



# Effet du vent sur les bâtiments de grandes hauteurs

Julien Azirian

## ► To cite this version:

| Julien Azirian. Effet du vent sur les bâtiments de grandes hauteurs. Risques. 2017. dumas-01735361

**HAL Id: dumas-01735361**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01735361>**

Submitted on 15 Mar 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS**  
**CENTRE ASSOCIE DU LIBAN (I.S.A.E)**

Préparation, rédaction et soutenance du mémoire d'ingénieur Génie Civil  
(UA5M66)

**Spécialité : Génie Civil**

**Réalisé par :**

**Azirian Julien**

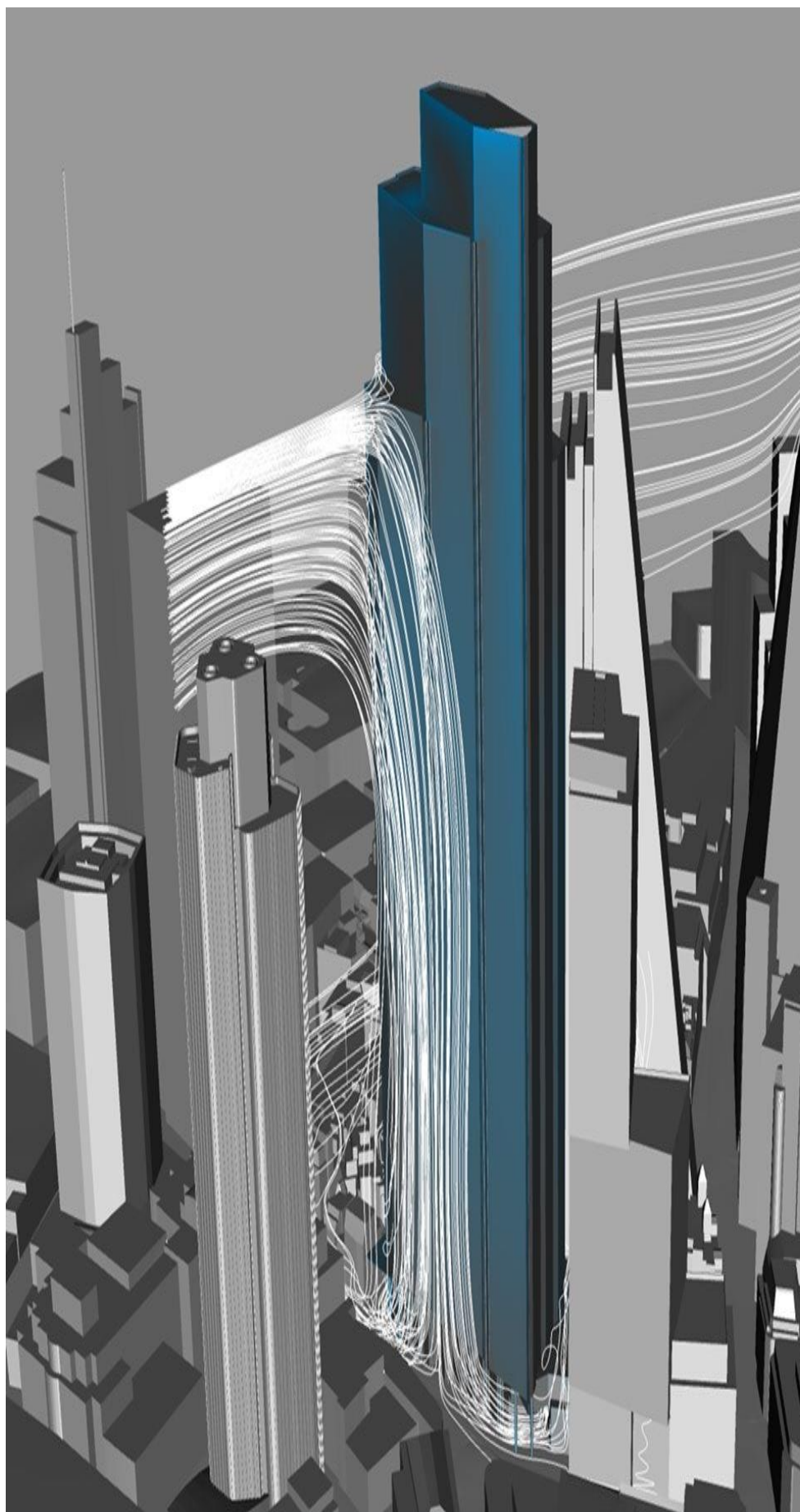
**Effet du vent sur les bâtiments de grandes hauteurs**

Soutenu en Juin 2017

**JURY**

<b>PRESIDENT :</b>	<b>Francis GUILLEMARD</b>	Professeur Titulaire de la chaire BTP
<b>MEMBRES :</b>	<b>Marwan EL RASSI</b>	Chef du département - Liban
	<b>Elias EL HACHIM</b>	Directeur du centre du Cnam – Liban
	<b>Rawad ASSAF</b>	Docteur au Cnam Liban (Tuteur)

# Effet du vent sur les bâtiments de grandes hauteurs



## **Résumé :**

Les ingénieurs du XX<sup>ème</sup> siècle ont témoigné à un nouveau défi, de concevoir des bâtiments élancés. Face à cette conception, les charges dynamiques dues au vent deviennent un critère de conception inévitable et non négligeable où des études ont été faites afin de résister à ce type de charge spécialement après la rupture du « pont du détroit de Tacoma » : la conception de ce pont a été basé sur les effets statiques du vent seulement en négligeant les effets dynamiques ce qui a dues à son effondrement.

Dans le présent document, nous introduisons les principaux charges et critères aéroélastiques, leurs comportements autours des structures, ainsi que la réponse de différentes structures envers ses forces turbulentes afin d'aboutir au bâtiment optimal de géométrie simple.

## **Abstract :**

The engineers, at the 20th century, faced a new challenge: to design tall buildings. Trapped in this concept, the dynamic loads became an inevitable design criteria in which studies have been made in order to resist this type of force, especially after the structure breakage of the "Tacoma Narrows Bridge": the design of this bridge was based on the static effects of the wind and neglecting the dynamic effects which caused its collapse.

In this document, we introduce the main aeroelastic loads and criteria, their interaction with the structures, as well as the response of different building in order to reach the optimal building with a simple geometry.

## **Mot Clé :**

Géométrie du bâtiment

Charges du vent

Détachement tourbillonnaire

Nombre de Reynolds

Déformation du bâtiment

Fréquence propre

## **Remerciement :**

Je tiens tout d'abord à remercier tous les membres du jury pour leur sollicitude concernant mon sujet, comme je suis en attente de leurs suggestions et opinions.

Ma reconnaissance va aussi à mon tuteur Dr. ASSAF pour son guide et ses conseils qui ont attribués à accomplir le projet actuel.

Enfin, ma gratitude la plus chaleureuse s'adresse à ma famille et camarades, spécifiquement Patrick El Khoury, pour leurs soutiens dans les moments pénibles et l'encouragement continu dans mes différents travaux et projets universitaires et professionnels.

## **Plan du mémoire :**

<i>Chapitre 1 : Introduction au vent</i> .....	10
I. Vent : Définition .....	10
II. Caractéristiques du vent .....	11
1) Valeur de base de la vitesse de référence du vent « $V_{b,0}$ »:.....	11
2) Vitesse Moyenne du vent : (EN 1991-1-4, d4.3) .....	12
3) Intensité de la turbulence : .....	14
4) Pression dynamique de pointe $q_p(z)$ : .....	14
5) Pression aérodynamique surfacique : .....	17
6) Force exercée par le vent : .....	22
III. Notions d'aérodynamique .....	23
1) Rappel concernant la mécanique des fluides : .....	23
1. Les équations : .....	23
2. Nombre de Strouhal (St): .....	25
3. Nombre de Reynolds (Re): .....	27
4. Nombre de Scruton (Sc): .....	27
5. Nature des écoulements fluides : .....	28
7) Effet de la rugosité de l'élément sur l'écoulement du vent : .....	29
8) Classification d'écoulement et de structures aérodynamiques : .....	30
1. Structure profilée, écoulement non décollé : .....	30
2. Structure non profilée, écoulement décollé : .....	30
IV. Aéroélasticité .....	32
1) Principe : .....	32
2) Effet de couplage fluide-structure : .....	32
3) Excitation par le détachement tourbillonnaire : .....	33
4) Effet de Turbulence : .....	35
Chapitre 2 : Réponse de la structure .....	36
I. Respect des critères .....	36
1) Critères de résistance : .....	36
2) Critère de confort : .....	37
1. Paramètre d'amplitude : .....	37

2.	Fréquence fondamentale :	40
II.	Différents types de simulation	40
1)	Numérique :	40
3)	Physique :	42
III.	Optimisation d'un bâtiment	43
1)	Coefficient de turbulence « $I_v(z)$ » :	43
2)	La vitesse critique du vent <b><i>V<sub>crit</sub></i></b> , <b><i>i</i></b>	47
1.	Bâtiment rectangulaire de hauteur constante :	47
2.	Bâtiment rectangulaire de hauteur variable :	47
3.	Bâtiment circulaire de hauteur variable :	49
3)	Le coefficient de force $C_f$	51
1.	Bâtiment rectangulaire sans angles arrondis	51
2.	Bâtiment rectangulaire avec angles arrondis	51
3.	Bâtiment circulaire de hauteur constante :	53
4.	Bâtiment circulaire de hauteur variable :	53
4)	Déplacement maximal caractéristique <b><i>y<sub>max</sub></i></b>	57
1.	Section rectangulaire – sans angles arrondis :	58
2.	Section circulaire	58
5)	La force d'inertie due aux effets aéroélastiques $F_w(s)$	61
1.	Section rectangulaire :	61
2.	Section circulaire :	64
6)	Réduction d'amplitudes à l'aide de dispositif d'amortissement	67
IV.	Simulation numérique pour section rectangulaire et circulaire :	70
1.	Mode propres :	72
2.	Déplacement	74
Chapitre 3 : Application sur bâtiment optimal		78
Conclusion :		85
Annexe		86
Liste des figures :		97
Liste des tableaux:		99
Bibliographie :		101

## **Notations :**

- **b** : longueur du côté du bâtiment perpendiculaire au vent
- **d** : longueur du côté du bâtiment parallèle au vent
- **h** : hauteur du bâtiment
- **V<sub>b,0</sub>** : valeur de base de la vitesse de référence du vent
- **V<sub>m</sub>(z)** : vitesse moyenne du vent
- **C<sub>r</sub>(z)** : coefficient de rugosité du terrain
- **C<sub>0</sub>(z)** : coefficient orographique
- **k<sub>r</sub>** : facteur de terrain
- **z<sub>0</sub>** : longueur de rugosité
- **V<sub>b</sub>** : Vitesse de référence du vent
- **C<sub>dir</sub>** : coefficient de direction
- **C<sub>season</sub>** : coefficient de saison
- **I<sub>v</sub>(z)** : intensité de turbulence
- **k<sub>l</sub>** : coefficient de turbulence
- **q<sub>p</sub>(z)** : pression dynamique de pointe
- **ρ** : masse volumique de l'air (1,225 Kg/m<sup>3</sup>)
- **q<sub>b</sub>** : pression dynamique de référence du vent
- **C<sub>e</sub>(z)** : coefficient d'exposition
- **h<sub>dis</sub>** : hauteur de déplacement
- **h<sub>ave</sub>** : hauteur d'obstruction
- **w<sub>e</sub>** : pression aérodynamique externe
- **w<sub>i</sub>** : pression aérodynamique interne
- **C<sub>pe</sub>** : coefficient de pression extérieur
- **C<sub>pi</sub>** : coefficient de pression intérieur
- **C<sub>f</sub>** : coefficient de force avec écoulement de contournement
- **C<sub>f,0</sub>** : coefficient de force sans écoulement de contournement aux extrémités
- **Ψ<sub>r</sub>** : facteur de réduction
- **F<sub>w</sub>** : forces exercées par le vent sur l'ensemble de la construction
- **C<sub>s</sub>** : coefficient de dimension
- **C<sub>d</sub>** : coefficient dynamique
- **C<sub>s</sub>.C<sub>d</sub>** : coefficient structural
- **τ** : contrainte de cisaillement
- **$\frac{du}{dy}$**  : gradient de vitesse perpendiculaire à la direction de cisaillement
- **f** : accélération dû aux forces de volume et de surface
- **St** : nombre de Strouhal
- **Re** : nombre de Reynolds
- **μ** : viscosité du fluide
- **ν** : viscosité cinématique du fluide



- $Sc$  : nombre de Scruton
- $\delta_s$  : décrément logarithmique d'amortissement structural
- $\delta_a$  : décrément logarithmique aérodynamique pour le mode fondamental
- $\delta_d$  : décrément logarithmique d'amortissement dû à des dispositifs spéciaux
- $m_{i,e}$  : masse équivalente  $m_e$  par unité de longueur pour le mode « i » fondamental
- $F_{fr}$  : force de frottement créée par le mouvement du fluide sur une paroi
- $c_{fr}$  : coefficient de frottement
- $C_D$  : coefficient de trainée
- $V_{crit,i}$  : vitesse critique du vent pour le mode  $i$
- $n_{i,y}$  : fréquence propre du mode « i » de vibration en flexion ,perpendiculairement au vent
- $F_w(s)$  : force d'inertie perpendiculairement à la direction du vent
- $m(s)$  : n'est autre que la masse équivalente  $m_{i,e}$
- $\Phi_{i,y}$  : déformée modale de la construction normalisée à 1 au point de déplacement maximal
- $y_{F,max}$  : déplacement maximal dans le temps au point où  $\Phi_{i,y}(s)$  est égal à 1
- $L_j$  : longueur de corrélation
- $\sigma_y$  : écart type de déplacement
- $K_p$  : facteur de pointe
- $C_c$  : constante aérodynamique fonction de la forme de la section transversale
- $K_a$  : paramètre d'amortissement aérodynamique
- $K_v I(v)$  : coefficient réducteur fonction de  $I(v)$
- $a_L$  : amplitude de limitation
- $W_s$  : poids des éléments structuraux contribuant à la rigidité de la structure
- $W_t$  : poids total de la structure

## **Introduction :**

Le vent considéré chez la plupart une charge statique, est fondamentalement une charge dynamique vivante changeant de forme lors de rencontre d'un obstacle. La réponse de l'obstacle, à son tour, est principalement fonction de sa géométrie et de son emplacement dans la région conduisant à des vibrations et des déformations.

Une étude sur différents coefficients et paramètres est nécessaire afin d'identifier le bâtiment convenable géométriquement : on essayera de manipuler différents sections usuelles de bâtiments (rectangulaire, carré, circulaire) en conservant sa section selon l'axe longitudinal de la structure, et en présence ou absence de dispositif d'amortissement.

## Chapitre 1 : Introduction au vent

### **I. Vent : Définition**

Le vent, par définition, est le terme utilisé pour l'air en mouvement, généralement appliqué pour le mouvement horizontal de l'atmosphère. Le mouvement vertical, quant à lui, est appelé « courant ». L'ingénierie des bâtiments s'intéresse au mouvement horizontal de l'air, particulièrement le retard progressif du vent et les turbulences provoquées à la surface du sol. Dans les zones urbaines, la zone de turbulence s'étend à une hauteur approximative de 400 m de la surface du sol. Au-dessus de cette zone, la topographie du sol n'a aucune influence sur les vents : à cette hauteur, la vitesse du vent s'appelle « gradient de vitesse de vent ». L'une des caractéristiques du mouvement de l'air qui joue un grand rôle dans la détermination des oscillations est la variation brute de la vitesse qu'on appelle « turbulence ».

Dans la conception des bâtiments, on s'intéresse à trois types principaux de vent :

1. *Vent dominant* : où l'air de surface passe vers la zone de basse pression qui se localise à l'équateur.
2. *Les vents saisonniers* : l'air couvrant le sol est plus chaud en été, et plus froid en hiver que l'air au-dessus des océans durant les mêmes saisons. En été, la basse pression domine les continents et les vents provenant des océans ont les vents plus froids ; tandis qu'en hiver, les continents couverts d'une atmosphère de haute pression expérimentent des vents plus chauds dirigés vers les océans. Vu la différence de pression, les vents sont appelés « saisonniers ».
3. *Les vents locaux* : tous les jours, ces vents se forment à cause des changements de températures et de pressions. Généralement, ils se forment dans les zones où le terrain est irrégulier, ce qui provoque des brises dans les montagnes et les vallées.

Il est à noter que les vents dominants et saisonniers sont analytiquement étudiés ensemble, alors que les vents locaux sont étudiés séparément. Cette distinction est basée sur la période de variation de la vitesse du vent où les vents saisonniers et dominants changent sur une période de plusieurs mois, alors que les vents locaux se modifient à chaque minute : la variation de la vitesse du vent du premier groupe est nommée « la variation de la vitesse moyenne », tandis que le second groupe est désigné par « des coups de vents ». Contrairement à d'autres fluides, le flux du vent n'est pas constant et varie de façon aléatoire ; ce qui impose la considération des charges du vent comme charges statiques.

Les critères qui interviennent dans le dimensionnement en présence du vent :

- La stabilité et les forces
- La fatigue dans les éléments structuraux et les connections dû à la fluctuation des charges du vent

- La déviation latérale excessive : c'est la cause principale de la fissuration des partitions internes, l'arrachement des carrelages sur les façades, et la possibilité de déformation permanentes des éléments non structuraux.
- La fréquence et l'amplitude d'oscillation qui causent le malaise des occupants dans les bâtiments flexibles de grandes portées.
- La possibilité de tremblement; ce qui amplifie la vitesse du vent sur les bâtiments proches
- L'inconfort dû au vent dans les zones piétonnes à cause des vents de surface
- Les perturbations acoustiques
- La résonance des oscillations des bâtiments avec les vibrations des câbles des ascenseurs
- Les caractéristiques du vent
- La taille et la géométrie du bâtiment
- La raideur du bâtiment, et la répartition de la masse-bâtiment
- Les caractéristiques d'appareil d'amortissement du système structurel, et des matériaux de construction

## II. Caractéristiques du vent

### 1) Valeur de base de la vitesse de référence du vent « $V_{b,0}$ »:

D'après l'EN 1991-1-4 (4.2), la valeur de base de la vitesse de référence du vent, notée «  $V_{b,0}$  », est la vitesse moyenne sur une période de 10 mins caractéristiques, indépendamment de la direction du vent et de la période de l'année à une hauteur de 10 m au-dessus du sol en terrain dégagé, de type « rase campagne » (catégorie de terrain II du tableau de l'AN q1), à végétation basse telle que de l'herbe et des obstacles isolés, séparés les uns des autres d'au moins 20 fois la hauteur ( $\Leftrightarrow d \geq 20.h$ )

Au-dessous, on prend l'exemple de la carte en France :

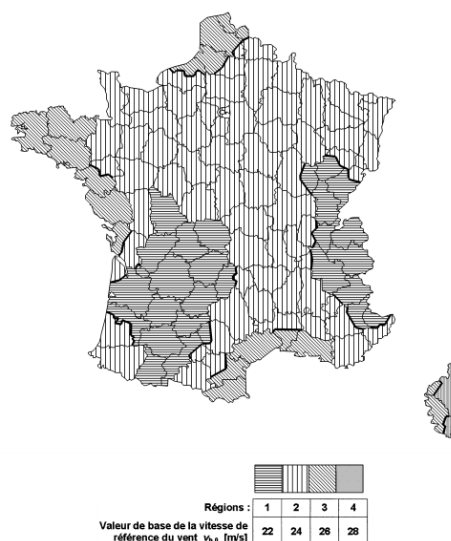


Figure 4.3(NA) — Carte de la valeur de base de la vitesse de référence en France

**Fig.1 : Carte de  $V_{b,0}$  en France**

Au Liban,  $V_{b,0}$  est prise égal à 26m/s selon l'Eurocode1 et à 35m/s selon les documents français des Règles NV65:2009

Nous adopterons la valeur  $V_{b,0} = 26\text{m/s}$  dans notre document.

## 2) Vitesse Moyenne du vent : (EN 1991-1-4, q4.3)

La vitesse moyenne du vent  $V_m(z)$  à une hauteur  $z$  au-dessus du sol dépend de la rugosité du terrain et de l'orographie, ainsi que de la vitesse de référence du vent,  $V_b$ , et il convient de la déterminer à l'aide de l'expression suivante :

$$V_m(z) = C_r(z) \cdot C_0(z) \cdot V_b$$

Où :

- 1)  $C_r(z)$  : est le coefficient de rugosité du terrain tenant compte de la variabilité de la vitesse moyenne du vent sur le site de la construction due à <sup>1</sup>la hauteur au-dessus du niveau du sol et à <sup>1</sup>la rugosité du terrain en amont de la construction, dans la direction du vent en question. La détermination du coefficient est fondée sur un profil logarithmique de la vitesse :

$$C_r(z) = k_r \cdot \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad \text{pour} \quad z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$$

$$C_r(z) = C_r(z_{\min}) \quad \text{pour} \quad z \leq z_{\min}$$

Avec :

- $z_0$  est la longueur de rugosité (cf. Annexe q 1)
- $k_r$  est le facteur de terrain dépendant de la longueur de rugosité  $z_0$  calculée à l'aide de la formule suivante :

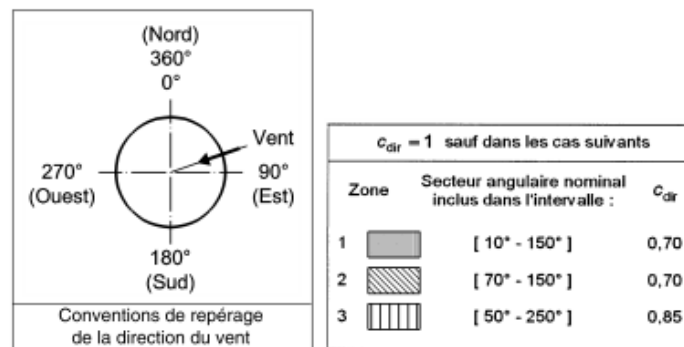
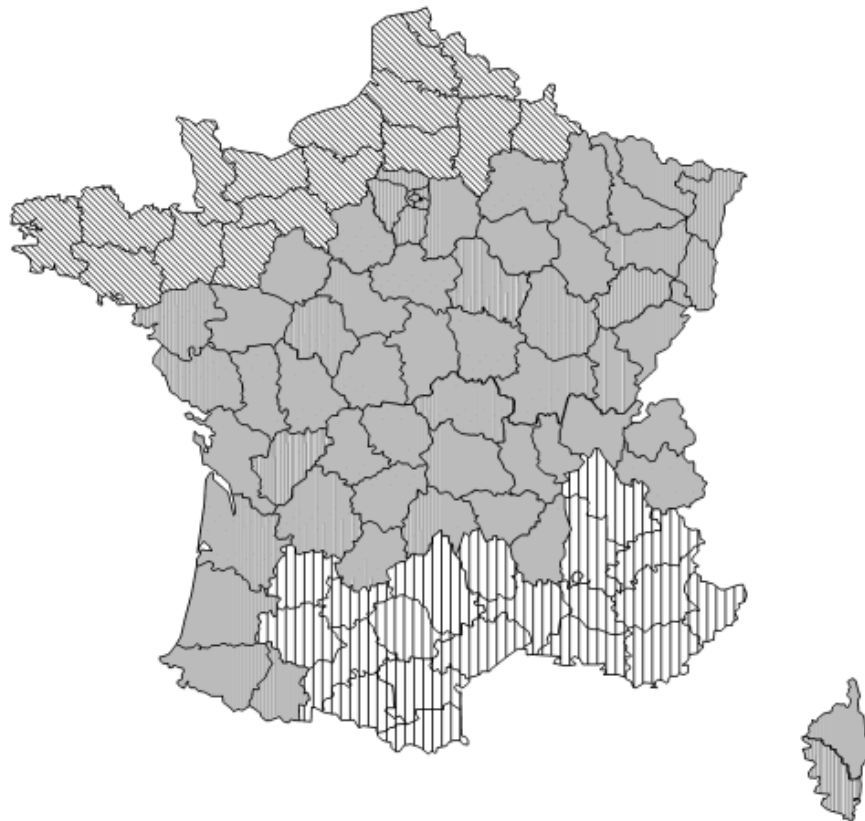
$$k_r = 0,19 \cdot \left( \frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07}$$

