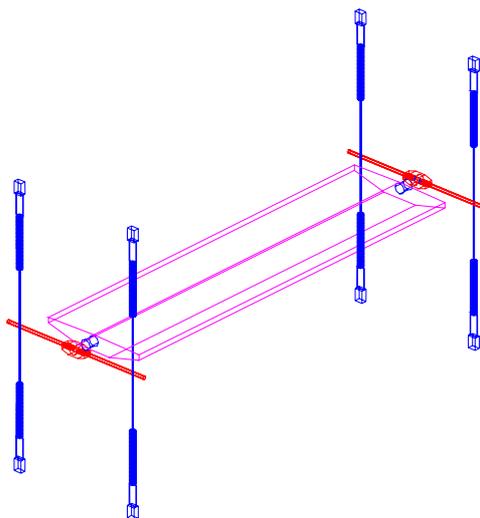
- modèle partiel représentant un tronçon du tablier à une échelle voisine du 1/50<sup>e</sup>. Un montage sur ressorts permet de représenter un mode de flexion verticale et un mode de torsion. Les caractéristiques aérodynamiques mesurées du tronçon sont exprimées sous la forme de coefficients sans dimension qui ne dépendent que de la géométrie du tablier et de la vitesse du vent. Ces coefficients, introduits dans les équations du mouvement du pont permettent, par le calcul, d'en déterminer le comportement.
- modèle du pont entier avec tablier, haubans et pylônes à une échelle de l'ordre du 1/150<sup>e</sup> au 1/300<sup>e</sup>. L'ensemble du tablier et des pylônes est en général modélisé par une âme centrale ayant les propriétés mécaniques recherchées ; cette âme est habillée de tronçons déconnectés structurellement,

Actions du vent sur les ouvrages - Effets dynamiques.

reproduisant la forme géométrique du pont et sa distribution de masse. Les haubans ou les suspentes sont représentés par des câbles lestés par un ensemble de masses ponctuelles et connectés au tablier et aux pylônes par des ressorts simulant l'élasticité axiale du hauban.

- variantes cherchant à avoir la simplicité du premier modèle et les performances de l'autre; les modèles "taut-strip" et "taut-tube" (à fils et à tubes tendus) sont très performants. C'est un modèle aéroélastique simplifié qui ne représente fidèlement que le tablier du pont, partie de l'ouvrage où naît l'essentiel des forces aérodynamiques responsables des oscillations de flexion verticale et de torsion du pont. Les caractéristiques structurelles sont reproduites au moyen de deux cordes vibrantes ou de deux tubes tendus parallèlement. La tension de ces cordes ou de ces tubes permet d'ajuster les fréquences de flexion verticale, leur espacement, et si nécessaire le diamètre des tubes, celles de torsion. Ici aussi l'habillage constitué de tronçons restitue la forme géométrique du tablier, l'ajustement de la masse et de l'inertie de ceux-ci permet de reproduire la masse généralisée des modes considérés de la structure.