- $z_{0,II} = 0,05 \text{ m}$  (catégorie de terrain II, Annexe q 1)
  - $z_{\min}$  est la hauteur minimale définie dans l'annexe q 1
  - $z_{\max}$  doit être considérée comme étant égal à 200 m
- 2)  $C_0(z)$  : est le coefficient orographique pris égal à **1,0**. Dans le cas où l'orographie augmente les vitesses du vent de plus de 5%, il est recommandé de prendre en compte les effets en calculant  $C_0$  (cf. Annexe q 2)
  - 3)  $V_b$  : Vitesse de référence du vent, définie en fonction de la direction de ce dernier et de la période de l'année à une hauteur de 10 m au-dessus d'un sol relevant de la catégorie de terrain II, tel que :

$$V_b = C_{\text{dir}} \cdot C_{\text{season}} \cdot V_{b,0}$$

Avec :

- $C_{dir}$  : coefficient de direction, généralement pris égal à 1,0 sauf dans le cas où on prend en considération la convention de repérage du vent comme indiqué dans la figure (2) ci-dessous



**Fig.2 :** Carte de  $C_{dir}$  en considérant la convention de repérage du vent

- $C_{season}$  : est le coefficient de saison, pris généralement égal à 1,0. Ce coefficient varie entre 0,8 et 0,9 si la phase de construction s'effectue durant la belle saison uniquement (Avril à Septembre)

### 3) Intensité de la turbulence :

L'intensité de la turbulence  $I_v(z)$  à la hauteur  $z$  est définie comme l'écart type de la turbulence divisé par la vitesse moyenne du vent. L'écart type «  $\sigma_v$  » peut être déterminé grâce à la formule suivante :

$$\sigma_v = k_r \cdot k_l \cdot V_b$$

Les règles recommandées pour déterminer  $I_v(z)$  sont données comme suit :

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{V_m(z)} = \frac{k_l}{C_0(z) \cdot \ln(z/z_0)} \quad \text{pour } z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$$

$$I_v(z) = I_v(z_{\min}) \quad \text{pour } z \leq z_{\min}$$

Avec :

- $k_l$  : est le coefficient de turbulence recommandée égal à 1,0. Il est à distinguer deux situations :

- ❖ En site plat et dans le cas d'orographie constituée d'obstacles bien individualisés où une zone émergente par rapport à un terrain général sans relief marqué comme une falaise ou une colline isolée,  $k_l$  est définie par l'expression :

$$k_l = 1 - 2 \cdot 10^{-4} (\log_{10}(z_0) + 3)^6$$

- ❖ Dans le cas d'orographie constituée d'obstacles de hauteur et de formes variées,  $k_l$  est définie par l'expression :

$$k_l = C_0(z) \cdot [1 - 2 \cdot 10^{-4} (\log_{10}(z_0) + 3)^6]$$

### 4) Pression dynamique de pointe $q_p(z)$ :

La pression dynamique de pointe  $q_p(z)$  est induite par la vitesse moyenne et les fluctuations rapides de vitesse, donnée par la formule :

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_m^2 = C_e(z) \cdot q_b$$

Avec :

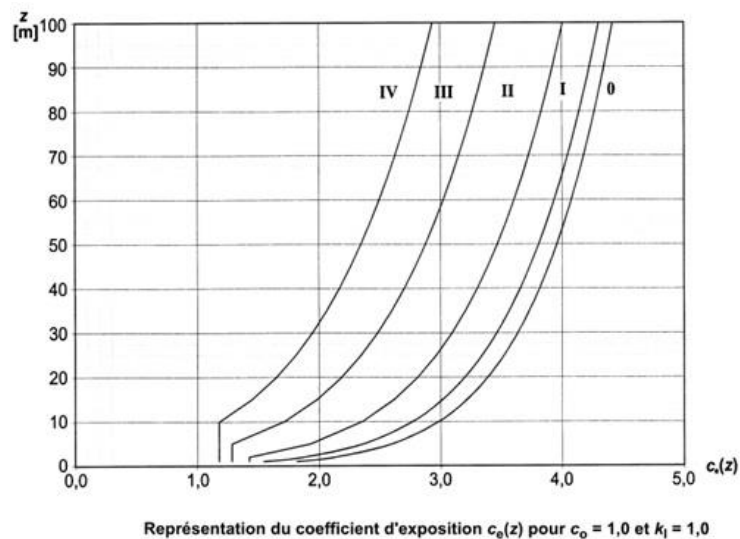
- $\rho$  : est la masse volumique de l'air, qui dépend de l'altitude, de la température et de la pression atmosphérique prévues dans la région lors des tempêtes. La valeur recommandée est de  $1,225 \text{ kg/m}^3$
- $q_b$  : pression dynamique de référence du vent donnée par

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_b^2$$

- $C_e(z)$  : coefficient d'exposition indiqué dans l'expression précédente telle que

$$C_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b}$$

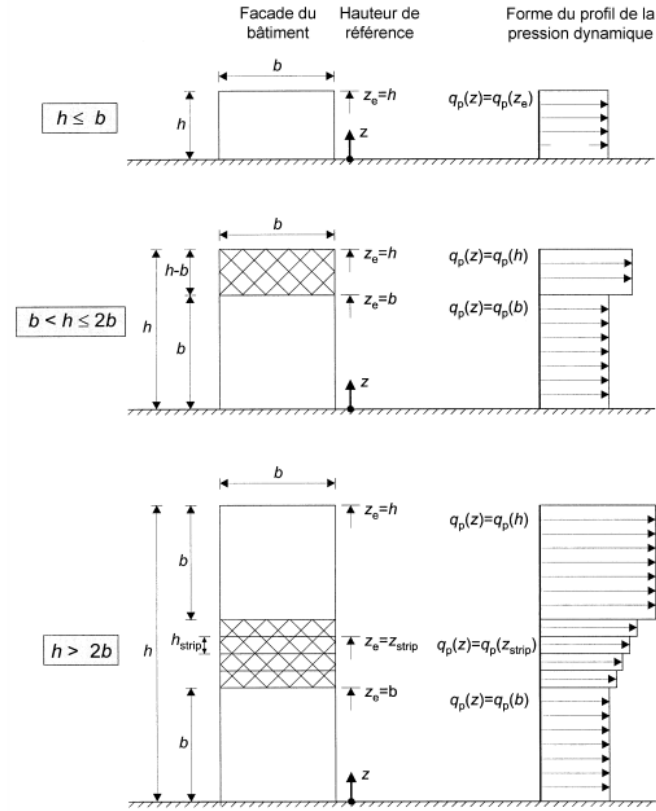
Le coefficient «  $C_e(z)$  » est représenté par la figure (3) en fonction de la hauteur au-dessus du sol et de la catégorie de terrain telle que définie dans la figure (3)



**Fig.3 :** Variation de  $C_e(z)$  de différents types de terrains en fonction de  $z$

La distribution de la pression dynamique de pointe  $q_p(z)$ , pour un bâtiment rectangulaire de largeur «  $b$  » perpendiculaire à la direction du vent et de hauteur «  $h$  », est représentée dans la figure (4) ci-dessous.

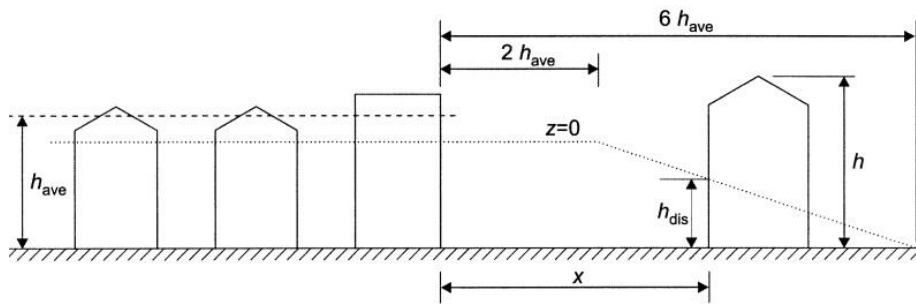




NOTE Il convient de supposer que la pression dynamique est uniforme sur chaque bande horizontale considérée.

**Fig. 4 :** Distribution de la pression dynamique de pointe

Il est à noter que le niveau du sol s'élève à une hauteur  $h_{dis}$ , dite *hauteur de déplacement*, si le bâtiment est situé sur un terrain de catégorie IV entouré de bâtiments rapprochés et autres obstacles. Grâce à la figure 5, on y définit  $h_{dis}$  (en absence d'information,  $h_{ave} = 15$  m):



$x \leq 2h_{ave}$	$h_{dis}$ est la plus petite valeur de $0,8h_{ave}$ ou $0,6h$
$2h_{ave} < x < 6h_{ave}$	$h_{dis}$ est la plus petite valeur de $(1, 2h_{ave} - 0,2x)$ ou $0,6h$
$x \geq 6h_{ave}$	$h_{dis} = 0$

**Fig. 5:** Hauteur d'obstruction et espacement au vent

### 5) Pression aérodynamique surfacique :

L'expression de la pression aérodynamique qui agit sur les façades externes, prend en considération les effets aérodynamiques, ce qui permet d'écrire :

$$w_e = q_p(z_e) \cdot C_{pe}$$

Avec :

- $q_p(z_e)$  : pression dynamique de pointe
- $C_{pe}$  : coefficient de pression extérieure

De même, dans le cas de présence d'une ou plusieurs ouvertures dans une façade, il convient de déterminer la pression aérodynamique agissante sur les surfaces internes exprimée par :

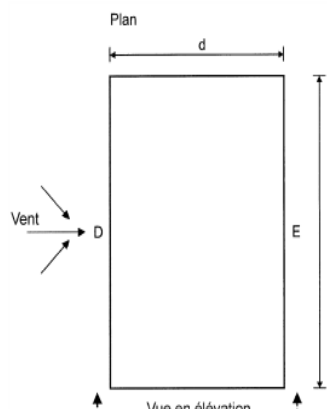
$$w_i = q_p(z_i) \cdot C_{pi}$$

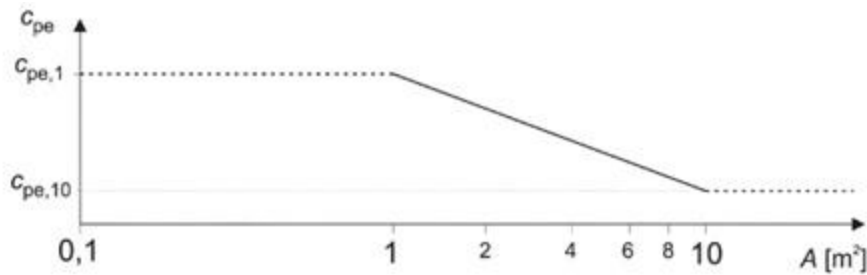
Avec :

- $q_p(z_i)$  : pression dynamique de pointe
- $C_{pi}$  : coefficient de pression intérieure

Il est à noter que :

- les coefficients de pression extérieure  $c_{pe}$  applicables aux bâtiments et aux parties de bâtiments dépendent de la dimension de la surface chargée  $A$ , qui est la surface de la construction produisant l'action du vent dans la section à calculer. Les coefficients de pression extérieure sont donnés pour des surfaces chargées  $A$  de  $1 \text{ m}^2$  et  $10 \text{ m}^2$  dans les tableaux relatifs aux configurations de bâtiment appropriées ; ils sont notés  $c_{pe,1}$  pour les coefficients locaux, et  $c_{pe,10}$  pour les coefficients globaux, respectivement. En effet, pour les surfaces chargées allant de  $0$  à  $10 \text{ m}^2$ , on utilise la fonction établie dans l'AN représentée ci-dessous :





La figure est fondée sur les éléments suivants :

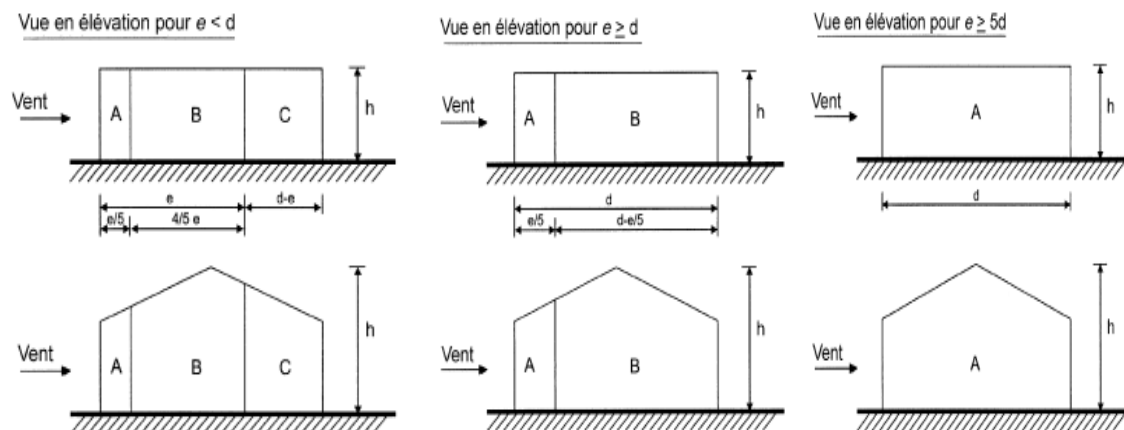
pour  $1 \text{ m}^2 < A < 10 \text{ m}^2$   $c_{pe} = c_{pe,1} - (c_{pe,1} - c_{pe,10}) \log_{10} A$

— Procédure recommandée pour la détermination du coefficient de pression extérieure  $c_{pe}$  dans le cas des bâtiments, pour une aire chargée comprise entre  $1 \text{ m}^2$  et  $10 \text{ m}^2$

- En prenant compte des effets aérodynamiques, une décomposition des murs latéraux est donnée dans l'AN français indiquée dans la figure (6), en prenant :

**$e = \min(b ; 2.h)$ .**

Chaque intervalle trouvé (A à E) est caractérisé par un coefficient extérieur  $C_{pe,1}$  et  $C_{pe,10}$  défini dans le tableau I



**Fig.6** : Légende relative aux murs verticaux

Zone	A		B		C		D		E	
$h/d$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,7	
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,5	
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0	-0,3	

**Tableau I** : Valeurs recommandées des  $C_{pe,1}$  et  $C_{pe,10}$  pour les murs verticaux des bâtiments à plan rectangulaire

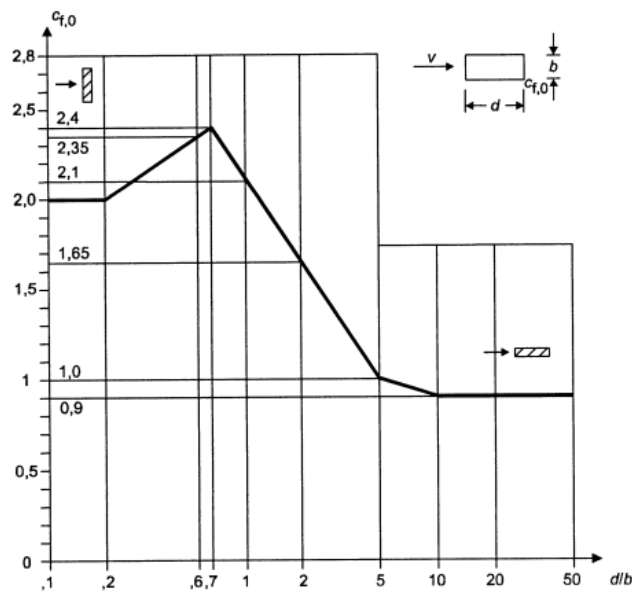
Dans le cas d'un bâtiment rectangulaire ou circulaire où le rapport  $h/d$  est supérieur à 5, il convient de déterminer le coefficient de force «  $C_f$  » pour un vent soufflant perpendiculairement sur une face en appliquant la formule suivante :

$$C_f = C_{f,0} \cdot \Psi_r \cdot \Psi_\lambda \quad (\text{bâtiment rectangulaire})$$

$$C_f = C_{f,0} \cdot \Psi_\lambda \quad (\text{bâtiment circulaire})$$

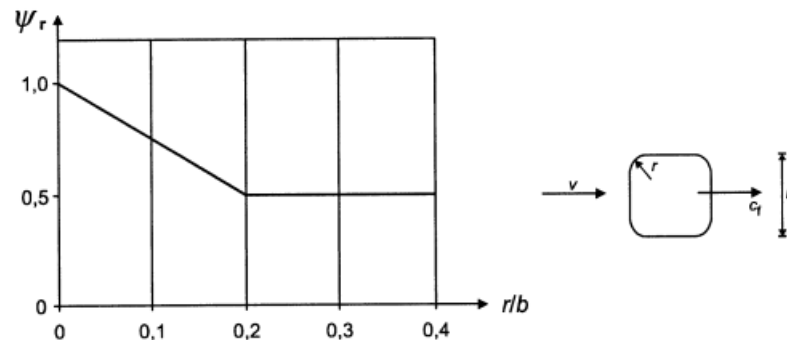
Avec : (pour bâtiment rectangulaire)

- $C_{f,0}$  : coefficient de force des sections rectangulaires à arêtes vives et sans écoulement de contournement aux extrémités tel qu'indiqué dans la Figure (7)



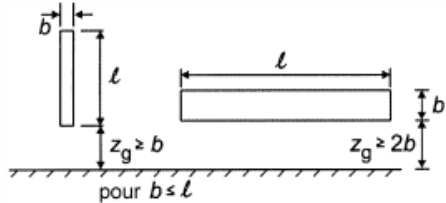
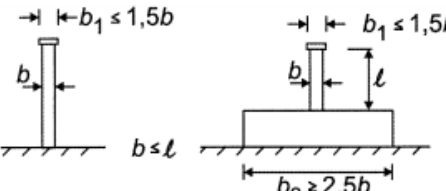
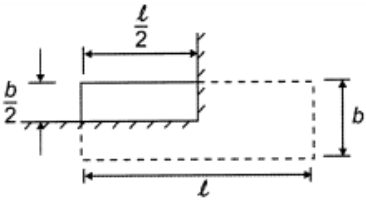
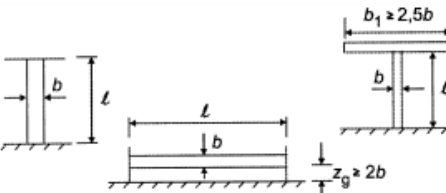
**Fig. 7 :** Coefficient de force  $C_{f,0}$  de sections rectangulaires à angles vifs et sans écoulement de contournement aux extrémités

- $\Psi_r$  : est le facteur de réduction applicable aux sections carrées ou rectangulaire à angles arrondis. Sa valeur dépend du nombre de Reynolds. Par contre, les valeurs de  $\Psi_r$  sont trouvées dans l'AN indiqué à la figure (8)



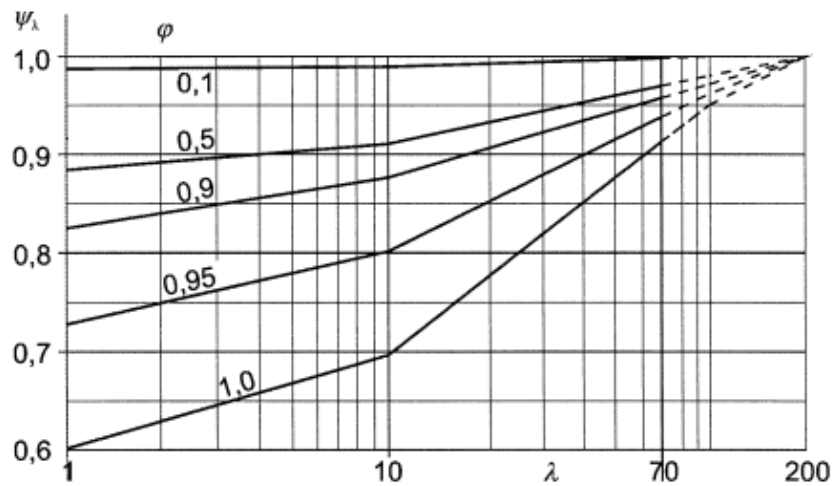
**Fig. 8 :** Variation de  $\Psi_r$  en fonction de  $r/b$

- $\Psi_\lambda$  : facteur d'effet d'extrémité pour les éléments dont les extrémités peuvent être contournées par le vent. Il traduit la réduction de la force exercée par le vent du fait des possibilités qui lui sont offertes de contourner la construction à ses extrémités. Il convient de déterminer la valeur de  $\Psi_\lambda$  (Fig.9) en fonction de l'élancement (Tab. II), et le taux de remplissage «  $\phi$  »
- $\phi = \frac{A}{A_C}$
- A : somme des aires projetées des éléments de la structure
- $A_C$  : aire de la surface circonscrite à la structure tel que (  $A_C = l \cdot b$  )

N°	Position de la structure, vent perpendiculaire au plan de l'élément	Élancement effectif $\lambda$
1		<p>Pour les sections polygonales, rectangulaires et à arêtes vives et pour les structures en treillis :</p> <p>— pour <math>\ell \geq 50</math> m, la plus petite des deux valeurs : <math>\lambda = 1,4 \ell/b</math> ou <math>\lambda = 70</math> ;</p> <p>— pour <math>\ell &lt; 15</math> m, la plus petite des deux valeurs : <math>\lambda = 2 \ell/b</math> ou <math>\lambda = 70</math>.</p>
2		<p>Pour les cylindres à base circulaire :</p> <p>— pour <math>\ell \geq 50</math> m, la plus petite des deux valeurs : <math>\lambda = 0,7 \ell/b</math> ou <math>\lambda = 70</math> ;</p> <p>— pour <math>\ell &lt; 15</math> m, la plus petite des deux valeurs : <math>\lambda = \ell/b</math> ou <math>\lambda = 70</math>.</p>
3		<p>Pour les valeurs intermédiaires de <math>\ell</math>, il convient d'utiliser l'interpolation linéaire.</p>
4		<p>Pour <math>\ell \geq 50</math> m, la plus grande des deux valeurs : <math>\lambda = 0,7 \ell/b</math> ou <math>\lambda = 70</math>,</p> <p>Pour <math>\ell &lt; 15</math> m, la plus grande des deux valeurs : <math>\lambda = \ell/b</math> ou <math>\lambda = 70</math>.</p> <p>Pour les valeurs intermédiaires de <math>\ell</math>, il convient d'utiliser l'interpolation linéaire.</p>

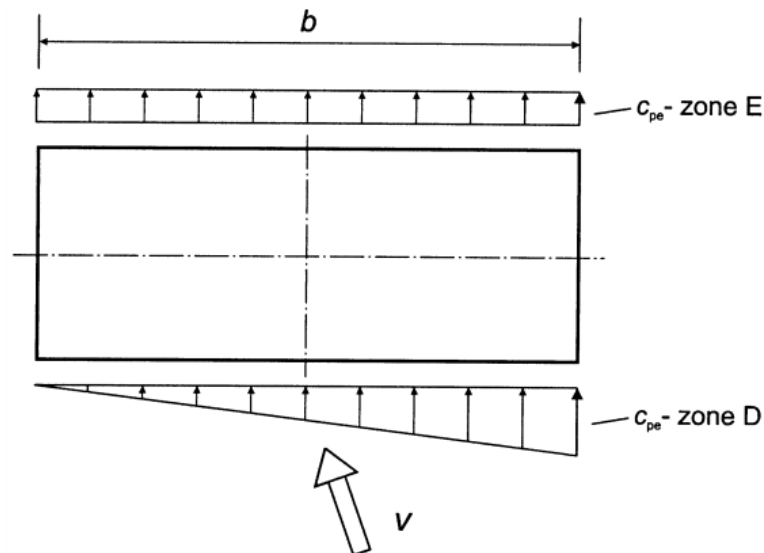
**Tab. II :** Valeurs recommandées de  $\lambda$

Note : le calcul de  $C_{f,0}$  et  $\Psi_\lambda$  pour un bâtiment de section circulaire est développé dans l'annexe de ce document (qf 3)



**Fig. 9 :** Valeurs indicatives de  $\Psi_\lambda$  en fonction  $\phi$  et  $\lambda$

Comme on verra plus tard, des fluctuations instantanées du vent sur les surfaces sont omniprésentes : cela entraîne une asymétrie significative de chargement lorsque le type de structure est susceptible d'être sensible à une telle action; d'où l'apparition d'effet de torsion qu'il faut prendre en compte. Grâce à cet effet, il est recommandé d'appliquer la répartition de la pression indiquée dans la fig. 10 pour la représentation des effets de torsion :



**Fig. 10 :** Répartition de la pression permettant de prendre en compte les effets de torsion

## 6) Force exercée par le vent :

La détermination des forces exercées par le vent sur l'ensemble de la construction se fait selon deux méthodes différentes :

1) *A l'aide des coefficients de force* grâce à la formule :

$$F_w = C_s C_d \cdot C_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$$

2) *A l'aide des pressions de surface* grâce à la formule :

$$F_{w,e} = C_s C_d \cdot \sum_{surfaces} (W_e \cdot A_{ref})$$

Avec :

- $C_s C_d$  : coefficient structural composé d'un coefficient de dimension  $C_s$  et d'un coefficient dynamique  $C_d$ . Le coefficient structural tient compte de l'effet sur les actions du vent d'une part de l'absence de simultanéité des pointes de pression à la surface de la construction ( $C_s$ ) et d'autre part des vibrations de la structure engendrées par la turbulence ( $C_d$ ).  $C_s C_d$  est donnée par la formule :

$$C_s C_d = \frac{1+2 \cdot K_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1+7 \cdot I_v(z_s)}$$

- $K_p$  : facteur de pointe défini comme le rapport de la valeur maximale de la partie variable de la réponse à son écart type (cf. Annexe q 4)
- $z_s$  : hauteur de référence prise égal à  $0,6 \cdot h \geq z_{min}$
- $B^2$  : coefficient de réponse quasi-statique traduisant l'absence de corrélation parfaite de la pression sur la surface de la construction calculé par la formule trouvée dans l'annexe de ce document (cf. Annexe q 5)
- $R^2$  : coefficient de réponse résonante traduit l'effet de la turbulence en résonance avec le mode de vibration considéré de la construction (cf. Annexe q 5)
- $C_s$  : coefficient de dimension tenant compte de l'effet de réduction sur l'action du vent dû à l'absence de simultanéité des pointes de pression sur la surface de construction donnée par l'expression

$$C_s = \frac{1+7 \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2}}{1+7 \cdot I_v(z_s)}$$

- $C_d$  : coefficient dynamique tenant compte de l'effet majorateur dû aux vibrations engendrées par la turbulence en résonance avec la structure obtenue par la formule

$$C_d = \frac{1+2 \cdot K_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1+7 \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2}}$$

### III. Notions d'aérodynamique

#### 1) Rappel concernant la mécanique des fluides :

##### 1. Les équations :

###### a) Equation de Navier – Stokes :

Au plan macroscopique, la mécanique des fluides est gouvernée par les équations de Navier – Stokes qui respectent les principes de conservation de la masse et de quantité du mouvement.

En aérodynamique, et plus précisément pour les vents à basse altitude, les équations se simplifient en posant plusieurs hypothèses :

- 1) L'hypothèse d'incompressibilité où les vitesses rencontrées sont largement inférieures à la vitesse du son, et  $\rho_{air}$  = constante
- 2) La température de l'air est considérée constante
- 3) L'air est un gaz léger dont le poids propre est négligé devant les autres forces.

De plus, on y exige une loi d'état et de comportement du fluide : l'air est considéré comme un gaz parfait et un fluide newtonien. Par définition, un fluide newtonien est un fluide où la contrainte de cisaillement est relié au gradient de vitesse par une relation linéaire, telle que la constante de proportionnalité n'est autre que la viscosité dynamique du fluide notée «  $\mu$  »

$$\tau = \mu \cdot \frac{du}{dy}$$

Avec :

- $\tau$  : contrainte de cisaillement
- $\frac{du}{dy}$  : gradient de vitesse perpendiculaire à la direction de cisaillement

Cette loi de comportement suppose une relation linéaire entre les contraintes de cisaillement et le gradient de vitesse grâce à la viscosité  $\mu$  qui traduit les effets de frottement interne du fluide. Par suite, les équations de Navier – Stokes sont réduites à l'équation de continuité et de la quantité de mouvement, tout en exigeant des conditions aux limites (sur les parois solides) et initiales :



$$\left\{ \begin{array}{ll} \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 & (\text{équation de continuité}) \\ \rho \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \cdot (\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}) = -\nabla p + \mu \cdot \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \cdot \mathbf{f} & (\text{équation de quantité de mouvement}) \end{array} \right.$$

Avec :

- $\mathbf{u}$  : la vitesse du fluide
- $p$  : la pression du fluide
- $\rho$  : la masse volumique du fluide
- $\mathbf{f}$  : accélération due aux forces de volume et de surface
- $t$  : le temps concerné

**b) Equation d'Euler :**

Une simplification des équations de Navier-Stokes n'est autre que les équations d'Euler où on néglige le terme dû à la viscosité ( $\mu \cdot \nabla^2 \mathbf{u}$ ). Ces équations sont utilisées pour le calcul des écoulements compressibles à grandes vitesses loin des parois solides. Cette équation de quantité de mouvement nous permet de résoudre un grand nombre de cas usuels tel que :

$$\rho \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \cdot (\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}) = -\nabla p + \rho \cdot \mathbf{f}$$

**c) Equation de Bernoulli :**

Ce théorème énonce que la somme des énergies cinétiques, potentiels, et de pression d'un fluide quelconque en mouvement est constante. Par suite, les énergies cinétiques et potentielles du fluide peuvent être converties en énergie de pression (vice versa) lors de l'écoulement ; ce qui cause un changement au niveau de la pression. Ce phénomène est visible dans l'équation de Bernoulli où on multiplie l'équation originale par «  $\rho$  » :

$$P + \rho \cdot \frac{v^2}{2} + \rho \cdot g \cdot z = cte$$

Avec :

- $P$  : pression statique (elle représente la pression actuel du fluide)
- $\rho \cdot \frac{v^2}{2}$  : pression dynamique (elle représente l'augmentation de la pression quand le fluide en mouvement arrête son chemin)
- $\rho \cdot g \cdot z$  : pression hydrostatique

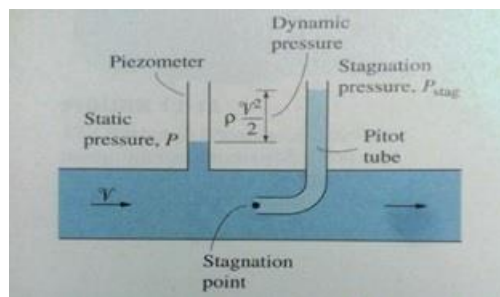
La somme de ses pressions citées s'appelle la « pression totale » qui est constante tout au long d'une ligne de courant. Ce qui nous intéresse est la somme de la pression statique et dynamique qu'on appelle la pression de stagnation ou la pression d'arrêt tel que :

$$P_0 = P + \rho \cdot \frac{v^2}{2}$$

Cette dernière représente la pression où le fluide peut être arrêté en l'absence de frottement. On peut y déduire la vitesse du fluide en une position précise par la formule :

$$V \Leftrightarrow u = \sqrt{\frac{2(P_0 - P)}{\rho}}$$

Cette relation est largement utilisée en soufflerie pour calculer la vitesse moyenne à partir de la mesure des pressions statiques et de stagnation à l'aide d'un tube de Pitot.

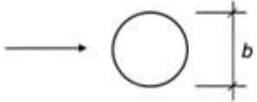
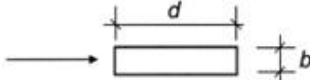
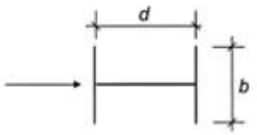
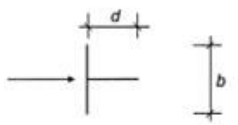
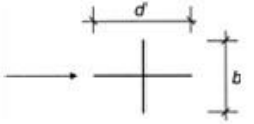
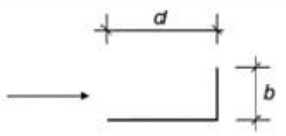


## 2. Nombre de Strouhal (St):

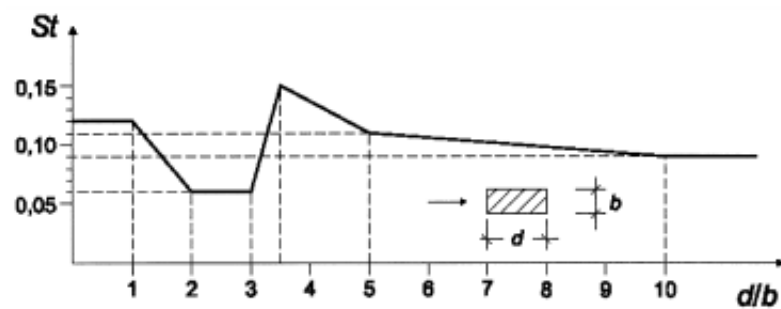
Dans un écoulement turbulent, le nombre de Strouhal est un nombre adimensionnel à connaître. En effet, il représente le rapport de la distance du parcours du fluide à la vitesse de référence  $V_{ref}$  du fluide pendant une durée de référence  $T_{ref}$  : cette dernière n'est autre que la longueur de référence. Le nombre de Strouhal se traduit par :

$$St = \frac{L}{V_{ref} \cdot T_{ref}}$$

Grâce à ce nombre, on peut caractériser un lâcher de tourbillons ou un phénomène périodique dans un écoulement turbulent. L'application de ce nombre à différentes sections transversales est lue dans le tableau III. Plus précisément, la figure 11 donne St pour une section rectangulaire à dimension quelconque : quand le rapport est inférieur à 2, le décollement a lieu sur l'arête vive en amont sans recollement sur l'obstacle; pour un rapport supérieur à 3, les couches limites se détachent sur l'arête en amont et se rattachent sur les côtés. Dans la zone où St est constant, le recollement est considéré comme instable.

Section transversale	$St$
 pour tous les nombres de Reynolds ( $Re$ )	0,18
 $0,5 \leq d/b \leq 10$	Fig.10
 interpolation linéaire	$d/b = 1$ 0,11 $d/b = 1,5$ 0,10 $d/b = 2$ 0,14
 interpolation linéaire	$d/b = 1$ 0,13 $d/b = 2$ 0,08
 interpolation linéaire	$d/b = 1$ 0,16 $d/b = 2$ 0,12
 interpolation linéaire	$d/b = 1,3$ 0,11 $d/b = 2,0$ 0,07
NOTE Les extrapolations du nombre de Strouhal en fonction de $d/b$ ne sont pas admises.	

**Tab. III** :  $St$  pour différentes sections transversales



**Fig. 11** : Variation de  $St$  en fonction de  $d/b$

### 3. Nombre de Reynolds (Re):

Le nombre de Reynolds traduit le rapport des forces d'inertie sur les forces de viscosité. Il est souvent utilisé comme un nombre adimensionnel de référence, de point de vue distinction des écoulements où les écoulements laminaires sont prises inférieurs à 1 et les écoulements turbulents supérieurs à :

$$\mathbf{Re} = \frac{\rho \cdot u \cdot l}{\mu}$$

Avec :

- $\rho$  : masse volumique du fluide (air = 1,225kg/m<sup>3</sup>)
- $u$  : échelle de vitesse
- $\mu$  : viscosité du fluide

Or :  $v = \frac{\mu}{\rho}$  (viscosité cinématique)

$$\Rightarrow \mathbf{Re} = \frac{u \cdot l}{v}$$

Afin de mesurer l'effort sur une structure, tel qu'un bâtiment, le principe revient à respecter la proportion entre les forces de cisaillement liées à la viscosité et les forces de pression résultant de la vitesse du fluide. Par suite, l'ingénieur Osborne Reynolds introduit la similitude sur les couches limites où s'exercent les efforts de viscosité et beaucoup d'autres phénomènes plus complexes comme les décollements tourbillonnaires.

### 4. Nombre de Scruton (Sc):

Un paramètre liant l'amortissement de la structure, la masse du fluide, et la masse du bâtiment au modèle « i » est essentiel afin de définir la sensibilité du bâtiment même aux vibrations. Ce paramètre se traduit par le nombre de Scruton donné par la formule :

$$\mathbf{Sc} = \frac{2 \cdot \delta_s \cdot m_{i,e}}{\rho \cdot b^2}$$

Avec :

- $\delta_s$  : amortissement structural exprimé par le décrétement logarithmique

- $\rho$  : masse volumique de l'air dans les conditions de détachement tourbillonnaire
- $b$  : largeur de référence de la section transversale à laquelle se produit le détachement tourbillonnaire en résonance
- $m_{i,e}$  : masse équivalente  $m_e$  par unité de longueur pour le mode « i » fondamental donnée par l'expression :

$$m_e = \frac{\int_0^l m(s) \cdot \Phi_1^2(s) ds}{\int_0^l \Phi_1^2(s) ds}$$

- $m(s)$  : masse par unité de longueur
- $l$  : hauteur ou portée de la construction ou de l'élément structural

## 5. Nature des écoulements fluides :

La nature des écoulements fluides est identifiée grâce aux nombres de Reynolds. En terme physique, le nombre de Reynolds se traduit, à l'aide des équations de Naviers-Stokes, par le rapport d'inertie et de viscosité où les deux termes s'interprètent comme des modes de transfert convectif et diffusif de quantité de mouvement. Cela se traduit par l'écriture suivante :

$$Re \sim \frac{\text{Inertie}}{\text{Viscosité}} \Leftrightarrow \frac{\text{Transfert convectif}}{\text{Transfert diffusif}}$$

- ⇒ Si  $Re < 1$  : la viscosité domine l'écoulement dit rampant
- ⇒ Si  $Re > 1$  : l'inertie gouverne l'écoulement. Généralement, les écoulements dans notre vie quotidienne sont caractérisés par  $Re > 1$

De même, en se référant à la formule de Reynolds, on distingue trois types d'écoulement pour :

- 1)  $Re < 2000$  : écoulement / régime laminaire caractérisé par des lignes de courants lisses et par un mouvement ordonné
- 2)  $2000 \leq Re \leq 4000$  : écoulement transitoire / régime de transition caractérisé par une fluctuation entre le régime laminaire et turbulent
- 3)  $Re > 4000$  : écoulement / régime turbulent caractérisé par une variation de vitesse d'écoulement et un mouvement désordonné.

## 2) Effet de la rugosité de l'élément sur l'écoulement du vent :

Par définition, la rugosité caractérise l'état de surface d'un matériau : elle désigne la hauteur moyenne des aspérités du matériau. Sur les parois rugueuses, l'épaisseur de la couche limite est plus importante que celle d'une paroi lisse. En effet, lors de l'écoulement du fluide généralement et du vent spécifiquement, les parois parallèles à la direction de ce dernier joue un rôle résistant au mouvement où une relation entre le coefficient de frottement et la rugosité se crée : on parle de perte de charge accidentelle du vent en aérodynamique tel que :

$$\Delta p = k \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2} \text{ (Pa)} \quad (\text{for. 1})$$

Avec :

- ***k*** : coefficient de perte de charge accidentelle (révèle les frottements)
- ***ρ*** : masse volumique du fluide
- ***V*** : vitesse moyenne d'écoulement

Cette quantité de charge perdue du vent est prise par les parois résistantes au mouvement. En d'autres terme, la formule exprimant les forces de frottements sur les parois dans l'EN 1991-1-4, 5.3(3) est la même que celle déjà citée :

$$F_{fr} = c_{fr} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$$

$$\Leftrightarrow F_{fr} = c_{fr} \cdot \left[ \frac{\rho \cdot V^2}{2} \right] \cdot A_{ref}$$

$$\Leftrightarrow p_{fr} = c_{fr} \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2} \text{ (Pa)} \quad (\text{for. 2})$$

Nous réalisons que les (for. 1) et (for. 2) sont identiques. Par suite, nous utiliserons les formules de l'EC où « *c<sub>fr</sub>* » est applicable aux murs, acrotères et toitures (cf. Tab. IV) :

Surface	Coefficient de frottement <i>c<sub>fr</sub></i>
lisse (à savoir acier, béton lisse)	0,01
rugueuse (à savoir béton brut, bardeaux bitumés (shingles))	0,02
très rugueuse (à savoir ondulations, nervures, pliures)	0,04

**Tab. IV** : Coefficient de frottement « *c<sub>fr</sub>* »

### 3) Classification d'écoulement et de structures aérodynamiques :

La classification des écoulements se divisent en deux catégories « décollé » et « non décollé » fonction de la forme générale de la structure « profilé » ou « non profilé »

#### 1. Structure profilée, écoulement non décollé :

Ce genre de structure est caractérisé par des formes arrondies, sans arête vive, et la dimension longitudinale parallèle au vent est largement supérieure à sa dimension transversale. Cette structure est conçue d'une manière à produire une terminaison du vent à l'aval non perpendiculaire à l'axe longitudinal. Par suite, les lignes de courants représentant la vitesse du fluide suivent la surface et tendent à rester globalement parallèle (exemple d'aile d'avion, fig. 12)

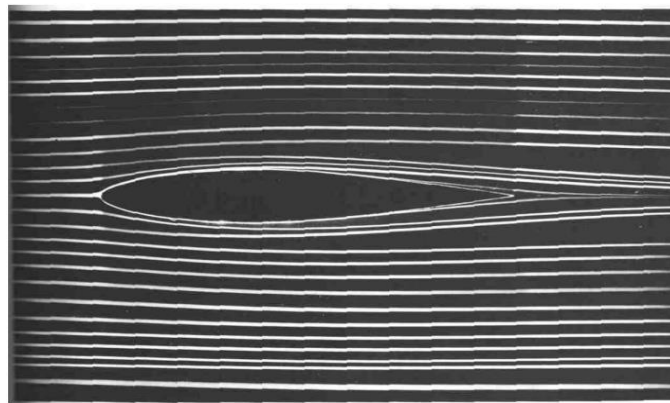
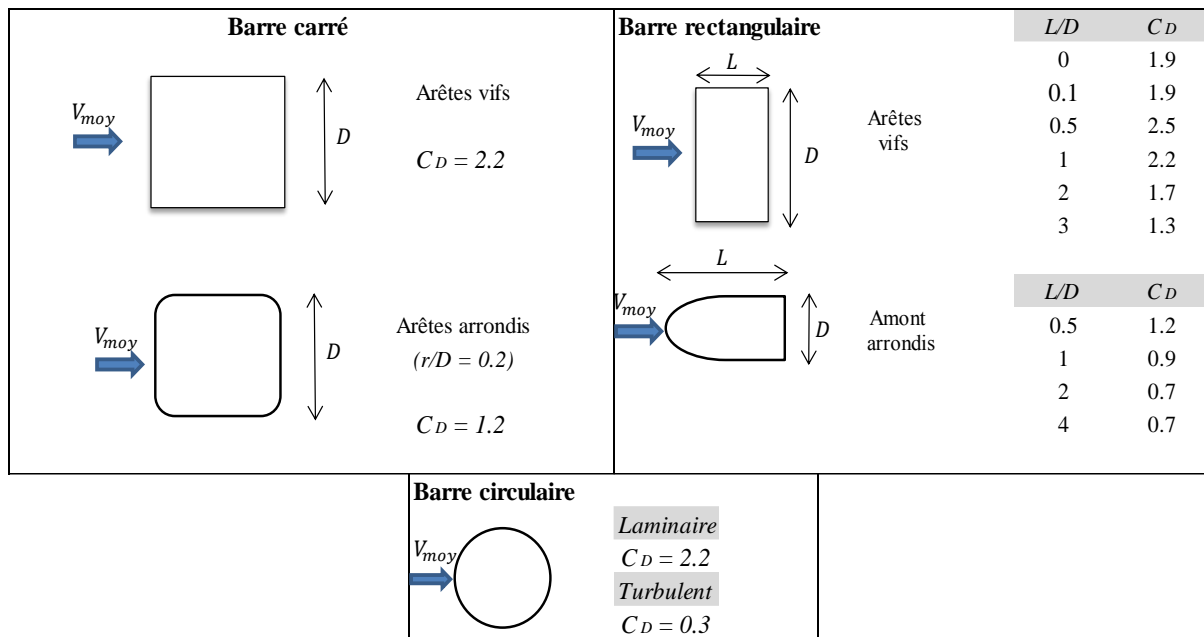


Fig. 12 : écoulement non décollé d'un profil d'ail

#### 2. Structure non profilée, écoulement décollé :

Les ouvrages non profilés, généralement utilisés en génie civil, ont les caractéristiques opposées des structures non profilées : en particulier, le bord de fuite comporte un culot produisant un phénomène de sillage important, et au voisinage des parois on observe la naissance de tourbillons. Dans ce cas on dit que la couche limite est décollée : l'écoulement principal n'adhère plus à la paroi et des efforts de trainée se produisent. Le coefficient de trainée provient de l'une des composantes du torseur d'effort «  $F_x$  » tel que :

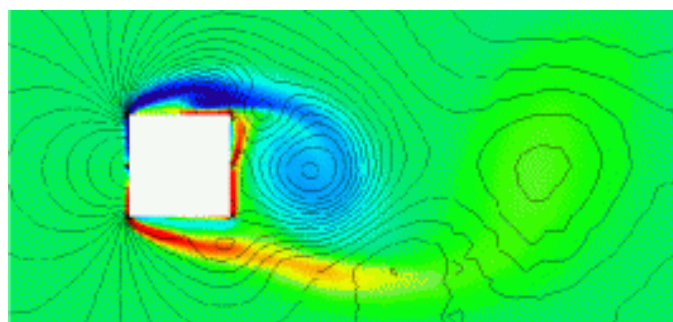
$$C_D = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{moy}^2}$$



**Fig. 13** : Variation de  $C_D$  en fonction du Ratio  $L/D$  ( $Re > 10^4$ )

Il est à noter qu'il existe deux types de décollement en fonction de la paroi :

- ⇒ Pour une parois arrondie, le point de décollement est localisé à une position variable dans le plan temps-espace
- ⇒ Pour une paroi anguleuse, le décollement va se manifester sur l'arête.





## IV. Aéroélasticité

### 1) Principe :

L'aéroélasticité est la branche où une analyse des phénomènes, due à l'interaction entre les forces aérodynamiques lors de l'écoulement d'un fluide et le mouvement de la structure répondant à cet écoulement, a lieu. Les principaux efforts aéroélastiques prise en considération en Génie Civil sont :

- Le détachement tourbillonnaire
- Le phénomène de galop
- Le phénomène de divergence et flottement
- Le phénomène de ballotement

Généralement, en cas de résonance, on observe le phénomène d'accrochage issu du couplage entre le détachement tourbillonnaire et la structure. De même, lors du mouvement de la structure, une modification de l'écoulement du vent se manifeste, modifiant ainsi les efforts sur la structure, induisant des forces de couplage aéroélastiques. D'où l'importance de l'étude de couplage fluide-structure. Dans le cas des bâtiments élancés, nous nous intéressons seulement au phénomène de détachement tourbillonnaire (les trois autres phénomènes sont observés dans le cas des ponts).

### 2) Effet de couplage fluide-structure :

Le couplage fluide-structure est un couplage dynamique non conservatif. Il apparaît lors de l'accélération du fluide au voisinage de la structure. Au-delà d'une certaine vitesse critique de l'écoulement, la structure absorbe beaucoup plus d'énergie qu'elle ne peut en dissiper. Une instabilité de la structure est provoquée. Elle se met à osciller fortement. Cette oscillation est due à la transformation d'une partie de l'énergie cinétique en énergie vibratoire de la structure. En interaction fluide-structure, la résolution des équations de Navier-Stokes est omniprésente dans le domaine mobile.