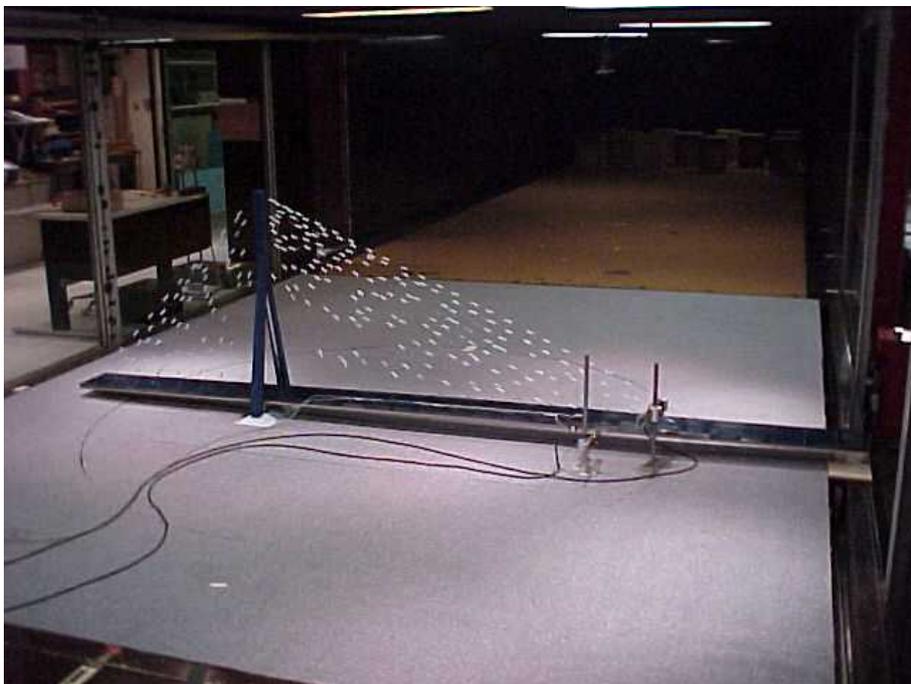
L'instrumentation des maquettes aéroélastiques est généralement constituée de capteurs de déplacements et d'accéléromètres. La connaissance des déplacements de l'ouvrage sous l'effet du vent permet de calculer l'état des contraintes dans les matériaux constituant la structure. Si le niveau de ces contraintes est incompatible avec la sécurité et la survie de l'ouvrage, on recherchera alors les solutions optimales qui permettront de résoudre le problème (modifications géométriques, apport d'amortissement,...) et qui seront validées aisément lors d'essais complémentaires en soufflerie.



*Maquette sectionnelle de tablier de pont*



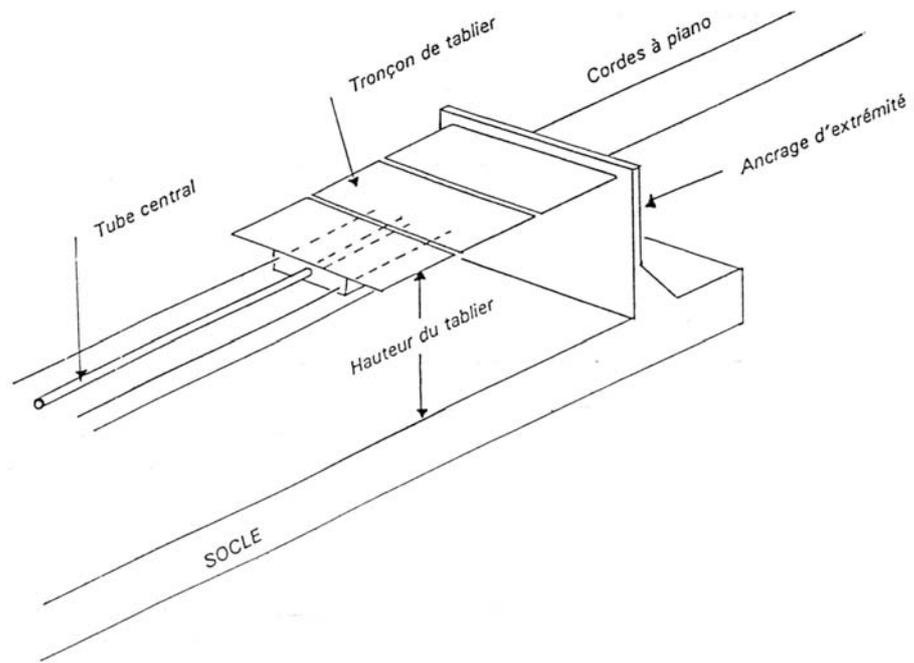
*Maquette aéroélastique du pylône d'un pont à haubans*



*Maquette aéroélastique complète d'un pont à hauban (Gdansk, Pologne)*

Actions du vent sur les ouvrages - Effets dynamiques.

Maîtrise de Mécanique - Université de Nantes - décembre 2003



*Modèle de maquette de type « taut tube »*