En effet, afin d'identifier le couplage fluide-structure, on a recours à la méthode Lagrangian-Eulérien Arbitraire où on se base sur l'équation de quantité de mouvement. L'équation se traduit en fonction de la vitesse du maillage  $\omega$  :

$$\rho \cdot \left[ \frac{\partial u}{\partial t} + ((u - \omega) \cdot \nabla) \cdot u \right] = -\nabla p + \mu \cdot \Delta u + f$$

### 3) Excitation par le détachement tourbillonnaire :

Dans le cas d'une structure non-profilée, on envisage des frottements importants dans les zones de décollement des côtés parallèle au vent ; ce qui provoque la création de tourbillons : cela génère des forces fluctuantes perpendiculaires à la direction du vent. Les vibrations de la construction se produisent lorsque la fréquence du détachement tourbillonnaire est identique à la fréquence propre du bâtiment. En d'autres termes, les vibrations se manifestent si la vitesse du vent est égale à la vitesse critique du vent, fonction de la fréquence propre du mode fondamental. En contrepartie, l'EN 1991-1-4, Annexe E indique qu'il n'est pas nécessaire d'examiner l'effet du détachement tourbillonnaire si :

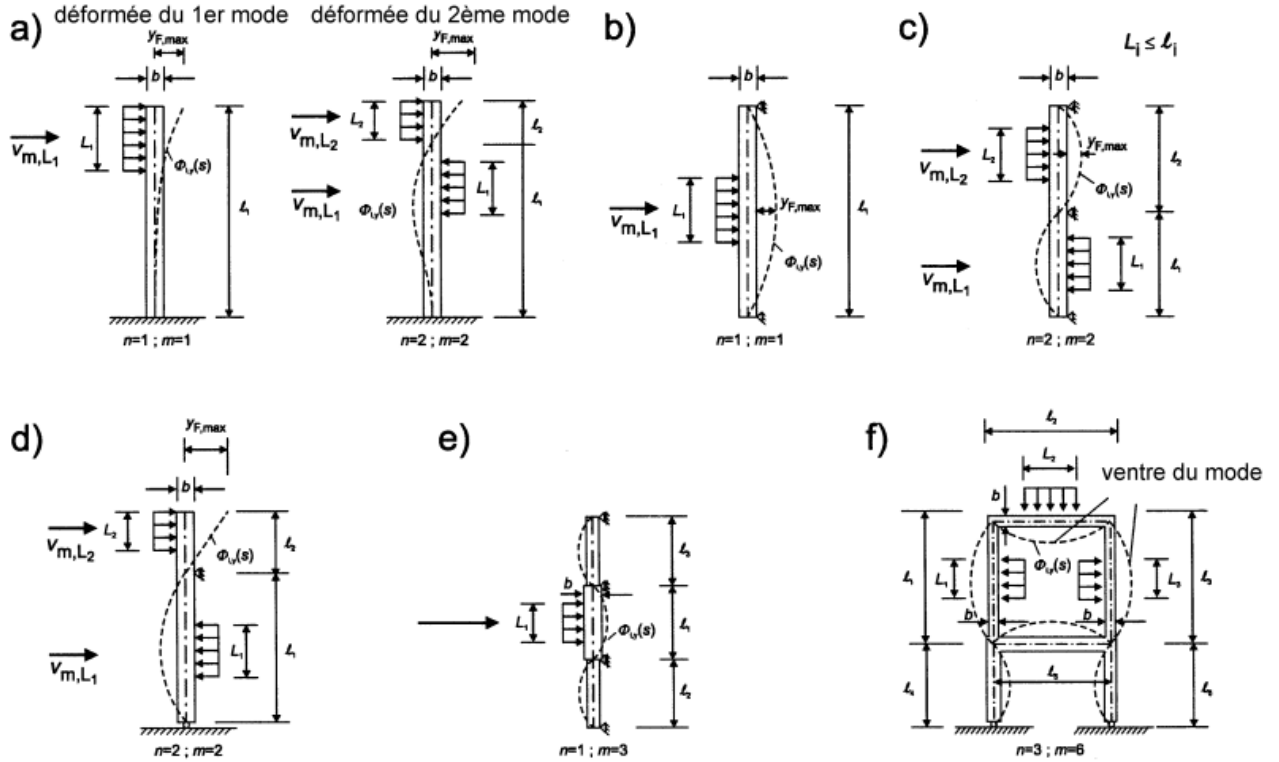
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\text{Plus grande dimension transversale}}{\text{Plus petite dimension transversale}} < 6 \\ \text{et} \\ V_{crit,i} > 1,25 \cdot V_m \end{array} \right.$$

Où :

$$V_{crit,i} = \frac{b \cdot n_{i,y}}{St}$$

Avec :

- $V_{crit,i}$  : vitesse critique du vent pour le mode  $i$
- $b$  : est la largeur de référence de la section transversale sur laquelle se produit le détachement tourbillonnaire en résonance et sur laquelle la déformée modale est maximale, pour la construction ou l'élément structural considérés ; dans le cas des cylindres à base circulaire, la largeur de référence est le diamètre extérieur
- $n_{i,y}$  : est la fréquence propre du mode considéré  $i$ , de vibration en flexion perpendiculairement au vent (cf. chap. 2, I.2.2)
- $St$  : nombre de Strouhal
- $V_m$  : vitesse moyenne caractéristique du vent sur 10 min, spécifié au niveau de la section transversale où se produit le détachement tourbillonnaire. En effet, il convient de positionner la *longueur de corrélation*  $L_j$  dans les zones de ventres du mode considéré, où  $V_{m,L_j}$  est prise au centre de  $L_j$ , comme illustré dans la figure 14.



**Fig. 14 :** Exemples d'application de la longueur de corrélation  $L_j$  ( $j=1, 2, 3$ )

D'après l'EN 1991-1-4, Annexe E.1.4, il existe une force d'inertie  $F_w(s)$  exprimée par unité de longueur, qui agit perpendiculairement à la direction du vent à l'emplacement  $s$  sur la construction et est donnée par l'expression :

$$F_w(s) = m(s) \cdot (2 \cdot \pi \cdot n_{i,y})^2 \cdot \Phi_{i,y} \cdot y_{F,max}$$

Avec :

- $m(s)$  : masse en vibration de la construction par unités de longueur (Kg/m)
- $n_{i,y}$  : fréquence propre de la construction
- $\Phi_{i,y}$  : déformée modale de la construction normalisée à 1 au point de déplacement maximal
- $y_{F,max}$  : déplacement maximal dans le temps au point où  $\Phi_{i,y}(s)$  est égal à 1 (cf. chap.2, I.2.1)

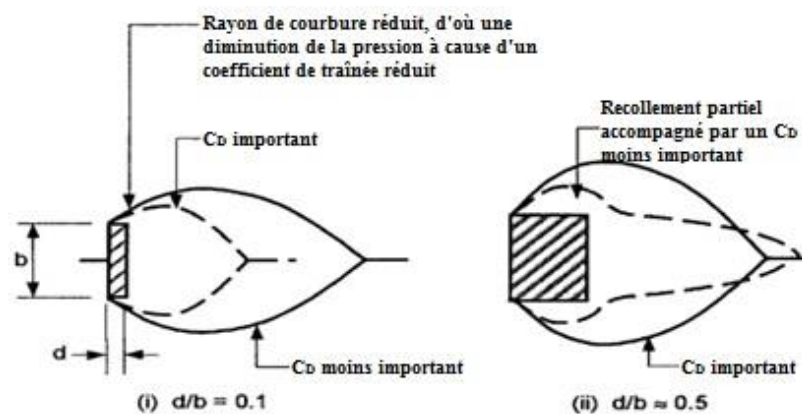
Il est à noter que la longueur de corrélation  $L_j$  est trouvée en fonction de l'amplitude de vibration  $y_F(s_j)$  (cf. Tableau V)

$y_F(s_j)/b$	$L_j / b$
$< 0,1$	6
0,1 à 0,6	$4,8 + 12 \cdot \frac{y_F(s_j)}{b}$
$> 0,6$	12

**Tab. V** : Longueur de corrélation  $L_j$  en fonction de l'amplitude de vibration  $y_{F,max}$

#### 4) Effet de Turbulence :

Les écoulements libres entourant les différentes dimensions du prisme en question peuvent avoir des effets significatifs sur les coefficients de traînée, et de même, produisent des forces de fluctuations (turbulences). La présence de ces turbulences conduit à un mélange et un entraînement dans les couches de cisaillement. Ces turbulences, fonction de la longueur de la face parallèle au vent, affectent le rayon de courbure du flux d'air de part et d'autre de la structure : ses petites turbulences induisent des forces perpendiculaires aux faces « d » où en résultent des vibrations (fig.15)



**Fig. 15** : Effet de turbulence sur les couches de cisaillement

## **Chapitre 2 : Réponse de la structure**

Le flux du vent, dans la vie réelle, est une charge vivante en fonction de la température, de l'environnement, de la pression atmosphérique et de la perturbation des charges mobiles qui résultent d'un changement des charges fluctuantes spatio-temporelles. Cela aboutit à une réponse concernant la structure à des critères de résistances et de confort importants.

### **I. Respect des critères**

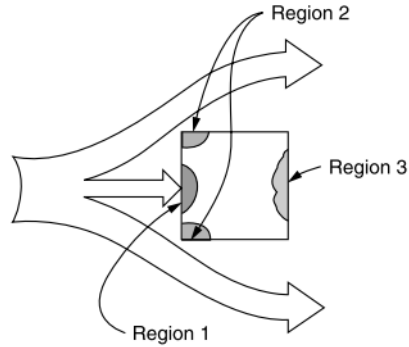
#### **1) Critères de résistance :**

Un bâtiment élancé de grande dimension est modélisé comme étant un élément vertical encastré d'une extrémité et libre de l'autre. La charge répartie appliquée au bâtiment donne naissance à une contrainte importante au pied de l'ouvrage ; d'où la nécessité de vérifier la résistance à la flexion bidimensionnelle à l'ELU.

La flexion induite par l'application des actions du vent engendre un mouvement périodique du bâtiment avec une fréquence  $f$  (Hz) : généralement la fréquence d'endommagement structurel est comprise entre 0,1 et 30 Hz où le structuriste prétend de son bâtiment, pour une fréquence critique  $f_{crit}$ , une réponse amortie.

Suite à ce mouvement périodique, un phénomène important y apparaît : la fatigue. En effet, l'ingénieur a pour objectif de calculer un nombre de cycles issus principalement des charges aéroélastiques (détachement tourbillonnaire) afin de résister à ce mouvement.

Une déformation de la structure est omniprésente lors de l'application des charges dynamiques de vent : cette valeur «  $y_{max}$  » est envisagée à l'extrémité libre de l'élément où l'objectif principal de l'ingénieur est de résoudre cette problématique à l'ELS. De même, les forces du vent jouent un rôle majeur dans la rupture ou l'arrachement de verre sur les façades du bâtiment. En effet, le bris de grandes vitres peut causer des dommages aux propriétés voisines et blesser les piétons sans avoir de risques structuraux. Cela nécessite l'identification des zones les plus critiques d'arrachement ou de rupture de verres. Des études réalisées sur des modèles à l'échelle de bâtiment, indiquent la présence de trois zones importantes de pressions :



**Fig. 16** : Identification des zones critiques

Avec :

- *Région 1* : zone de pression positive en amont
- *Région 2* : zone de pression négative aux angles en amonts
- *Région 3* : zone de pression négative en aval

## 2) Critère de confort :

Le critère de confort se concentre principalement sur les vibrations du bâtiment dues aux actions du vent. Ces vibrations peuvent ne pas créer de risques structuraux : en d'autres termes, les vibrations peuvent provenir du paramètre d'amplitude, de la durée ou du contenu fréquentiel. Généralement, la réponse humaine aux vibrations varie entre 0.063 et 1 Hz (ISO 6897, 7.2.1-Note).

### 1. Paramètre d'amplitude :

D'après le NF EN 1991-1-4, annexe E.1.5.1(3), le calcul suivant est utilisé pour trouver la réponse aux vibrations selon le premier mode de construction en console dont les dimensions, perpendiculairement au vent, sont réparties régulièrement le long de l'axe principal de la construction.

Le déplacement maximal caractéristique, au point de plus grande déformation, est donnée par :

$$y_{max} = \sigma_y \cdot K_p$$

Avec :

- $\sigma_y$  : écart type de déplacement

- $K_p$  : facteur de pointe

L'écart type du déplacement rapporté à la largeur  $b$ , au point de la plus grande dimension est calculé grâce à l'expression :

$$\frac{\sigma_y}{b} = \frac{1}{St^2} \cdot \frac{C_c}{\sqrt{\frac{Sc}{4\pi} - K_a \cdot \left[ 1 - \left( \frac{\sigma_y}{a_L \cdot b} \right)^2 \right]}} \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot b^2}{m_e}} \cdot \sqrt{\frac{b}{h}}$$

Avec :

- $C_c$  : constante aérodynamique fonction de la forme de la section transversale (cf. tableau VI)
- $K_a$  : paramètre d'amortissement aérodynamique dépendant de l'intensité de turbulence et de la rugosité du terrain dans la direction du vent donnée dans le tableau suivant. Il est à noter que  $K_a$  diminue quand  $I_v$  augmente.

Classe de terrain	Rugosité du terrain dans la direction du vent			
	0 ou II		IIIa, IIIb ou IV	
Vitesse critique $v_{crit,j}$	$\leq 10$ m/s	$> 10$ m/s	$\leq 7$ m/s	$> 7$ m/s
$K_a$ :	$K_a = K_{a,max}$	$K_a = K_{a,max} \cdot K_v(I_v)$	$K_a = K_{a,max}$	$K_a = K_{a,max} \cdot K_v(I_v)$

où :

$K_{a,max}$  est donné dans le tableau

$K_v(I_v)$  est un coefficient réducteur fonction de l'intensité de turbulence  $I_v$  calculée au niveau du sommet de la construction ;

$I_v$  est définie en II.3 ;

$K_v(I_v)$  est donné par l'expression (E.27-NA) :

$$\begin{aligned} K_v(I_v) &= 1 - 3I_v & \text{si } I_v \leq 0,25 \\ K_v(I_v) &= 0,25 & \text{si } I_v > 0,25 \end{aligned}$$

- $a_L$  : amplitude de limitation normalisée donnant le déplacement des constructions très faiblement amorties (cf. tableau VI)

*\*  $K_a$  et  $a_L$  prend en compte les charges du vent causées par le mouvement du bâtiment*

- $St$  : nombre de Strouhal
- $\rho$  : masse volumique de l'air dans les conditions du détachement tourbillonnaire, pris égal à 1,225 Kg/m<sup>3</sup>

- $m_e$  : la masse effective par unité de longueur exprimée par la formule

$$m_e = \frac{\int_0^l m(s) \cdot \Phi_1^2(s) \cdot ds}{\int_0^l \Phi_1^2(s) \cdot ds}$$

- $m$  : masse par unité de longueur
- $l$  : hauteur de la construction

⇒ Pour simplification de calcul,  $m_e$  est égal au rapport de la masse total du bâtiment par rapport à sa hauteur

$$\Rightarrow m_e = \frac{m_{\text{bâtiment}}}{h}$$

La solution de l'équation est représentée ci-dessous :

$$\left(\frac{\sigma_y}{b}\right)^2 = c_1 + \sqrt{c_1^2 + c_2}$$

Avec :

- $c_1 = \frac{a_L^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{Sc}{4\pi \cdot K_a}\right)$
- $c_2 = \frac{\rho \cdot b^2}{m_e} \cdot \frac{a_L^2}{K_a} \cdot \frac{C_c^2}{St^4} \cdot \frac{b}{h}$

Constante	Cylindre à base circulaire $Re \leq 10^5$	Cylindre à base circulaire $Re = 5 \cdot 10^5$	Cylindre à base circulaire $Re \geq 10^6$	Section transversale carrée
$C_c$	0,02	0,005	0,01	0,04
$K_{a,max}$	2	0,5	1	6
$a_L$	0,4	0,4	0,4	0,4
NOTE Dans le cas des cylindres à base circulaire, les constantes $C_c$ et $K_{a,max}$ sont supposées varier de manière linéaire avec le logarithme du nombre de Reynolds pour $10^5 < Re < 5 \cdot 10^5$ et pour $5 \cdot 10^5 < Re < 10^6$ , respectivement.				

**Tab. VI** : Constantes pour la détermination de l'effet du détachement tourbillonnaire

De même, le facteur de pointe exprimé donne la valeur recommandée suivante :

$$K_p = \sqrt{2} \cdot \left[ 1 + 1,2 \cdot \arctg \left( 0,75 \cdot \frac{Sc}{4\pi \cdot K_a} \right) \right]$$



## 2. Fréquence fondamentale :

La fréquence fondamentale de flexion «  $n_1$  » de bâtiments rectangulaires à plusieurs niveaux ayant une hauteur de plus de 50m peut être estimé grâce à l'expression :

$$n_1 = \frac{\sqrt{d}}{0.1 * h} \text{ (Hz)}$$

\* Pour  $n_1$  propre à un bâtiment circulaire, ce référer à l'Annexe q'6

## II. Différents types de simulation

### 1) Numérique :

La fonctionnalité ou l'efficacité des systèmes techniques est toujours déterminés par certaines propriétés. Une connaissance approfondie de ces propriétés est souvent la clé de la compréhension des systèmes ou le point de départ pour leur optimisation. Grâce aux investigations analytiques à l'aide de l'ordinateur, les ingénieurs ont pu y concevoir et visualiser clairement les effets du vent sur la structure. Les avantages des simulations numériques sont les suivants :

- 1) Les résultats numériques sont souvent obtenus rapidement et à moindre coût
- 2) Les variations des paramètres sur l'ordinateur sont généralement facilement réalisables
- 3) La simulation fournit souvent des informations plus complètes dues au calcul global et simultanée de différents problèmes

Pour illustrer les différents aspects qui jouent rôle lors de l'utilisation de techniques de simulation numérique, la procédure générale est représentée :

La première étape consiste en une modélisation mathématique appropriée des processus à examiner ou, dans le cas où un programme est utilisé, du choix du modèle le mieux adapté au problème. Cet aspect est considéré comme critique, car la simulation ne donnera pas de résultats valables si elle n'est pas basée sur un modèle adéquat.

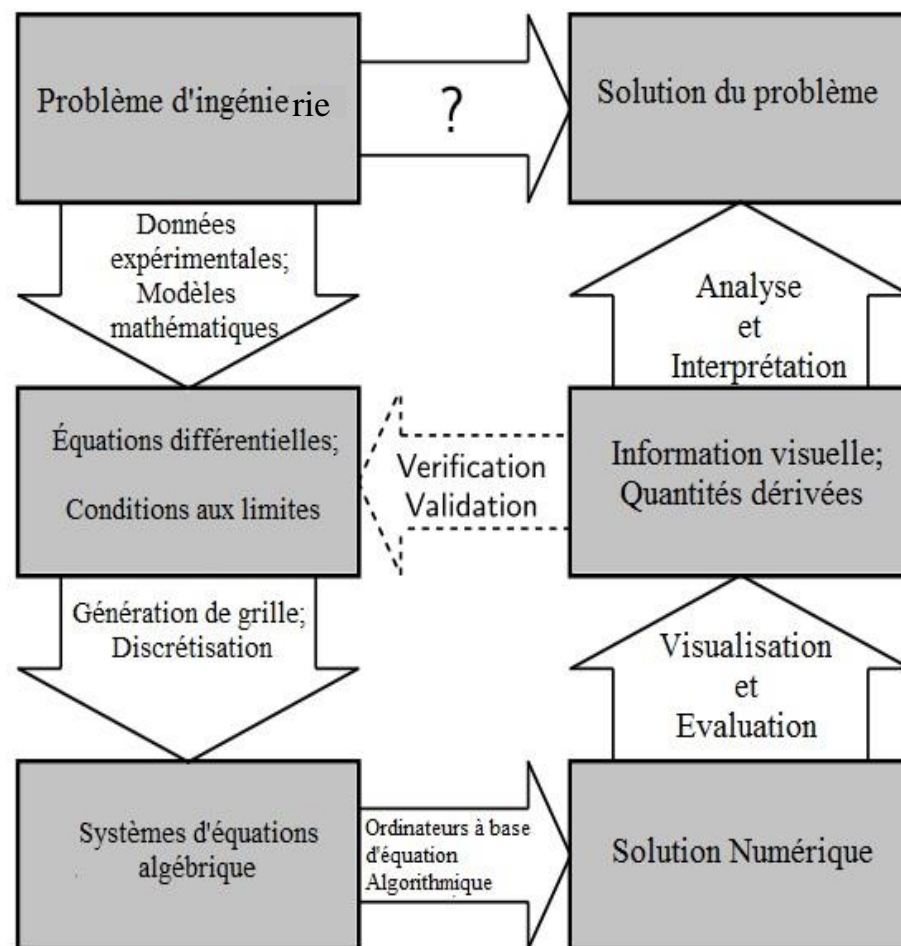
Le problème qui résulte de la modélisation, généralement des systèmes d'équations différentielles ou d'intégrales qui dérivent du cadre de la mécanique du milieu continu, doit être convenablement approché par un nombre fini d'inconnus à calculer. Ce processus, appelé «discrétisation », englobe deux tâches principales :

- 1) *La discrétisation du domaine problématique* : elle se rapproche du domaine continu (spatio-temporel) par un nombre fini de sous domaines, dans lesquels on détermine des valeurs numériques des quantités inconnues.

- 2) *La discrétisation des équations* : l'ensemble des relations pour le calcul des quantités inconnues est obtenue par la discrétisation des équations, qui donne une approximation du système continu par l'intermédiaire de systèmes discrets.

Ainsi, la solution numérique donne un ensemble de valeurs liées au domaine problématique discrétisé où l'approximation de la solution peut être construite.

L'étape suivante consiste en la solution des systèmes d'équations algébriques où l'on est souvent confronté à des équations avec plusieurs millions d'inconnues : dans cette phase, les équations algorithmiques et les ordinateurs entrent en jeu. Une fois les résultats sont disponibles, la validation et la vérification sont nécessaires pour adopter le modèle ou pour répéter le calcul avec une meilleure précision de discrétisation.



**Fig. 17 :** Procédé général de simulation numérique

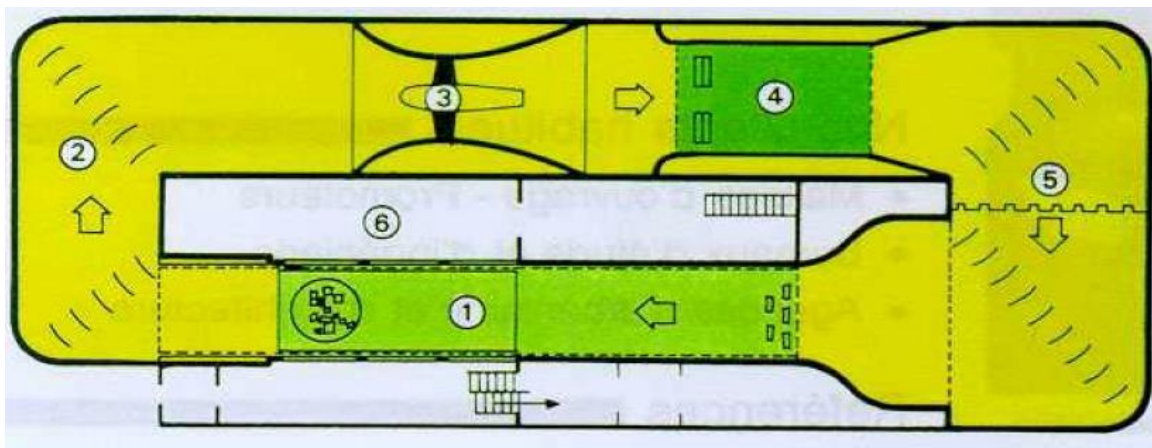
Plus précisément, la détermination de la distribution du flux d'air entourant un bâtiment se fonde sur deux méthodes numériques :

- 1) *La méthode zonale* : grâce à l'équation de Bernoulli, on calcule l'écoulement du vent entre les zones spécifiées. La pression exercée par le vent sur le bâtiment est le paramètre influant la prédiction du flux d'air ; et la détermination de la pression exercée à son tour est fonction de la direction et vitesse du vent, la géométrie de la structure et la localisation du bâtiment.
- 2) *La technique CFD* (Computational fluid dynamics) : la résolution des équations différentielles de conservation de masse, d'énergie, de moment (issus de l'équation de Navier-Stokes) et de la température est omniprésente pour calculer le mouvement de l'air à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment.

L'étape essentielle est la reproduction du vent en tant que vitesse, intensité de turbulence et contenu fréquentiel tel que les rafales et tourbillons. On ne peut pas oublier que la nature du vent dépend des obstacles rencontrés avant d'atteindre le bâtiment ; d'où la nécessité de modélisation des obstacles entourant la structure considérée.

### 3) Physique :

La soufflerie à couche limite a pour principe de recréer la couche limite turbulente grâce à la rugosité et aux blocs fixés sur le plancher contenant le modèle d'étude. Les reliefs, les bâtiments, et toute végétation importante sont modélisés afin de simuler les effets de perturbations et de vent incident.



*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

Deux types de maquettes sont généralement utilisés :

- 1) *Maquette rigide* : elle sert à donner des informations concernant les pressions moyennes et fluctuantes sur les faces du bâtiment, niveau par niveau (forces et moments). Généralement, cette méthode aide à la conception des revêtements et des vitrages des façades mais ne simule pas les caractéristiques dynamiques du bâtiment.
- 2) *Maquette aéroélastique* : ce type de maquette permet de :
  - a) Obtenir les forces de vent
  - b) Connaître les déviations et accélération du vent
  - c) Connaître les forces dynamiques
  - d) Inspecter le mouvement dû au vent (au niveau de la structure et du confort)

### III. Optimisation d'un bâtiment

Dans le présent paragraphe, on cherche à optimiser le bâtiment convenable sur le plan d'une réponse dynamique grâce à plusieurs coefficients et paramètres :

- 1) Le coefficient de turbulence  $I_v(z)$
- 2) La vitesse critique du vent  $V_{crit,i}$
- 3) Le coefficient de force  $C_f$
- 4) Le déplacement maximal caractéristique  $y_{max}$
- 5) La force d'inertie due aux effets aéroélastiques  $F_w(s)$

*\*Tout paramètre manquant se trouve dans l'Annexe de ce document (q'7)*

#### 1) Coefficient de turbulence « $I_v(z)$ » :

Afin d'étudier les turbulences du vent, on a fixé le coefficient orographique pour une valeur égale à 1, et une valeur de base de la vitesse de référence du vent prise égale à 26m/s (cas du Liban) appliquée sur un bâtiment de hauteur (197,2) m. L'étude est faite pour les cinq régions (0, II, IIIa, IIIb, IV) où on se base principalement sur la longueur de rugosité «  $z_0$  ». En région 0, la turbulence diminue progressivement de la valeur  $I_v(5) = 0.14475$  jusqu'à atteindre une valeur  $I_v(197,2) = 0.09449$ . Les turbulences du vent dans les régions II, IIIa, IIIb et IV présentent la même variation que celle de la région 0, dont les turbulences augmentent avec les catégories de terrain comme il est indiqué dans les tableaux suivants :

region 0						region II					
Calcule de Cr(z)		Calcule de Vm		Calcule de Iv(z)		Calcule de Cr(z)		Calcule de Vm		Calcule de Iv(z)	
z0	0.005	C0	1	C0	1	z0	0.05	C0	1	C0	1
Kr	0.1617	Vb(m/s)	26	Kl	0.9999	Kr	0.19	Vb(m/s)	26	Kl	0.995
hauteur (z)	Cr(z)		Vm(z)		Iv(z)	hauteur (z)	Cr(z)		Vm(z)		Iv(z)
0			0		0	0			0		0
5	1.11698		29.04158		0.14475	5	0.87498		22.7495		0.21606
10	1.22907		31.95571		0.13155	10	1.00668		26.1737		0.1878
15	1.29463		33.66037		0.12489	15	1.08372		28.1767		0.17445
20	1.34115		34.86984		0.12056	20	1.13838		29.5978		0.16607
25	1.37723		35.80798		0.1174	25	1.18078		30.7002		0.16011
30	1.40671		36.5745		0.11494	30	1.21542		31.6008		0.15554
35	1.43164		37.22258		0.11294	35	1.24471		32.3623		0.15188
40	1.45323		37.78397		0.11126	40	1.27008		33.022		0.14885
45	1.47228		38.27916		0.10982	45	1.29246		33.6038		0.14627
50	1.48931		38.72211		0.10856	50	1.31247		34.1243		0.14404
55	1.50472		39.12282		0.10745	55	1.33058		34.5951		0.14208
60	1.51879		39.48863		0.10646	60	1.34711		35.025		0.14034
65	1.53174		39.82514		0.10556	65	1.36232		35.4204		0.13877
70	1.54372		40.13671		0.10474	70	1.3764		35.7865		0.13735
75	1.55488		40.42677		0.10399	75	1.38951		36.1273		0.13605
80	1.56531		40.6981		0.10329	80	1.40177		36.4461		0.13486
85	1.57511		40.95298		0.10265	85	1.41329		36.7456		0.13377
90	1.58436		41.19329		0.10205	90	1.42415		37.028		0.13275
95	1.5931		41.4206		0.10149	95	1.43443		37.2951		0.13179
100	1.60139		41.63624		0.10096	100	1.44417		37.5485		0.13091
105	1.60928		41.84137		0.10047	105	1.45344		37.7895		0.13007
110	1.61681		42.03695		0.1	110	1.46228		38.0193		0.12928
115	1.62399		42.22383		0.09956	115	1.47073		38.2389		0.12854
120	1.63088		42.40276		0.09914	120	1.47881		38.4491		0.12784
125	1.63748		42.57438		0.09874	125	1.48657		38.6508		0.12717
130	1.64382		42.73927		0.09836	130	1.49402		38.8445		0.12654
135	1.64992		42.89794		0.09799	135	1.50119		39.031		0.12593
140	1.6558		43.05084		0.09765	140	1.5081		39.2106		0.12536
145	1.66148		43.19837		0.09731	145	1.51477		39.384		0.1248
150	1.66696		43.3409		0.09699	150	1.52121		39.5515		0.12428
155	1.67226		43.47875		0.09669	155	1.52744		39.7134		0.12377
160	1.67739		43.61223		0.09639	160	1.53347		39.8703		0.12328
165	1.68237		43.7416		0.0961	165	1.53932		40.0223		0.12281
170	1.6872		43.86711		0.09583	170	1.54499		40.1698		0.12236
175	1.69188		43.98898		0.09556	175	1.5505		40.313		0.12193
180	1.69644		44.10742		0.09531	180	1.55585		40.4521		0.12151
185	1.70087		44.22261		0.09506	185	1.56106		40.5875		0.1211
190	1.70518		44.33472		0.09482	190	1.56612		40.7192		0.12071
195	1.70938		44.44393		0.09459	195	1.57106		40.8475		0.12033
197.2	1.7112		44.4911		0.09449	197.2	1.57319		40.903		0.12017

**Tab. VII** : Variations de Iv(z) en fonction de la hauteur du bâtiment

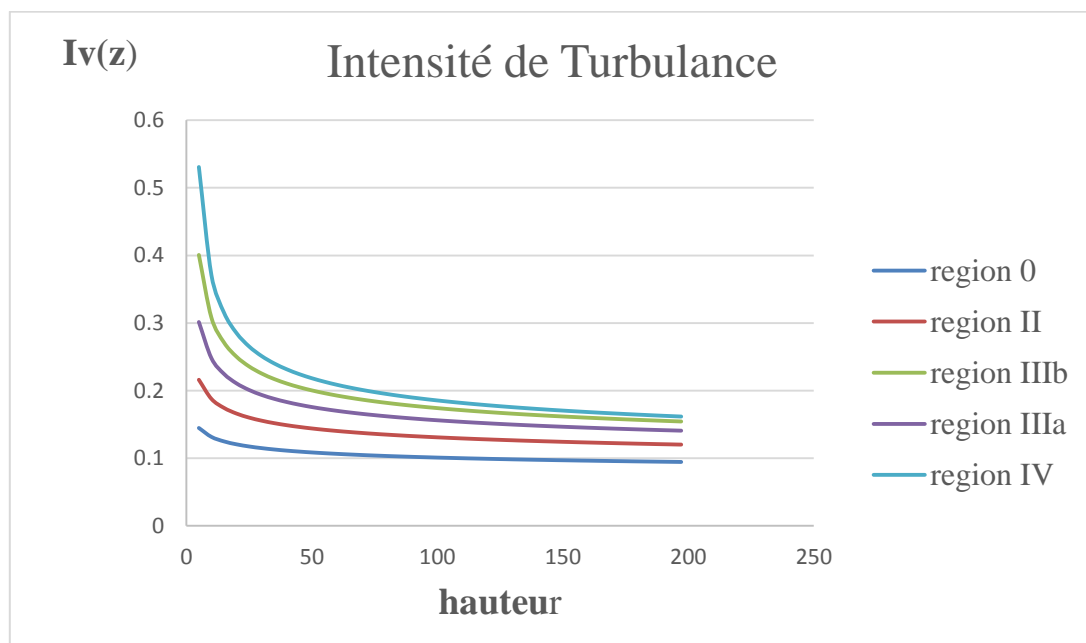
region IIIa					
Calcule de Cr(z)		Calcule de Vm		Calcule de Iv(z)	
z0	0.2	C0	1	C0	1
Kr	0.209	Vb(m/s)	26	Kl	0.9703
hauteur (z)	Cr(z)		Vm(z)		Iv(z)
0			0		0
5	0.67275		17.49137		0.30144
10	0.81761		21.25793		0.24803
15	0.90236		23.46123		0.22474
20	0.96248		25.02449		0.2107
25	1.00912		26.23706		0.20096
30	1.04722		27.22779		0.19365
35	1.07944		28.06545		0.18787
40	1.10735		28.79106		0.18313
45	1.13196		29.43109		0.17915
50	1.15399		30.00362		0.17573
55	1.17391		30.52153		0.17275
60	1.19209		30.99435		0.17012
65	1.20882		31.42931		0.16776
70	1.22431		31.83201		0.16564
75	1.23873		32.20692		0.16371
80	1.25222		32.55762		0.16195
85	1.26489		32.88705		0.16032
90	1.27683		33.19765		0.15882
95	1.28813		33.49145		0.15743
100	1.29885		33.77018		0.15613
105	1.30905		34.03531		0.15492
110	1.31877		34.2881		0.15377
115	1.32806		34.52965		0.1527
120	1.33696		34.76092		0.15168
125	1.34549		34.98274		0.15072
130	1.35369		35.19587		0.14981
135	1.36157		35.40095		0.14894
140	1.36918		35.59857		0.14811
145	1.37651		35.78926		0.14732
150	1.3836		35.97348		0.14657
155	1.39045		36.15166		0.14585
160	1.39708		36.32418		0.14515
165	1.40352		36.49139		0.14449
170	1.40975		36.65361		0.14385
175	1.41581		36.81113		0.14323
180	1.4217		36.96421		0.14264
185	1.42743		37.1131		0.14207
190	1.433		37.25801		0.14152
195	1.43843		37.39917		0.14098
197.2	1.44077		37.46013		0.14075

region IIIb					
Calcule de Cr(z)		Calcule de Vm		Calcule de Iv(z)	
z0	0.5	C0	1	C0	1
Kr	0.223	Vb(m/s)	26	Kl	0.9226
hauteur (z)	Cr(z)		Vm(z)		Iv(z)
0			0		0
5	0.51348		13.3504		0.40068
10	0.66805		17.3693		0.30797
15	0.75847		19.7201		0.27126
20	0.82262		21.3881		0.2501
25	0.87238		22.6819		0.23584
30	0.91304		23.739		0.22534
35	0.94741		24.6328		0.21716
40	0.97719		25.407		0.21054
45	1.00346		26.0899		0.20503
50	1.02695		26.7008		0.20034
55	1.04821		27.2534		0.19628
60	1.06761		27.7579		0.19271
65	1.08546		28.222		0.18954
70	1.10199		28.6516		0.1867
75	1.11737		29.0517		0.18413
80	1.13176		29.4259		0.18179
85	1.14528		29.7774		0.17964
90	1.15803		30.1088		0.17766
95	1.17009		30.4222		0.17583
100	1.18152		30.7196		0.17413
105	1.1924		31.0025		0.17254
110	1.20278		31.2723		0.17105
115	1.21269		31.53		0.16966
120	1.22218		31.7767		0.16834
125	1.23129		32.0134		0.16709
130	1.24003		32.2408		0.16591
135	1.24845		32.4597		0.1648
140	1.25656		32.6705		0.16373
145	1.26438		32.874		0.16272
150	1.27194		33.0705		0.16175
155	1.27926		33.2606		0.16083
160	1.28634		33.4447		0.15994
165	1.2932		33.6231		0.15909
170	1.29985		33.7962		0.15828
175	1.30632		33.9643		0.1575
180	1.3126		34.1276		0.15674
185	1.31871		34.2865		0.15602
190	1.32466		34.4411		0.15532
195	1.33045		34.5917		0.15464
197.2	1.33295		34.6568		0.15435

**Tab. VIII** : Variations de Iv(z) en fonction de la hauteur du bâtiment

region IV					
Calcul de $Cr(z)$		Calcul de $V_m$		Calcul de $I_v(z)$	
$z_0$	1	$C_0$	1	$C_0$	1
Kr	0.234	$V_b(m/s)$	26	Kl	0.8542
hauteur (z)	$Cr(z)$		$V_m(z)$		$I_v(z)$
0			0		0
5	0.37661		9.79182		0.53074
10	0.5388		14.0089		0.37097
15	0.63368		16.4758		0.31543
20	0.701		18.226		0.28514
25	0.75322		19.5836		0.26537
30	0.79588		20.6929		0.25115
35	0.83195		21.6307		0.24026
40	0.8632		22.4431		0.23156
45	0.89076		23.1597		0.2244
50	0.91541		23.8007		0.21835
55	0.93772		24.3806		0.21316
60	0.95808		24.91		0.20863
65	0.97681		25.397		0.20463
70	0.99415		25.8478		0.20106
75	1.01029		26.2676		0.19785
80	1.02539		26.6603		0.19493
85	1.03958		27.0291		0.19227
90	1.05296		27.3768		0.18983
95	1.06561		27.7058		0.18758
100	1.07761		28.0179		0.18549
105	1.08903		28.3147		0.18354
110	1.09991		28.5977		0.18173
115	1.11031		28.8682		0.18002
120	1.12027		29.1271		0.17842
125	1.12983		29.3755		0.17691
130	1.139		29.6141		0.17549
135	1.14783		29.8437		0.17414
140	1.15634		30.065		0.17286
145	1.16456		30.2784		0.17164
150	1.17249		30.4847		0.17048
155	1.18016		30.6842		0.16937
160	1.18759		30.8774		0.16831
165	1.19479		31.0646		0.1673
170	1.20178		31.2462		0.16632
175	1.20856		31.4226		0.16539
180	1.21515		31.5939		0.16449
185	1.22156		31.7606		0.16363
190	1.2278		31.9229		0.1628
195	1.23388		32.0809		0.162
197.2	1.23651		32.1492		0.16165

**Tab. IX :** Variations de  $I_v(z)$  pour région 4 en fonction de la hauteur du bâtiment





Etant inversement proportionnelle, la vitesse moyenne du vent augmente en fonction de la hauteur, contrairement à la turbulence, indépendamment de la section de la structure ; ce qui s'explique par la formule de  $I_v(z)$  déjà rencontrée. *Donc, plus on augmente dans les catégories de terrain, plus la pression de pointe diminue.*

En effet, on réalise bien que la turbulence du vent est beaucoup plus grande au pied qu'à la tête de la structure: cela est dû à la présence d'un obstacle robuste et parallèle (dans notre cas car  $C_0$  égale à 1) au flux du vent qui n'est autre que le sol car le sol joue un rôle de « cause de moment » où des rafales transversales au pied se produisent principalement en fonction de la rugosité du sol, et des rafales longitudinales et verticales généralement. L'interaction de ces rafales entre elles d'une part, et avec le flux d'autre part engendre des turbulences. On ne peut pas y négliger la présence des turbulences entourant le bâtiment qui joue un grand rôle concernant les vibrations de la structure et qui est bien clair dans les tableaux déjà établis.

## 2) La vitesse critique du vent $V_{crit,i}$

La mise en vibration de la construction peut se produire lorsque la vitesse du vent est égale à la vitesse critique du vent  $V_{crit,i}$  : c'est l'équivalent de l'obtention la fréquence des effets aéroélastiques généralement (détachement tourbillonnaire spécifiquement), identique à la fréquence propre de la construction.

Pour cela, une étude des trois cas suivants a été réalisée:

### 1. Bâtiment rectangulaire de hauteur constante :

Dans ce premier cas, on fixe :

- $h = 100 \text{ m}$
- $b = 20 \text{ m}$

On fait varier la dimension « d » parallèle au vent où pour  $d/b$  compris entre 0 et 3, et pour  $d/h$  compris entre 0 et 0.6, la vitesse critique augmente de 0 à 258.2 m/s pour diminuer fortement de 258.2 m/s à 111.55 m/s pour une valeur de  $d/b$  égale à 3.5 et  $d/h$  égale à 0.7. De ces rapports ci, «  $V_{crit,i}$  » recroît de 111.55 à 314.27 m/s .

### 2. Bâtiment rectangulaire de hauteur variable :

Ayant h et d variables et b fixe (égal à 20 m), on observe une même variation que le cas précédent où pour  $d/h < 0.2$  et  $d/b < 1.8$  la vitesse critique est inférieure à 92.593 m/s. Pour  $d/b$  égale à 3.5, la vitesse critique est égale à 82.633 m/s.



Calcul de Vcrit			
b=20m	h=100m		

d/b	d	$n_{i,y}$	St	Vcrit1
0	0	0	0.12	0
1	20	0.44721	0.12	74.5356
1.2	24	0.4899	0.108	90.7218
1.4	28	0.52915	0.096	110.24
1.6	32	0.56569	0.084	134.687
1.8	36	0.6	0.072	166.667
2	40	0.63246	0.06	210.819
2.2	44	0.66332	0.06	221.108
2.4	48	0.69282	0.06	230.94
2.6	52	0.72111	0.06	240.37
2.8	56	0.74833	0.06	249.444
3	60	0.7746	0.06	258.199
3.2	64	0.8	0.096	166.667
3.4	68	0.82462	0.132	124.943
3.5	70	0.83666	0.15	111.555
3.6	72	0.84853	0.14738	115.148
3.8	76	0.87178	0.14204	122.751
4	80	0.89443	0.1367	130.86
4.2	84	0.91652	0.13136	139.542
4.4	88	0.93808	0.12602	148.878
4.6	92	0.95917	0.12068	158.96
4.8	96	0.9798	0.11534	169.897
5	100	1	0.11	181.818
5.2	104	1.0198	0.1092	186.777
5.4	108	1.03923	0.1084	191.74
5.6	112	1.0583	0.1076	196.71
5.8	116	1.07703	0.1068	201.692
6	120	1.09545	0.106	206.688
6.2	124	1.11355	0.1052	211.702
6.4	128	1.13137	0.1044	216.738
6.6	132	1.14891	0.1036	221.798
6.8	136	1.16619	0.1028	226.885
7	140	1.18322	0.102	232.003
7.2	144	1.2	0.1012	237.154
7.4	148	1.21655	0.1004	242.341
7.6	152	1.23288	0.0996	247.567
7.8	156	1.249	0.0988	252.834
8	160	1.26491	0.098	258.145
8.2	164	1.28062	0.0972	263.503
8.4	168	1.29615	0.0964	268.91
8.6	172	1.31149	0.0956	274.37

Calcul de Vcrit						
b=20m						

d/b	d	h	d/h	$n_{i,y}$	St	Vcrit1
0	0	-	-	-	-	0
1	20	200	0.1	0.22361	0.12	37.2678
1.2	24	195	0.12308	0.25123	0.108	46.524
1.4	28	190	0.14737	0.2785	0.096	58.0209
1.6	32	185	0.17297	0.30578	0.084	72.8038
1.8	36	180	0.2	0.33333	0.072	92.5926
2	40	175	0.22857	0.3614	0.06	120.468
2.2	44	170	0.25882	0.39019	0.06	130.064
2.4	48	165	0.29091	0.41989	0.06	139.964
2.6	52	160	0.325	0.45069	0.06	150.231
2.8	56	155	0.36129	0.48279	0.06	160.932
3	60	150	0.4	0.5164	0.06	172.133
3.2	64	145	0.44138	0.55172	0.096	114.943
3.4	68	140	0.48571	0.58902	0.132	89.2447
3.5	70	135	0.51852	0.61975	0.15	82.6331
3.6	72	130	0.55385	0.65271	0.14738	88.5756
3.8	76	125	0.608	0.69742	0.14204	98.201
4	80	120	0.66667	0.74536	0.1367	109.05
4.2	84	115	0.73043	0.79697	0.13136	121.341
4.4	88	110	0.8	0.8528	0.12602	135.344
4.6	92	105	0.87619	0.91349	0.12068	151.391
4.8	96	100	0.96	0.9798	0.11534	169.897
5	100	95	1.05263	1.05263	0.11	191.388
5.2	104	90	1.15556	1.13312	0.1092	207.53
5.4	108	85	1.27059	1.22262	0.1084	225.576
5.6	112	80	1.4	1.32288	0.1076	245.888
5.8	116	75	1.54667	1.43604	0.1068	268.922
6	120	70	1.71429	1.56492	0.106	295.268
6.2	124	65	1.90769	1.71316	0.1052	325.695
6.4	128	60	2.13333	1.88562	0.1044	361.23
6.6	132	55	2.4	2.08893	0.1036	403.269
6.8	136	50	2.72	2.33238	0.1028	453.771
7	140	45	3.11111	2.62937	0.102	515.563
7.2	144	40	3.6	3	0.1012	592.885
7.4	148	35	4.22857	3.47586	0.1004	692.403
7.6	152	30	5.06667	4.10961	0.0996	825.223
7.8	156	25	6.24	4.996	0.0988	1011.34
8	160	20	8	6.32456	0.098	1290.73
8.2	164	15	10.9333	8.5375	0.0972	1756.69
8.4	168	10	16.8	12.9615	0.0964	2689.1
8.6	172	5	34.4	26.2298	0.0956	5487.4

Tab. X : Variations de Vcrit en fonction de « d » et « h » du bâtiment

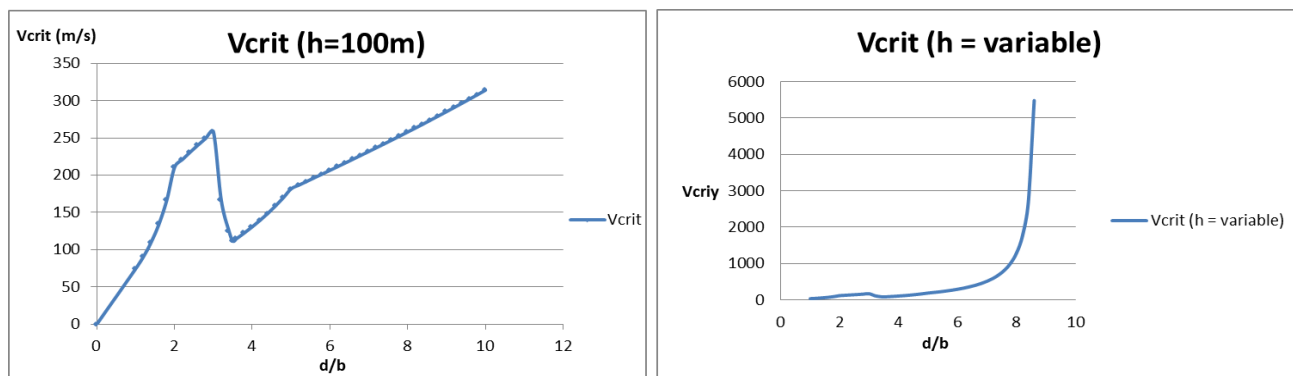


Fig. 18 : Variations de Vcrit pour h constante et variable

Tout en comparant les deux tableaux, on remarque que pour un bâtiment ayant une section de  $(b \times 3,5.b) \text{ m}^2$ , on risque de s'approcher du phénomène de détachement tourbillonnaire. Cela est évident grâce au nombre de Strouhal qui atteint son maximum égale à 0.15, pour une section rectangulaire  $(= \frac{f \cdot b}{V_{crit}})$  où les deux paramètres St et  $V_{crit}$  sont inversement proportionnels.

En effet, le rapport  $d/b$  égal à 3.5 mène à un détachement agressif sur l'arrête amont suivi d'un rattachement sur les côtés de longueur « d » en considérant un vent perpendiculaire à la face D : ces forces ne sont autres que  $F_w(s)$  déjà mentionné (*chapitre 1, paragraphe 4.3*). On ne peut pas négliger les vitesses critiques correspondantes pour  $d/b < 1.4$  où nous respectons la condition :  $V_{crit,i} < 1.25 V_m$

### 3. Bâtiment circulaire de hauteur variable :

Pour une section circulaire de diamètre variable allant de 20 à 172m, et h de 200 à 5m dans cet ordre, on observe une augmentation régulière de la vitesse critique du vent de 11.572 m/s pour  $\phi/h$  égale à 0.1, à  $1 \cdot 10^6$  pour  $\phi/h$  égale à 34.4.

On réalise bien que pour  $\phi/h < 0,2286$  la vitesse critique est considérée

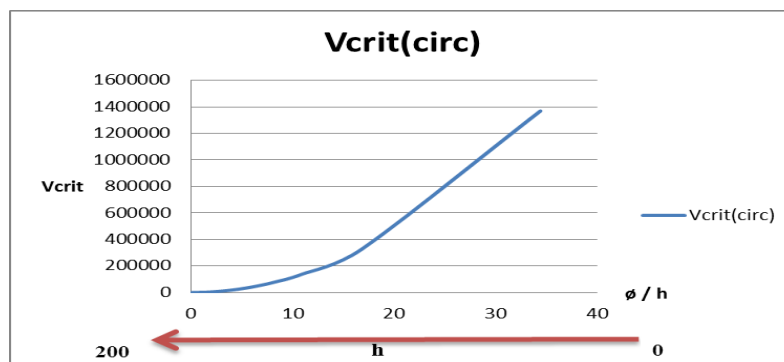
dangereuse : la vitesse moyenne peut généralement atteindre au maximum une valeur de :

$$1.4 \cdot 28 = 39,2 \text{ m/s} \quad \Rightarrow \quad 39,2 \cdot 1.25 = 49 \text{ m/s}$$

Soit une valeur de  $1,25 \cdot V_m(z) = 50 \text{ m/s}$

D'où pour un rapport  $\phi/h < 0.2286$ , on risque d'introduire les forces résultantes du détachement tourbillonnaire.

$\Leftrightarrow h/\phi > 4.5$ , il existe un effet de détachement tourbillonnaire



**Fig. 19 :** Variation de  $V_{crit}$  pour  $h$  constante et  $\phi$  variable

**Calcul de Vcrit**

**Pour section circulaire**

<b>d</b>	<b>h</b>	<b>d/h</b>	<b><math>n_{i,y}</math></b>	<b>St</b>	<b>Vcrit1</b>
20	200	0.1	0.2083	0.18	11.5722
24	195	0.12308	0.26294	0.18	17.5295
28	190	0.14737	0.32312	0.18	25.1319
32	185	0.17297	0.38952	0.18	34.6237
36	180	0.2	0.46289	0.18	46.2889
40	175	0.22857	0.54413	0.18	60.459
44	170	0.25882	0.63427	0.18	77.5219
48	165	0.29091	0.7345	0.18	97.9335
52	160	0.325	0.84622	0.18	122.232
56	155	0.36129	0.97106	0.18	151.053
60	150	0.4	1.11093	0.18	185.156
64	145	0.44138	1.26813	0.18	225.445
68	140	0.48571	1.44535	0.18	273.01
70	135	0.51852	1.60011	0.18	311.132
72	130	0.55385	1.77486	0.18	354.973
76	125	0.608	2.02634	0.18	427.783
80	120	0.66667	2.31444	0.18	514.321
84	115	0.73043	2.64608	0.18	617.419
88	110	0.8	3.02982	0.18	740.622
92	105	0.87619	3.47639	0.18	888.411
96	100	0.96	3.99936	0.18	1066.5
100	95	1.05263	4.61607	0.18	1282.24
104	90	1.15556	5.34894	0.18	1545.25
108	85	1.27059	6.22738	0.18	1868.21
112	80	1.4	7.2905	0.18	2268.16
116	75	1.54667	8.59122	0.18	2768.28
120	70	1.71429	10.2024	0.18	3400.82
124	65	1.90769	12.2268	0.18	4211.47
128	60	2.13333	14.8124	0.18	5266.65
132	55	2.4	18.1789	0.18	6665.6
136	50	2.72	22.663	0.18	8561.59
140	45	3.11111	28.802	0.18	11200.8
144	40	3.6	37.494	0.18	14997.6
148	35	4.22857	50.3321	0.18	20692.1
152	30	5.06667	70.3591	0.18	29707.2
156	25	6.24	103.983	0.18	45059.5
160	20	8	166.64	0.18	74062.2
164	15	10.9333	303.655	0.18	138332
168	10	16.8	699.888	0.18	326614
172	5	34.4	2866.21	0.18	1369410

**Tab. XI** : Variations de Vcrit pour section circulaire en fonction de « d » et « Ø » du bâtiment

### 3) Le coefficient de force $C_f$

Dans le cas du coefficient de force, on développe quatre tableaux différents afin de visualiser l'effet numérique et physique de ce coefficient (en négligeant la condition d'existence de  $C_f$ ). Notre étude se fait sur les cas suivants :

- 1) Bâtiment rectangulaire sans angles arrondis.
- 2) Bâtiment rectangulaire avec angles arrondis.
- 3) Bâtiment circulaire de hauteur constante.
- 4) Bâtiment circulaire de hauteur variable.

#### 1. Bâtiment rectangulaire sans angles arrondis

En fixant la hauteur du bâtiment égale à 100m et «  $d$  » égale à 20m,  $C_f$  croît de 1 à 1.6056 pour  $d/b$  compris entre 0.1 et 0.7 et pour  $2 < b/h < 0.286$ .

Pour  $d/b \in [0.7; 5]$  et  $b/h \in [0.2; 0.04]$ ,  $C_f$  diminue fortement pour atteindre une valeur de 0.835, pour enfin continuer à diminuer pour  $b/h < 0.04$  pour atteindre une valeur de 0.82845.

#### 2. Bâtiment rectangulaire avec angles arrondis

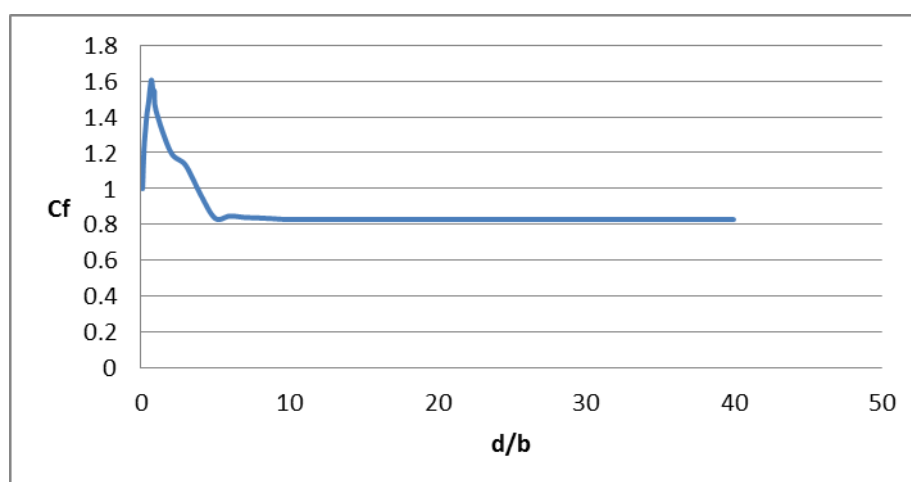
En fixant les mêmes paramètres, et variant de la même façon «  $b$  » avec un rayon de 2m, le coefficient de force varie de la même façon que celle d'un bâtiment sans angles arrondis :  $C_f$  augmente de 1 à 1,3246 pour  $d/b \in [0.1; 0.7]$  et pour  $b/h$  allant de 2 à 0.2857, puis  $C_f$  diminue jusqu'à une valeur de 0.4849 correspondante au rapport  $b/h$  égale à 0.05 et  $d/b$  égale à 4.

On réalise que pour un rapport de  $\{ b/h = 0.2857 ; d/b = 0.7 \}$  le coefficient de force prend sa valeur maximale d'où la nécessité d'éviter ce cas de volume pour un bâtiment rectangulaire afin d'éviter d'amplifier la force exercée par le vent sur la structure. De même, on remarque une réduction de  $C_f$  en transformant les arêtes vives en arrêtes arrondies : la fuite du flux à l'extrémité des faces se facilite en diminuant les turbulences des lignes de courants.

Calcul de $C_f$ (pour bâtiment sans angle arrondis)			
$\Psi_r = 1$	$h = 100\text{m}$	$d$	20

$d/b$	$C_{f,0}$	$b$	$\lambda$	$\Psi_\lambda$	$C_f$	$b/h$
0.1	2	200	0.7	-	1	2
0.2	2	100	1.4	0.61	1.22	1
0.3	2.11	66.6666667	2.1	0.63	1.3293	0.66666667
0.4	2.2	50	2.8	0.645	1.419	0.5
0.5	2.27	40	3.5	0.65	1.4755	0.4
0.6	2.35	33.3333333	4.2	0.66	1.551	0.33333333
0.7	2.4	28.5714286	4.9	0.669	1.6056	0.285714286
0.8	2.3	25	5.6	0.674	1.5502	0.25
0.9	2.27	22.2222222	6.3	0.68	1.5436	0.22222222
1	2.1	20	7	0.685	1.4385	0.2
2	1.65	10	14	0.73	1.2045	0.1
3	1.46	6.6666667	21	0.775	1.1315	0.06666667
4	1.19	5	28	0.815	0.96985	0.05
5	1	4	35	0.835	0.835	0.04
6	0.98	3.3333333	42	0.865	0.8477	0.03333333
7	0.96	2.85714286	49	0.875	0.84	0.028571429
8	0.94	2.5	56	0.89	0.8366	0.025
9	0.92	2.2222222	63	0.905	0.8326	0.02222222
10	0.9	2	70	0.9205	0.82845	0.02
20	0.9	1	70	0.9205	0.82845	0.01
30	0.9	0.6666667	70	0.9205	0.82845	0.00666667
40	0.9	0.5	70	0.9205	0.82845	0.005

**Tab. XII :** Evolution de  $C_f$  pour bâtiment rectangulaire en fonction de  $d/b$  et  $b/h$



Calcul de $C_f$ (pour bâtiment avec angle arrondis)			
$h = 100\text{m}$	$d$	20	$r=2\text{m}$

$d/b$	$C_{f,0}$	$b$	$\lambda$	$\Psi\lambda$	$r/b$	$\Psi r$	$C_f$	$b/h$
0.1	2	200	0.7	-	0.01	0.975	1	2
0.2	2	100	1.4	0.61	0.02	0.95	1.159	1
0.3	2.11	66.66667	2.1	0.63	0.03	0.925	1.2296	0.666667
0.4	2.2	50	2.8	0.645	0.04	0.9	1.2771	0.5
0.5	2.27	40	3.5	0.65	0.05	0.875	1.29106	0.4
0.6	2.35	33.33333	4.2	0.66	0.06	0.85	1.31835	0.333333
0.7	2.4	28.57143	4.9	0.669	0.07	0.825	1.32462	0.285714
0.8	2.3	25	5.6	0.674	0.08	0.8	1.24016	0.25
0.9	2.27	22.22222	6.3	0.68	0.09	0.775	1.19629	0.222222
1	2.1	20	7	0.685	0.1	0.75	1.07888	0.2
2	1.65	10	14	0.73	0.2	0.5	0.60225	0.1
3	1.46	6.666667	21	0.775	0.3	0.5	0.56575	0.066667
4	1.19	5	28	0.815	0.4	0.5	0.48493	0.05
5	1	4	35	0.835	0.5	-	-	
6	0.98	3.333333	42	0.865	0.6	-	-	
7	0.96	2.857143	49	0.875	0.7	-	-	
8	0.94	2.5	56	0.89	0.8	-	-	
9	0.92	2.222222	63	0.905	0.9	-	-	
10	0.9	2	70	0.9205	1	-	-	
20	0.9	1	70	0.9205	2	-	-	
30	0.9	0.666667	70	0.9205	3	-	-	
40	0.9	0.5	70	0.9205	4	-	-	

**Tab. XIII :** Evolution de  $C_f$  pour un bâtiment rectangulaire arrondi en fonction de  $d/b$  et  $b/h$

### 3. Bâtiment circulaire de hauteur constante :

Pour une section circulaire d'une hauteur de 100 m,  $C_f$  augmente constamment lorsque le diamètre diminue, c'est-à-dire que plus le rapport  $b/h$  diminue, plus  $C_f$  augmente : elle augmente de 0.5160 à 0.9675 pour  $2 < b/h < 0.00677$ .

### 4. Bâtiment circulaire de hauteur variable :

Dans ce cas de bâtiment, on a fait varier  $b$  et  $h$  tel que  $b$  diminue et  $h$  augmente simultanément :  $C_f$  à son tour augmente de 0.5081 à 0.9277 allant de  $b/h$  égale à 20 pour atteindre 0.0143.

**Calcul de  $C_f$  (pour bâtiment circulaire)**

**h = 100m**    **k=0.0015**    **Kr=0.23433**    **Cr(z) = 1.07911**    **KL = 0.8542**

<b>b</b>	<b>z</b>	<b>Vm(z)</b>	<b>Iv(z)</b>	<b>qp(z)</b>	<b>v(m/s)</b>	<b>Re</b>	<b>k/b</b>	<b>Cf,0</b>	<b><math>\lambda</math></b>	<b><math>\Psi\lambda</math></b>	<b>Cf</b>	<b>b/z</b>
200	100	28.05686	0.18549	1108.18	42.536	9.094E+08	0.0000075	0.85996	0.7	0.6	0.5160	2
100	100	28.05686	0.18549	1108.18	42.536	2.999E+08	0.000015	0.85426	1.4	0.61	0.5211	1
66.666667	100	28.05686	0.18549	1108.18	42.536	2.999E+08	0.0000225	0.87018	2.1	0.63	0.5482	0.66667
50	100	28.05686	0.18549	1108.18	42.536	2.999E+08	0.00003	0.88148	2.8	0.645	0.5686	0.5
40	100	28.05686	0.18549	1108.18	42.536	2.999E+08	0.0000375	0.89024	3.5	0.65	0.5787	0.4
33.333333	100	28.05686	0.18549	1108.18	42.536	2.999E+08	0.000045	0.8974	4.2	0.66	0.5923	0.33333
28.571429	100	28.05686	0.18549	1108.18	42.536	2.999E+08	0.0000525	0.90345	4.9	0.669	0.6044	0.28571
25	100	28.05686	0.18549	1108.18	42.536	2.999E+08	0.00006	0.90869	5.6	0.674	0.6125	0.25
22.222222	100	28.05686	0.18549	1108.18	42.536	2.999E+08	0.0000675	0.91332	6.3	0.68	0.6211	0.22222
20	100	28.05686	0.18549	1108.18	42.536	2.999E+08	0.000075	0.91746	7	0.685	0.6285	0.2
10	100	28.05686	0.18549	1108.18	42.536	2.999E+08	0.00015	0.94467	14	0.73	0.6896	0.1
6.666667	100	28.05686	0.18549	1108.18	42.536	2.999E+08	0.000225	0.9606	21	0.775	0.7445	0.06667
5	100	28.05686	0.18549	1108.18	42.536	2.999E+08	0.0003	0.97189	28	0.815	0.7921	0.05
4	100	28.05686	0.18549	1108.18	42.536	2.999E+08	0.000375	0.98065	35	0.835	0.8188	0.04
3.333333	100	28.05686	0.18549	1108.18	42.536	2.999E+08	0.00045	0.98781	42	0.865	0.8545	0.03333
2.8571429	100	28.05686	0.18549	1108.18	42.536	2.999E+08	0.000525	0.99387	49	0.875	0.8696	0.02857
2.5	100	28.05686	0.18549	1108.18	42.536	2.999E+08	0.0006	0.99911	56	0.89	0.8892	0.025
2.222222	100	28.05686	0.18549	1108.18	42.536	2.999E+08	0.000675	1.00374	63	0.905	0.9084	0.02222
2	100	28.05686	0.18549	1108.18	42.536	2.999E+08	0.00075	1.00787	70	0.9205	0.9277	0.02
1	100	28.05686	0.18549	1108.18	42.536	2.999E+08	0.0015	1.03509	70	0.9205	0.9528	0.01
0.666667	100	28.05686	0.18549	1108.18	42.536	2.999E+08	0.00225	1.05101	70	0.9205	0.9675	0.00667

**Tab. XIV** : Evolution de  $C_f$  pour un bâtiment circulaire de hauteur constante (h = 100m)

# Calcul de Cf (pour bâtiment circulaire)

k=0.0015 Kf=0.23433

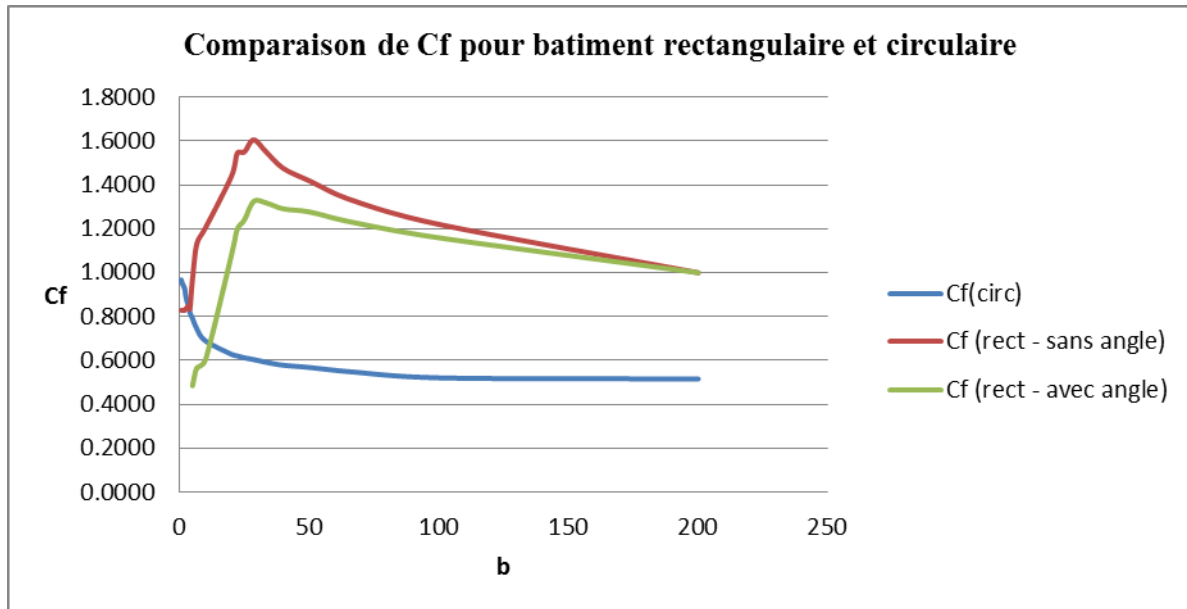
KL = 0.8542

b	z	Cr(z)	Vm(z)	Iv(z)	qp(z)	v(m/s)	Re	k/b	Cf,0	$\lambda$	$\Psi\lambda$	Cf	b/z
200	10	0.53956476	14.0287	0.37097	433.5694836	26.60579908	568839513	7.5E-06	0.84677	0.07	0.6	0.50806	20
100	35	0.83312471	21.6612	0.24026	770.7258401	35.47291787	81046611	1.5E-05	0.80969	0.49	0.6	0.48582	2.85714
66.666667	60	0.95942776	24.9451	0.20863	937.7431417	39.1281128	160000129	2.3E-05	0.85105	1.26	0.61	0.51914	1.11111
50	85	1.04104647	27.0672	0.19227	1052.698494	41.45710336	245949442	0.00003	0.87586	2.38	0.64	0.56055	0.58824
40	115	1.11187995	28.9089	0.18002	1156.934665	43.46116569	355396003	3.8E-05	0.89476	4.025	0.655	0.58607	0.34783
33.333333	140	1.15797507	30.1074	0.17286	1226.998367	44.75782211	450592591	4.5E-05	0.90778	5.88	0.67	0.60821	0.2381
28.571429	165	1.1964762	31.1084	0.1673	1286.867933	45.83676331	548712445	5.3E-05	0.9183	8.085	0.69	0.63363	0.17316
25	167	1.19929949	31.1818	0.1669	1291.306475	45.91574315	556673979	0.00006	0.92361	9.352	0.695	0.64191	0.1497
22.222222	170	1.20347165	31.2903	0.16632	1297.877684	46.03242308	568645473	6.8E-05	0.92848	10.71	0.705	0.65458	0.13072
20	172	1.20621238	31.3615	0.16594	1302.202224	46.10904952	576645663	7.5E-05	0.9327	12.04	0.715	0.66688	0.11628
10	175	1.2102643	31.4669	0.16539	1308.607046	46.22230305	588674294	0.00015	0.95886	24.5	0.795	0.7623	0.05714
6.666667	180	1.21686558	31.6385	0.16449	1319.07074	46.40673315	608796172	0.00023	0.97452	37.8	0.84	0.8186	0.03704
5	185	1.22328598	31.8054	0.16363	1329.282338	46.58601591	629008520	0.0003	0.98574	51.8	0.88	0.86745	0.02703
4	190	1.22953515	31.9679	0.1628	1339.254376	46.76042939	649308893	0.00038	0.9945	66.5	0.9105	0.9055	0.02105
3.333333	195	1.23562199	32.1262	0.162	1348.99846	46.93022977	669694975	0.00045	1.00171	81.9	0.9205	0.92208	0.01709
2.8571429	200	1.24155471	32.2804	0.16122	1358.525358	47.09565356	690164566	0.00053	1.00784	98	0.9205	0.92772	0.01429

**Tab. XV :** Evolution de  $C_f$  pour un bâtiment circulaire de hauteur variable



Pour les bâtiments circulaires, il est avantageux d'avoir un rapport de  $\phi/h$  aussi grand que possible afin d'avoir un  $C_f$  réduit. Résumons les tableaux déjà faits en une courbe :



**Fig. 20 :** Variations de  $C_f$  pour bâtiment circulaire, et rectangulaire sans et avec angles arrondis

En se référant à la figure 20, on réalise que les sections circulaires ont un  $C_f$  plus important que les sections rectangulaires pour  $b/h < 0.04$ . Pour  $b/h > 0.04$ , c'est le cas inverse où  $C_f$  pour les sections rectangulaires sont généralement 2 fois plus grandes que celles des sections circulaires.

Cela est dû aux écoulements de contournement aux extrémités où  $C_f$  (rectangulaire) est 2 fois moins important que celui de la circulaire pour un rapport de  $d/b < 4$ , valeur où l'EC s'arrête pour la détermination de  $\Psi_r$ . Pour  $d/b > 4$ , on réalise que le  $C_{f,0}$  est à peu près le même dans les deux sections.

La cause principale du  $C_{f(\text{rect})} > C_{f(\text{circ})}$  est donc due au taux d'arrondissement comme on a réalisé pour  $C_{f,0}$  dans le tableau XVI ci-après.

<b>Cf,0 (rect. sans angle arrondis)</b>	<b>Cf,0 (rect. avec angle arrondis)</b>	<b>Cf,0 (circulaire)</b>
2	1.95	0.85996
2	1.9	0.85426
2.11	1.95175	0.87018
2.2	1.98	0.88148
2.27	1.98625	0.89024
2.35	1.9975	0.8974
2.4	1.98	0.90345
2.3	1.84	0.90869
2.27	1.75925	0.91332
2.1	1.575	0.91746
1.65	0.825	0.94467
1.46	0.73	0.9606
1.19	0.595	0.97189
1	-	0.98065
0.98	-	0.98781
0.96	-	0.99387
0.94	-	0.99911
0.92	-	1.00374
0.9	-	1.00787
0.9	-	1.03509
0.9	-	1.05101
0.9	-	

**Tab. XVI :** tableau comparatif de  $C_{f,0}$  pour bâtiment rectangulaire et arrondi

Plus la face au vent prend la forme d'un demi-cercle, plus le coefficient de force diminue du fait du débarras onctueux des charges sur les façades.

#### 4) Déplacement maximal caractéristique $y_{max}$

Les déformations induites par les effets aéroélastiques s'expriment par  $y_{max}$  : cette déformation est en fonction de plusieurs paramètres comme il est indiqué ci-dessous

## 1. Section rectangulaire – sans angles arrondis :

On fixe  $b = 20m$ , et on fait varier « d » et « h » : l'écart-type  $\sigma_y$  et le coefficient de pointe  $K_p$  augmentent pour un rapport de  $d/b$  compris entre 1 et 2, afin d'avoir  $y_{max}$  augmentant de 1.8134 à 2.6864. Dans l'intervalle  $d/b \in [2 ; 3.5]$ ,  $K_p$  continue à augmenter de la valeur 3.4841 à 3.7476 alors que  $\sigma_y$  diminue de 1.0082 à 0.0972 : par suite  $y_{max}$  diminue de 3.5126 à 0.3641. Pour  $d/b \in [3.5 ; 8.6]$ ,  $\sigma_y$  et  $K_p$  augmentent pour atteindre 0.4743 et 4.0083 respectivement : cela implique une augmentation de  $y_{max}$  jusqu'à une valeur de 1.9010.

En effet, le rapport  $d/b = 3.5$  peut être considéré comme étant le rapport de transition où il existe ou pas un recollement : à cause de cette phase de transition, la déformée est minimale résultant d'une zone de sous pression entre le flux du vent et les côtés de largeur « d ».

## 2. Section circulaire

Pour la section circulaire où « h » et « Ø » varient simultanément,  $y_{max}$  augmente régulièrement de 0.2319 à 37.036 m.

*\* Il est à noter que la formule utilisée pour  $y_{max}$  est valable pour un bâtiment respectant la condition de  $h > 6b$  (généralement on utilise la  $V_{crit}$  si  $V_{crit} \leq 1.25V_m$  et  $V_m$  si*

*$V_{crit} > 1.25V_m$ ): nous nous référons seulement aux  $y_{max}$  correspondant à*

$$d/b \in [1 ; 1.6]$$

En comparant les deux sections, on réalise bien que la déformation de la section rectangulaire est beaucoup plus importante que celle d'une section circulaire valable pour un rapport de  $d/h < 0.441$ .

En effet, on se réfère à la Vitesse critique proportionnelle à la fréquence propre  $n_1$  où, comme on a déjà vu dans la partie (2),  $n_{1, \text{circulaire}} > n_{1, \text{rectangulaire}}$  ce qui indique une périodicité plus petite pour les sections circulaires : cela exige une déformation réduite afin de permettre à la structure de produire une période de déformation complète en un temps « T » plus petit.

aL = 0.4

Cc = 0.04

b = 20 m

Section Rectangulaire (sans angle arrondis)

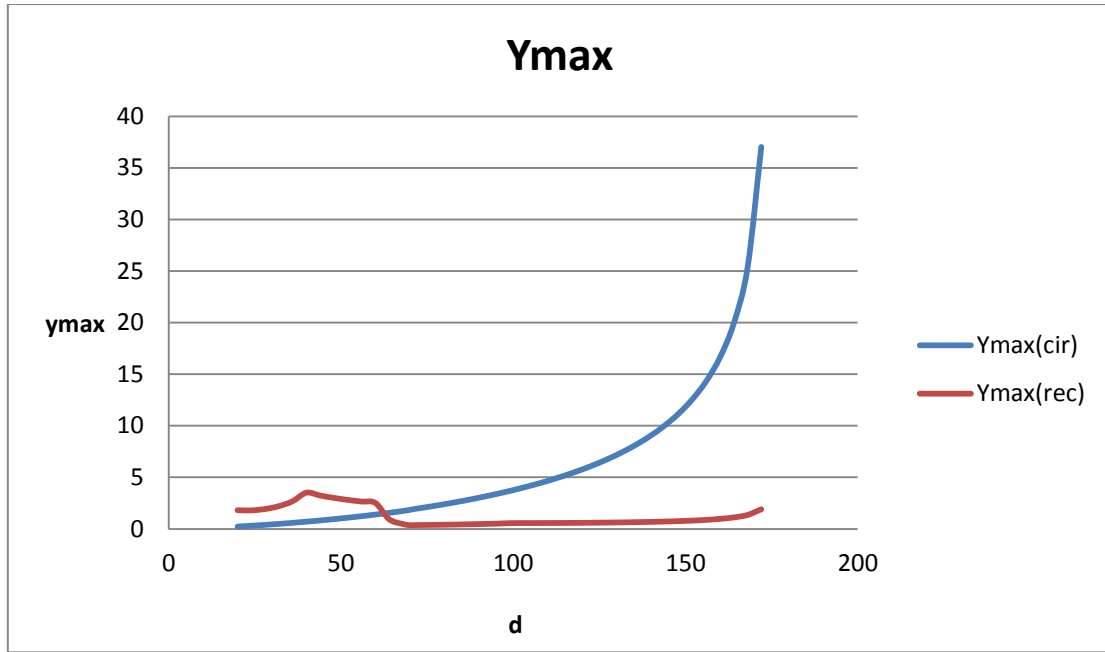
d/h	d	h	St	Iv(h)	Vcrit	Ka	d/h	me	Sc	c1	c2	$\frac{\sigma_y}{b}^2$	$\sigma_y$	Kp	y <sub>max</sub>
1	20	200	0.12	0.16122	37.2678	3.09802	0.1	1694.12	69.1478	-0.0621	0.0001153	0.00092	0.6071	2.9871	1.8134
1.2	24	195	0.108	0.162	46.524	3.08409	0.12308	2032.94	82.9773	-0.0913	0.0001508	0.00082	0.5736	3.1347	1.7980
1.4	28	190	0.096	0.1628	58.0209	3.06965	0.14737	2371.77	96.8069	-0.1208	0.0002135	0.00088	0.5936	3.2512	1.9298
1.6	32	185	0.084	0.16363	72.8038	3.05468	0.17297	2710.59	110.636	-0.1506	0.000329	0.00109	0.6598	3.3446	2.2069
1.8	36	180	0.072	0.16449	92.5926	3.03914	0.2	3049.42	124.466	-0.1807	0.0005596	0.00154	0.78529293	3.4209	2.68641
2	40	175	0.06	0.16539	120.468	3.02299	0.22857	3388.24	138.296	-0.2112	0.00108	0.00254	1.0082	3.4841	3.5126
2.2	44	170	0.06	0.16632	130.064	3.00619	0.25882	3727.06	152.125	-0.2422	0.0010163	0.00209	0.9142	3.5373	3.2339
2.4	48	165	0.06	0.1673	139.964	2.98869	0.29091	4065.89	165.955	-0.2735	0.0009655	0.00176	0.8389	3.5826	3.0054
2.6	52	160	0.06	0.16831	150.231	2.97043	0.325	4404.71	179.784	-0.3053	0.0009247	0.00151	0.7773	3.6216	2.8152
2.8	56	155	0.06	0.16937	160.932	2.95136	0.36129	4743.54	193.614	-0.3376	0.0008921	0.00132	0.7262	3.6556	2.6548
3	60	150	0.06	0.17048	172.133	2.93141	0.4	5082.36	207.443	-0.3705	0.0008662	0.00117	0.6833	3.6854	2.5181
3.2	64	145	0.096	0.17164	114.943	2.9105	0.44138	5421.18	221.273	-0.404	0.0001291	0.00016	0.2528	3.7118	0.9383
3.4	68	140	0.132	0.17286	89.2447	2.88856	0.48571	5760.01	235.102	-0.4381	3.548E-05	4E-05	0.1273	3.7354	0.4753
3.5	70	135	0.15	0.17414	82.6331	2.8655	0.51852	5929.42	242.017	-0.4577	2.161E-05	2.4E-05	0.0972	3.7476	0.3641
3.6	72	130	0.14738	0.17549	88.5756	2.84119	0.55385	6098.83	248.932	-0.4778	2.361E-05	2.5E-05	0.0994	3.7593	0.3737
3.8	76	125	0.14204	0.17691	98.201	2.81553	0.608	6437.66	262.761	-0.5141	2.72E-05	2.6E-05	0.1029	3.7785	0.3887
4	80	120	0.1367	0.17842	109.05	2.78838	0.66667	6776.48	276.591	-0.5515	3.169E-05	2.9E-05	0.1072	3.7960	0.4069
4.2	84	115	0.13136	0.18002	121.341	2.75957	0.73043	7115.3	290.421	-0.59	3.731E-05	3.2E-05	0.1125	3.8120	0.4287
4.4	88	110	0.12602	0.18173	135.344	2.72893	0.8	7454.13	304.25	-0.6298	4.446E-05	3.5E-05	0.1188	3.8268	0.4547
4.6	92	105	0.12068	0.18354	151.391	2.69623	0.87619	7792.95	318.08	-0.671	5.361E-05	4E-05	0.1264	3.8405	0.4855
4.8	96	100	0.11534	0.18549	169.897	2.66123	0.96	8131.78	331.939	-0.714	6.551E-05	4.6E-05	0.1355	3.8533	0.5220
5	100	95	0.11	0.18758	191.388	2.62362	1.05263	8470.6	345.709	-0.7589	8.116E-05	5.3E-05	0.1462	3.8653	0.5653
5.2	104	90	0.1092	0.18983	207.53	2.58306	1.15556	8809.42	359.568	-0.8062	8.615E-05	5.3E-05	0.1462	3.8767	0.5667
5.4	108	85	0.1084	0.19227	225.576	2.53909	1.27059	9148.25	373.398	-0.8562	9.203E-05	5.4E-05	0.1466	3.8874	0.5699
5.6	112	80	0.1076	0.19493	245.888	2.49121	1.4	9487.07	387.227	-0.9095	9.899E-05	5.4E-05	0.1475	3.8977	0.5750
5.8	116	75	0.1068	0.19785	268.922	2.43876	1.54667	9825.9	401.057	-0.9669	0.0001073	5.5E-05	0.1490	3.9076	0.5821
6	120	70	0.106	0.20106	295.268	2.38093	1.71429	10164.7	414.887	-1.0293	0.0001173	5.7E-05	0.1510	3.9173	0.5914
6.2	124	65	0.1052	0.20463	325.695	2.31668	1.90769	10503.5	428.716	-1.0981	0.0001295	5.9E-05	0.1536	3.9267	0.6031
6.4	128	60	0.1044	0.20863	361.23	2.24467	2.13333	10842.4	442.546	-1.1751	0.0001446	6.2E-05	0.1569	3.9361	0.6175
6.6	132	55	0.1036	0.21316	403.269	2.16313	2.4	11181.2	456.375	-1.2631	0.0001637	6.5E-05	0.1610	3.9455	0.6352
6.8	136	50	0.1028	0.21835	453.771	2.06966	2.72	11520	470.205	-1.3663	0.0001884	6.9E-05	0.1661	3.9550	0.6568
7	140	45	0.102	0.2244	515.563	1.96087	3.11111	11858.8	484.034	-1.4915	0.0002215	7.4E-05	0.1723	3.9649	0.6833
7.2	144	40	0.1012	0.23156	592.885	1.83191	3.6	12197.7	497.864	-1.6502	0.0002676	8.1E-05	0.1801	3.9755	0.7160
7.4	148	35	0.1004	0.24026	692.403	1.67536	4.22857	12536.5	511.693	-1.8644	0.0003359	9E-05	0.1898	3.9869	0.7568
7.6	152	30	0.0996	0.25115	825.223	1.5	5.06667	12875.3	525.523	-2.1504	0.00044	0.0001	0.2023	3.9988	0.8089
7.8	156	25	0.0988	0.26537	1011.34	1.5	6.24	13214.1	539.352	-2.2091	0.0005313	0.00012	0.2193	4.0009	0.8775
8	160	20	0.098	0.28514	1290.73	1.5	8	13553	553.182	-2.2678	0.000669	0.00015	0.2429	4.0029	0.9723
8.2	164	15	0.0972	0.31543	1756.69	1.5	10.9333	13891.8	567.012	-2.3265	0.0008992	0.00019	0.2780	4.0048	1.1134
8.4	168	10	0.0964	0.37097	2689.1	1.5	16.8	14230.6	580.841	-2.3852	0.001361	0.00029	0.3378	4.0066	1.3534
8.6	172	5	0.0956	0.53074	5487.4	1.5	34.4	14569.4	594.671	-2.4439	0.0027487	0.00056	0.4743	4.0083	1.9010

Tab. XVII : Evolution de  $y_{max}$  pour un batiment rectangulaire de hauteur variable

Pour section circulaire

d/b	ø	h	St	Iv(h)	Verit	Re	al	Ka	d/h	me	Sc	c1	c2	$\frac{\sigma_y^2}{h}$	$\sigma_y$	Kp	y <sub>max</sub>
1	20	200	0.18	0.16122	11.5722	2.5E+07	0.4	0.51634	0.1	1328	54.204	-0.5883	1.0892E-05	9.3E-06	0.06085	3.8113	0.23192
1	24	195	0.18	0.162	17.5295	4.5E+07	0.4	0.51401	0.12308	1912.32	54.204	-0.5913	1.3466E-05	1.1E-05	0.08098	3.8125	0.30875
1	28	190	0.18	0.1628	25.1319	7.5E+07	0.4	0.51161	0.14737	2602.88	54.204	-0.5945	1.6199E-05	1.4E-05	0.10335	3.8138	0.39416
1	32	185	0.18	0.16363	34.6237	1.2E+08	0.4	0.50911	0.17297	3399.68	54.204	-0.5978	1.9107E-05	1.6E-05	0.12792	3.815	0.48804
1	36	180	0.18	0.16449	46.2889	1.8E+08	0.4	0.50652	0.2	4302.72	54.204082	-0.6013	2.2203E-05	1.8E-05	0.1547	3.8164	0.59038
1	40	175	0.18	0.16539	60.459	2.6E+08	0.4	0.50383	0.22857	5312	54.204	-0.6049	2.5513E-05	2.1E-05	0.18369	3.8177	0.70128
1	44	170	0.18	0.16632	77.5219	3.6E+08	0.4	0.50103	0.25882	6427.52	54.204	-0.6087	2.9051E-05	2.4E-05	0.21493	3.8192	0.82087
1	48	165	0.18	0.1673	97.9335	5E+08	0.4	0.49811	0.29091	7649.28	54.204	-0.6128	3.2844E-05	2.7E-05	0.24849	3.8207	0.94939
1	52	160	0.18	0.16831	122.232	6.8E+08	0.4	0.49507	0.325	8977.28	54.204	-0.617	3.6918E-05	3E-05	0.28442	3.8222	1.08711
1	56	155	0.18	0.16937	151.053	9E+08	0.4	0.49189	0.36129	10411.5	54.204	-0.6215	4.1306E-05	3.3E-05	0.32281	3.8239	1.23438
1	60	150	0.18	0.17048	185.156	1.2E+09	0.4	0.48857	0.4	11952	54.204	-0.6263	4.6043E-05	3.7E-05	0.36377	3.8256	1.39161
1	64	145	0.18	0.17164	225.445	1.5E+09	0.4	0.48508	0.44138	13598.7	54.204	-0.6314	5.1171E-05	4.1E-05	0.40741	3.8274	1.55929
1	68	140	0.18	0.17286	273.01	2E+09	0.4	0.48143	0.48571	15351.7	54.204	-0.6368	5.6739E-05	4.5E-05	0.45387	3.8292	1.73798
1	70	135	0.18	0.17414	311.132	2.3E+09	0.4	0.47758	0.51852	16268	54.204	-0.6425	6.1058E-05	4.8E-05	0.4825	3.8312	1.84855
1	72	130	0.18	0.17549	354.973	2.7E+09	0.4	0.47353	0.55385	17210.9	54.204	-0.6487	6.5776E-05	5.1E-05	0.51264	3.8333	1.9651
1	76	125	0.18	0.17691	427.783	3.5E+09	0.4	0.46926	0.608	19176.3	54.204	-0.6554	7.2866E-05	5.6E-05	0.56664	3.8355	2.17335
1	80	120	0.18	0.17842	514.321	4.4E+09	0.4	0.46473	0.66667	21248	54.204	-0.6625	8.0674E-05	6.1E-05	0.62421	3.8378	2.39561
1	84	115	0.18	0.18002	617.419	5.5E+09	0.4	0.45993	0.73043	23425.9	54.204	-0.6703	8.9314E-05	6.7E-05	0.68562	3.8403	2.63299
1	88	110	0.18	0.18173	740.622	7E+09	0.4	0.45482	0.8	25710.1	54.204	-0.6787	9.8918E-05	7.3E-05	0.7512	3.8429	2.88679
1	92	105	0.18	0.18354	888.411	8.7E+09	0.4	0.44937	0.87619	28100.5	54.204	-0.6879	0.00010965	8E-05	0.82131	3.8457	3.15852
1	96	100	0.18	0.18549	1066.5	1.1E+10	0.4	0.44354	0.96	30597.1	54.204	-0.698	0.00012172	8.7E-05	0.89639	3.8487	3.44996
1	100	95	0.18	0.18758	1282.24	1.4E+10	0.4	0.43727	1.05263	33200	54.204	-0.7092	0.00013538	9.5E-05	0.97696	3.8519	3.76319
1	104	90	0.18	0.18983	1545.25	1.7E+10	0.4	0.43051	1.15556	35909.1	54.204	-0.7215	0.00015095	0.0001	1.06362	3.8554	4.10072
1	108	85	0.18	0.19227	1868.21	2.2E+10	0.4	0.42318	1.27059	38724.5	54.204	-0.7354	0.00016885	0.00011	1.15711	3.8592	4.46553
1	112	80	0.18	0.19493	2268.16	2.7E+10	0.4	0.4152	1.4	41646.1	54.204	-0.7511	0.00018963	0.00013	1.2583	3.8633	4.86122
1	116	75	0.18	0.19785	2768.28	3.4E+10	0.4	0.40646	1.54667	44673.9	54.204	-0.769	0.000214	0.00014	1.36827	3.8678	5.29223
1	120	70	0.18	0.20106	3400.82	4.4E+10	0.4	0.39682	1.71429	47808	54.204	-0.7896	0.00024295	0.00015	1.48834	3.8728	5.76405
1	124	65	0.18	0.20463	4211.47	5.6E+10	0.4	0.38611	1.90769	51048.3	54.204	-0.8137	0.00027786	0.00017	1.62017	3.8783	6.28357
1	128	60	0.18	0.20863	5266.65	7.2E+10	0.4	0.37411	2.13333	54394.9	54.204	-0.8424	0.00032069	0.00019	1.76587	3.8846	6.85962
1	132	55	0.18	0.21316	6665.6	9.4E+10	0.4	0.36052	2.4	57847.7	54.204	-0.8772	0.00037438	0.00021	1.92819	3.8916	7.50373
1	136	50	0.18	0.21835	8561.59	1.2E+11	0.4	0.34494	2.72	61406.7	54.204	-0.9204	0.00044346	0.00024	2.11075	3.8997	8.23124
1	140	45	0.18	0.2244	11200.8	1.7E+11	0.4	0.32681	3.11111	65072	54.204	-0.9759	0.00053536	0.00027	2.3185	3.9091	9.06321
1	144	40	0.18	0.23156	14997.6	2.3E+11	0.4	0.30532	3.6	68843.5	54.204	-1.0502	0.0006631	0.00032	2.55838	3.9203	10.0295
1	148	35	0.18	0.24026	20692.1	3.3E+11	0.4	0.27923	4.22857	72721.3	54.204	-1.1558	0.00085166	0.00037	2.84053	3.9338	11.1742
1	152	30	0.18	0.25115	29707.2	4.8E+11	0.4	0.25	5.06667	76705.3	54.204	-1.3003	0.00113975	0.00044	3.18182	3.9491	12.5652
1	156	25	0.18	0.26537	45059.5	7.5E+11	0.4	0.25	6.24	80795.5	54.204	-1.3003	0.00140369	0.00054	3.62393	3.9491	14.3111
1	160	20	0.18	0.28514	74062.2	1.3E+12	0.4	0.25	8	84992	54.204	-1.3003	0.00179961	0.00069	4.20838	3.9491	16.6191
1	164	15	0.18	0.31543	138332	2.4E+12	0.4	0.25	10.9333	89294.7	54.204	-1.3003	0.00245946	0.00095	5.04254	3.9491	19.9133
1	168	10	0.18	0.37097	326614	5.9E+12	0.4	0.25	16.8	93703.7	54.204	-1.3003	0.00377918	0.00145	6.40251	3.9491	25.2839
1	172	5	0.18	0.53074	1369410	9.5E+13	0.4	0.25	34.4	98218.9	54.204	-1.3003	0.00773831	0.00207	9.37708	3.9491	37.0306

Tab. XVIII : Evolution de  $y_{max}$  pour un bâtiment circulaire de hauteur variable



**Fig. 21** : Variation de  $y_{max}$  en fonction de « d »

## 5) La force d'inertie due aux effets aéroélastiques $F_w(s)$

Pour l'étude de  $F_w(s)$ , on établit quatre tableaux pour chaque section (rectangulaire et circulaire) où :

- $b = 20$  m (pour section rectangulaire)
- $d = \text{variable}$  (pour section rectangulaire)
- $\varnothing = \text{variable}$  (pour section circulaire)
- $h = \{200 ; 150 ; 100 ; 50\}$  m

### 1. Section rectangulaire :

Pour  $h = 200$  m,  $F_w(s)$  croît de 6064 à sa valeur maximale de 65645 KN pour  $d/b$  allant de 1 à 3, et  $d/h$  allant de 0.1 à 0.3. Puis elle décroît de 65645 pour atteindre sa valeur minimale égale à 12255 KN qui correspond à  $d/b = 3.5$ , pour enfin augmenter à une valeur de 16864 pour  $d/b = 4$ .

On réalise que pour tous les tableaux ayant pour  $h = \{150 ; 100 ; 50\}$  m, la courbe de  $F_w(s)$  conserve son allure tout en augmentant de valeur en fonction de « d » et « h ». (cf. tableaux XIX, XX)

Calcul Fw(s)						
b=20 m	$\phi=1$	h=200m	Pour section rectangulaire			
d/b	d	h	m(s)	$n_{i,y}$	$y_{F,max}$	Fw(s)
1	20	200	1694.12	0.22361	1.81336	6064
1.2	24	200	2032.94	0.24495	1.77546	8549.6
1.4	28	200	2371.77	0.26458	1.88113	12330
1.6	32	200	2710.59	0.28284	2.12278	18173
1.8	36	200	3049.42	0.3	2.54909	27619
2	40	200	3388.24	0.31623	3.28694	43967
2.2	44	200	3727.06	0.33166	2.98244	48272
2.4	48	200	4065.89	0.34641	2.7306	52596
2.6	52	200	4404.71	0.36056	2.51863	56936
2.8	56	200	4743.54	0.37417	2.33762	61286
3	60	200	5082.36	0.3873	2.18116	65645
3.2	64	200	5421.18	0.4	0.79896	27359
3.4	68	200	5760.01	0.41231	0.3977	15374
3.5	70	200	5929.42	0.41833	0.29916	12255
3.6	72	200	6098.83	0.42426	0.30128	13057
3.8	76	200	6437.66	0.43589	0.30729	14838
4	80	200	6776.48	0.44721	0.31519	16864
Calcul Fw(s)						
b=20 m	$\phi=1$	h=150m	Pour section rectangulaire			
d/b	d	h	m(s)	$n_{i,y}$	$y_{F,max}$	Fw(s)
1	20	150	1694.12	0.29814	2.09135	12433
1.2	24	150	2032.94	0.3266	2.04865	17538
1.4	28	150	2371.77	0.35277	2.1709	25296
1.6	32	150	2710.59	0.37712	2.44982	37284
1.8	36	150	3049.42	0.4	2.94157	56660
2	40	150	3388.24	0.42164	3.79215	90177
2.2	44	150	3727.06	0.44222	3.44174	99032
2.4	48	150	4065.89	0.46188	3.15164	107922
2.6	52	150	4404.71	0.48074	2.9073	116839
2.8	56	150	4743.54	0.49889	2.69857	125777
3	60	150	5082.36	0.5164	2.5181	134731
3.2	64	150	5421.18	0.53333	0.92254	56161
3.4	68	150	5760.01	0.54975	0.45922	31559
3.5	70	150	5929.42	0.55777	0.34544	25157
3.6	72	150	6098.83	0.56569	0.34789	26804
3.8	76	150	6437.66	0.58119	0.35482	30460
4	80	150	6776.48	0.59628	0.36395	34618

**Tab. XIX :** Variation de Fw(s) pour  $h = \{200 ; 150\}$ m en fonction de d/b

Calcul Fw(s)						
b=20 m	$\phi=1$	h=100m	Pour section rectangulaire			
d/b	d	h	m(s)	ni,y	y <sub>F,max</sub>	Fw(s)
1	20	100	1694.12	0.44721	2.55523	34179
1.2	24	100	2032.94	0.4899	2.50546	48260
1.4	28	100	2371.77	0.52915	2.65577	69627
1.6	32	100	2710.59	0.56569	2.99711	102630
1.8	36	100	3049.42	0.6	3.59814	155940
2	40	100	3388.24	0.63246	4.63644	248072
2.2	44	100	3727.06	0.66332	4.21017	272571
2.4	48	100	4065.89	0.69282	3.85657	297138
2.6	52	100	4404.71	0.72111	3.55838	321760
2.8	56	100	4743.54	0.74833	3.3034	346427
3	60	100	5082.36	0.7746	3.08282	371128
3.2	64	100	5421.18	0.8	1.12982	154755
3.4	68	100	5760.01	0.82462	0.56242	86966
3.5	70	100	5929.42	0.83666	0.42308	69325
3.6	72	100	6098.83	0.84853	0.42607	73862
3.8	76	100	6437.66	0.87178	0.43457	83938
4	80	100	6776.48	0.89443	0.44574	95397

Calcul Fw(s)						
b=20 m	$\phi=1$	h=50m	Pour section rectangulaire			
d/b	d	h	m(s)	ni,y	y <sub>F,max</sub>	Fw(s)
1	20	50	1694.12	0.89443	3.58841	191998
1.2	24	50	2032.94	0.9798	3.52825	271841
1.4	28	50	2371.77	1.0583	3.74318	392546
1.6	32	50	2710.59	1.13137	4.22477	578677
1.8	36	50	3049.42	1.2	5.06961	878847
2	40	50	3388.24	1.26491	6.52385	1E+06
2.2	44	50	3727.06	1.32665	5.93289	2E+06
2.4	48	50	4065.89	1.38564	5.43986	2E+06
2.6	52	50	4404.71	1.44222	5.0225	2E+06
2.8	56	50	4743.54	1.49666	4.66473	2E+06
3	60	50	5082.36	1.54919	4.35466	2E+06
3.2	64	50	5421.18	1.6	1.59758	875302
3.4	68	50	5760.01	1.64924	0.79535	491940
3.5	70	50	5929.42	1.67332	0.59831	392156
3.6	72	50	6098.83	1.69706	0.60255	417819
3.8	76	50	6437.66	1.74356	0.61456	474815
4	80	50	6776.48	1.78885	0.63036	539638

**Tab.XX** : Variation de Fw(s) pour h={ 100 ;50} m en fonction de d/b



## 2. Section circulaire :

Pour une section circulaire, on fait augmenter le  $\phi$  tout en conservant  $h$  égale à 200m où  $F_w(s)$  augmente régulièrement de 527.56 à 1080615 KN.  $F_w(s)$  conserve son allure quelque soit  $h$ .

Calcul $F_w(s)$							Calcul $F_w(s)$						
$\phi=1$	$h=200m$	Pour section circulaire					$\phi=1$	$h=150m$	Pour section circulaire				
$h/d$	$d$	$h$	$m(s)$	$n_{i,y}$	$y_{F,max}$	$F_w(s)$	$h/d$	$d$	$h$	$m(s)$	$n_{i,y}$	$y_{F,max}$	$F_w(s)$
10	20	200	1328	0.2083	0.23192	527.56	7.5	20	150	1328	0.37031	0.2678	1925.29
8.33333	24	200	1912.32	0.24996	0.30487	1438.04	6.25	24	150	1912.32	0.44437	0.35203	5248.01
7.14286	28	200	2602.88	0.29162	0.38418	3357.23	5.35714	28	150	2602.88	0.51844	0.44361	12251.9
6.25	32	200	3399.68	0.33328	0.46938	6997.44	4.6875	32	150	3399.68	0.5925	0.54199	25536.6
5.55556	36	200	4302.72	0.37494	0.56009	13374.6	4.16667	36	150	4302.72	0.66656	0.64673	48809.5
5	40	200	5312	0.4166	0.65598	23875.4	3.75	40	150	5312	0.74062	0.75746	87131.1
4.54545	44	200	6427.52	0.45826	0.75681	40328.6	3.40909	44	150	6427.52	0.81468	0.87388	147176
4.16667	48	200	7649.28	0.49992	0.86233	65080.9	3.125	48	150	7649.28	0.88875	0.99573	237507
3.84615	52	200	8977.28	0.54158	0.97234	101076	2.88462	52	150	8977.28	0.96281	1.12276	368869
3.57143	56	200	10411.5	0.58324	1.08668	151939	2.67857	56	150	10411.5	1.03687	1.25478	554488
3.33333	60	200	11952	0.6249	1.20517	222060	2.5	60	150	11952	1.11093	1.39161	810390
3.125	64	200	13598.7	0.66656	1.32769	316690	2.34375	64	150	13598.7	1.185	1.53308	1155731
2.94118	68	200	15351.7	0.70822	1.45411	442027	2.20588	68	150	15351.7	1.25906	1.67905	1613136
2.85714	70	200	16268	0.72905	1.51875	518435	2.14286	70	150	16268	1.29609	1.75369	1891983
2.77778	72	200	17210.9	0.74988	1.58432	605328	2.08333	72	150	17210.9	1.33312	1.82941	2209088
2.63158	76	200	19176.3	0.79154	1.7182	814973	1.97368	76	150	19176.3	1.40718	1.98399	2974170
2.5	80	200	21248	0.8332	1.85564	1080615	1.875	80	150	21248	1.48124	2.1427	3943606

Calcul $F_w(s)$							Calcul $F_w(s)$						
$\phi=1$	$h=100m$	Pour section circulaire					$\phi=1$	$h=50m$	Pour section circulaire				
$h/d$	$d$	$h$	$m(s)$	$n_{i,y}$	$y_{F,max}$	$F_w(s)$	$h/d$	$d$	$h$	$m(s)$	$n_{i,y}$	$y_{F,max}$	$F_w(s)$
5	20	100	1328	0.8332	0.32798	11937.3	2.5	20	50	1328	3.3328	0.46383	270108
4.16667	24	100	1912.32	0.99984	0.43114	32539	2.08333	24	50	1912.32	3.99936	0.60972	736266
3.57143	28	100	2602.88	1.16648	0.54331	75965	1.78571	28	50	2602.88	4.66592	0.76834	1718873
3.125	32	100	3399.68	1.33312	0.6638	158333	1.5625	32	50	3399.68	5.33248	0.93874	3582622
2.77778	36	100	4302.72	1.49976	0.79208	302631	1.38889	36	50	4302.72	5.99904	1.12015	6847654
2.5	40	100	5312	1.6664	0.9277	540234	1.25	40	50	5312	6.6656	1.31194	1.2E+07
2.27273	44	100	6427.52	1.83304	1.07028	912524	1.13636	44	50	6427.52	7.33216	1.51358	2.1E+07
2.08333	48	100	7649.28	1.99968	1.2195	1472600	1.04167	48	50	7649.28	7.99872	1.72461	3.3E+07
1.92308	52	100	8977.28	2.16632	1.37509	2287072	0.96154	52	50	8977.28	8.66528	1.94463	5.2E+07
1.78571	56	100	10411.5	2.33296	1.53678	3437950	0.89286	56	50	10411.5	9.33184	2.17329	7.8E+07
1.66667	60	100	11952	2.4996	1.70436	5024599	0.83333	60	50	11952	9.9984	2.41027	1.1E+08
1.5625	64	100	13598.7	2.66624	1.87762	7165789	0.78125	64	50	13598.7	10.665	2.65529	1.6E+08
1.47059	68	100	15351.7	2.83288	2.05639	1E+07	0.73529	68	50	15351.7	11.3315	2.90811	2.3E+08
1.42857	70	100	16268	2.9162	2.14781	1.2E+07	0.71429	70	50	16268	11.6648	3.03739	2.7E+08
1.38889	72	100	17210.9	2.99952	2.24055	1.4E+07	0.69444	72	50	17210.9	11.9981	3.16853	3.1E+08
1.31579	76	100	19176.3	3.16616	2.42986	1.8E+07	0.65789	76	50	19176.3	12.6646	3.43626	4.2E+08
1.25	80	100	21248	3.3328	2.62424	2.4E+07	0.625	80	50	21248	13.3312	3.71114	5.5E+08

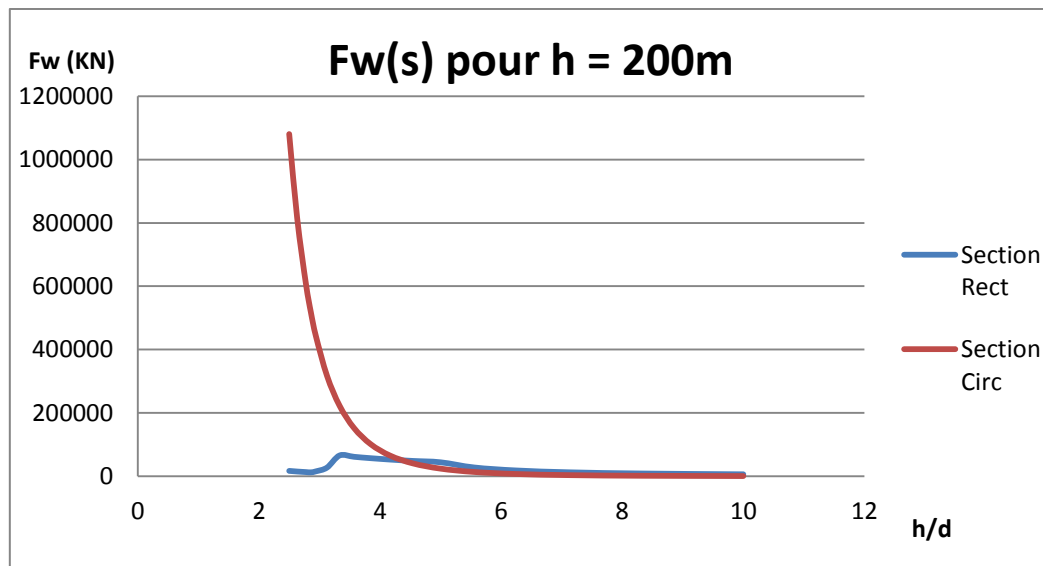
**Tab. XXI :** Variation de  $F_w(s)$  pour  $h=\{200 ; 150 ; 100 ; 50\}$  m en fonction de  $d$

Cette variation de  $F_w(s)$  en fonction de  $d/b$  pour la section rectangulaire s'explique par le principe de décollement et recollement, exposé dans la partie (2) : cette force perpendiculaire à la face de longueur  $d$  est en rapport avec la section du bâtiment. En effet, si on se base sur le nombre de Reynolds, nous nous trouvons dans le régime super et hypercritique où  $Re$  dans notre cas est supérieur à  $4.4 \cdot 10^7$  ; ce qui correspond à des couches limites turbulentes périodiques pour une vitesse du vent constante. Ces couches turbulentes s'approchent de la

fréquence propre du bâtiment pour une surface de bâtiment égale à  $(b \cdot 3.5b) \text{ m}^2$  où il suffit d'une force  $F_w(s)$  minimale afin d'exciter le bâtiment : cette valeur particulière appartient aux valeurs de  $F_w(s)$  vérifiant la condition énoncée par l'EC ( $h/d < 6$ )

De même, on remarque que  $F_w(s)$  augmente lorsque  $h$  diminue. Cela s'explique par un simple principe : moins le bâtiment est élancé, plus la force exigée pour faire vibrer le bâtiment est grande.

En comparant les deux sections, on réalise que les sections rectangulaires sont beaucoup plus sensibles en tant que comportement envers le vent pour un rapport de  $h/d < 4.16$ , soit pour une hauteur  $h > 4.16 \cdot \varnothing$ . Pour un rapport de  $h/d > 4.16$ , la section rectangulaire est plus avantageuse que la section circulaire.



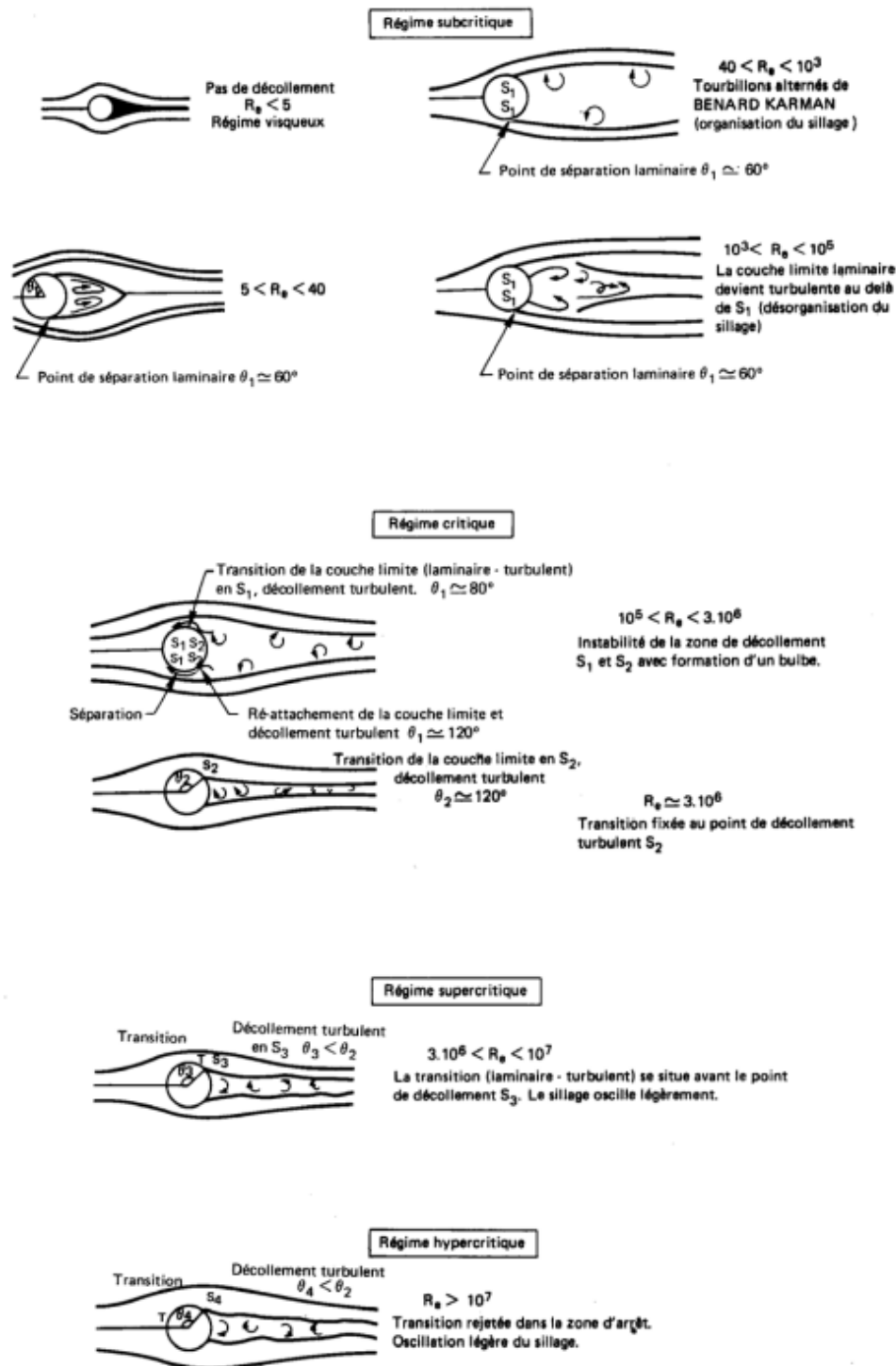
**Fig. 22** : exemple de variation de  $F_w(s)$  pour  $h=200\text{m}$

**Résumé :** La conception d'un bâtiment rectangulaire (sans changement de forme) doit respecter les conditions suivantes afin d'avoir la meilleure réponse envers les actions aérodynamiques :

- $1.6 \leq d/b \leq 3$
- $h/d < 6$
- Utilisé des arêtes à angles arrondis où  $2 \leq d/b \leq 3$

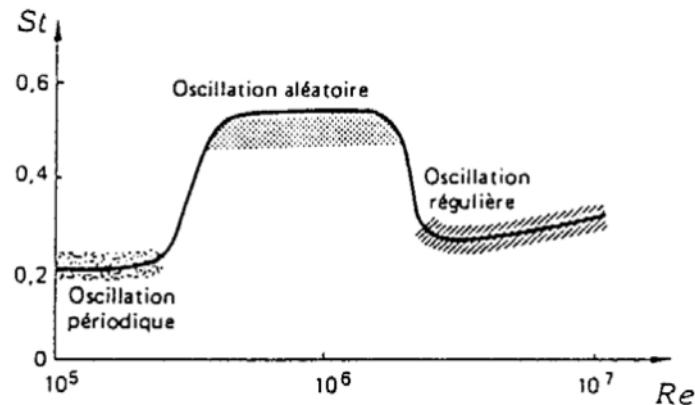
⇒ Un rapport de  $d/b \in [2 ; 3]$  est le résultat d'intersection des intervalles où le bâtiment à concevoir doit respecter, ayant des arêtes arrondies vérifiant un rapport  $r/b \in [0.2 ; 0.3]$ , construit de préférence dans la région IV.

Les phénomènes de décollement et recollement ayant un effet de vibrations important sur les bâtiments étudiés dépendent forcément de deux paramètres fondamentaux :  $Re$  et  $St$ . En effet, plusieurs régimes d'écoulement existent en fonction du nombre de Reynold, définissant les distributions de pressions et le changement de l'abscisse «  $x$  » du décollement et recollement, comme indiqué dans la figure ci-dessous :



**Fig. 23** : Changement de régimes d'écoulement autour d'un cylindre en fonction de  $Re$

On réalise en allant du régime critique un effet de sillage (apparition de détachement tourbillonnaire alterné fonction de  $St$ ) caractérisé par une variation de zone de décollement ce qui engendre une dépression autour de l'abscisse correspondant à l'angle  $\theta_1 = 80^\circ$  suivie par une diminution de dépression au culot de la structure.



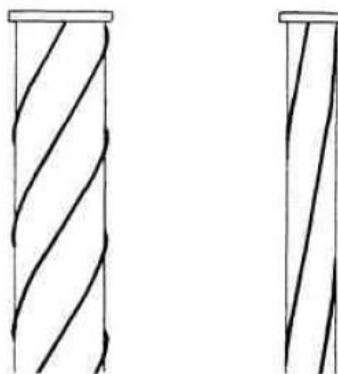
**Fig. 24:** Variation de  $St$  en fonction de  $Re$ , pour une section circulaire.

\* A l'aval des formes à angles vifs tel que les structures rectangulaires, on observe les mêmes phénomènes malgré l'indépendance de  $Re$ .

## 6) Réduction d'amplitudes à l'aide de dispositif d'amortissement

Pour un bâtiment circulaire, la meilleure conception est de respecter la déduction des expériences précédentes, c'est-à-dire, pour  $h < 4.16 \cdot \varnothing$ . Dans le cas d'une étude plus avancée et aérodynamique, l'application de la couronne hélicoïdale est l'une des solutions les plus utilisées en structure, et plus précisément dans la conception des cheminées élancées.

L'un des bâtiments de grandes dimensions qui a utilisé cette solution est le tour de « HSB Turning Torso » en Suède. Le principe est illustré comme suit :

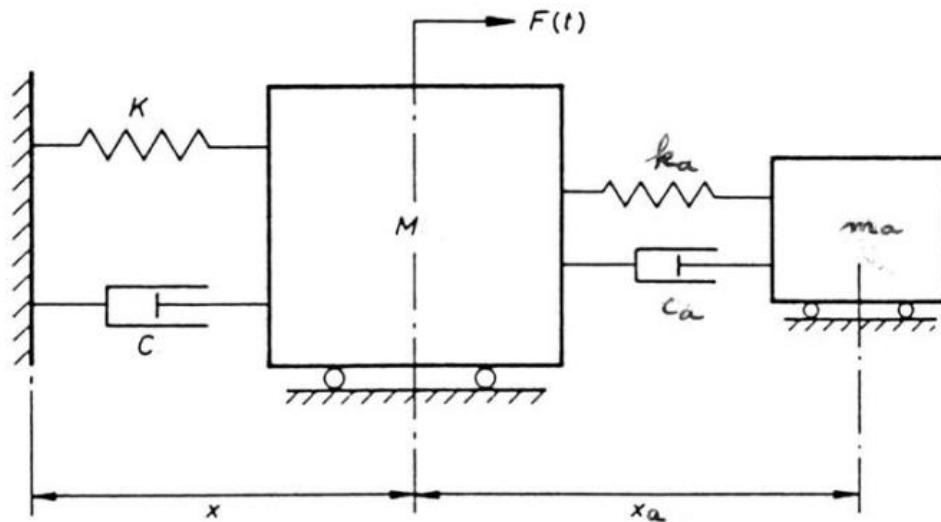


**Fig 25 :** Ailettes hélicoïdales pour une structure généralement circulaire.

La hauteur minimale à appliquer cette solution est de  $h/3$  prise de la tête du bâtiment.  
Par suite, les vibrations sont réduites et, grâce à cela, la poussée transversale est affaiblie.

Généralement, d'après l'EC1-1-4, E.1.6, les amplitudes dues au détachement tourbillonnaire peuvent être réduites au moyen de dispositifs aérodynamique (comme la couronne hélicoïdale) ou de dispositifs d'amortissement mis en place sur la construction.

Dans les structures élancées, on peut augmenter le coefficient d'amortissement de la structure total en installant des amortisseurs répartis dans la structure, ou d'y installer un amortisseur dynamique accordé. Par définition, un amortisseur dynamique accordé est un système vibratoire composé d'une masse, d'un raidisseur, et d'un amortisseur accrochés à la structure afin de réduire les vibrations : en effet, on parle « d'étouffeur de vibrations » assemblé à un amortisseur (cf. fig. 26)



**Fig. 26** : schématisation d'un système amortisseur accordé

Ainsi, l'amortissement global résultant «  $\xi_e$  » s'écrit « :

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

Avec :

- $\alpha_0 = f^2$
- $\alpha_1 = 2 \cdot f(\xi_0 + \xi_a)$
- $\alpha_2 = 1 + f^2(1 + \nu) + 4 \cdot \xi_0 \cdot \xi_a$
- $\alpha_3 = 2 \cdot \xi_a \cdot f(1 + \nu) + 2 \cdot \xi_0$
- $\beta = 2 \cdot \xi_a \cdot f$
- $f$ : coefficient d'ajustement optimal
- $\xi_0$  : taux d'amortissement de la structure
- $\xi_a$ : taux d'amortissement de l'amortisseur

En se basant sur le coefficient logarithmique d'amortissement pour le mode fondamental, on prend deux exemples pour des hauteurs différentes (200m, et 150m)

$\rho(\text{kg/m}^3)$	1.225	$\delta_s$	0.1	$V_m(h)$	variable
$V_m(z_s)$	variable	$\delta_d$	tableau	$d=20\text{m}$	
$n_{i,y}$	variable	$L(z_s)$	variable	$T(s)$	600

h	d/b	b	Cf	me	$V_m(z_s)$	$n_{i,y}$	$\delta_a$	$\delta_d$	$\delta$	$R^2$	% de réduction
200	0.1	200	1	16941.2	29.1682	0.22361	0.00943	0.028	0.13743	0.057732	14.73
200	0.2	100	1.22	8470.59	29.1682	0.22361	0.01151	0.0278	0.13931	0.105234	14.95
200	0.3	66.6667	1.3293	5647.06	29.1682	0.22361	0.01254	0.027	0.13954	0.144906	14.97
200	0.4	50	1.419	4235.29	29.1682	0.22361	0.01338	0.0263	0.13968	0.177236	14.99
200	0.5	40	1.4755	3388.24	29.1682	0.22361	0.01392	0.0256	0.13952	0.204021	14.97
200	0.6	33.3333	1.551	2823.53	29.1682	0.22361	0.01463	0.025	0.13963	0.225741	14.98
200	0.7	28.5714	1.6056	2420.17	29.1682	0.22361	0.01514	0.0245	0.13964	0.243958	14.99
200	0.8	25	1.5502	2117.65	29.1682	0.22361	0.01462	0.0242	0.13882	0.260882	14.89
200	0.9	22.2222	1.5436	1882.35	29.1682	0.22361	0.01456	0.024	0.13856	0.274603	14.86
200	1	20	1.4385	1694.12	29.1682	0.22361	0.01357	0.0235	0.13707	0.289114	14.69
200	2	10	1.2045	847.059	29.1682	0.22361	0.01136	0.02	0.13136	0.36732	14.04
200	3	6.66667	1.1315	564.706	29.1682	0.22361	0.01067	0.016	0.12667	0.380916	13.50
200	4	5	0.96985	423.529	29.1682	0.22361	0.00915	0.012	0.12115	0.427596	12.88

h	d/b	b	Cf	me	$V_m(z_s)$	$n_{i,y}$	$\delta_a$	$\delta_d$	$\delta$	$R^2$	% de réduction
150	0.1	200	1	16941.2	27.4155	0.29814	0.00665	0.028	0.13465	0.036622	14.41
150	0.2	100	1.22	8470.59	27.4155	0.29814	0.00811	0.0278	0.13591	0.068747	14.56
150	0.3	66.6667	1.3293	5647.06	27.4155	0.29814	0.00884	0.027	0.13584	0.097468	14.55
150	0.4	50	1.419	4235.29	27.4155	0.29814	0.00944	0.0263	0.13574	0.122589	14.54
150	0.5	40	1.4755	3388.24	27.4155	0.29814	0.00981	0.0256	0.13541	0.144643	14.50
150	0.6	33.3333	1.551	2823.53	27.4155	0.29814	0.01031	0.025	0.13531	0.163602	14.49
150	0.7	28.5714	1.6056	2420.17	27.4155	0.29814	0.01068	0.0245	0.13518	0.180151	14.47
150	0.8	25	1.5502	2117.65	27.4155	0.29814	0.01031	0.0242	0.13451	0.195407	14.40
150	0.9	22.2222	1.5436	1882.35	27.4155	0.29814	0.01026	0.024	0.13426	0.208381	14.37
150	1	20	1.4385	1694.12	27.4155	0.29814	0.00956	0.0235	0.13306	0.22149	14.23
150	2	10	1.2045	847.059	27.4155	0.29814	0.00801	0.02	0.12801	0.298443	13.66
150	3	6.66667	1.1315	564.706	27.4155	0.29814	0.00752	0.016	0.12352	0.30928	13.15
150	4	5	0.96985	423.529	27.4155	0.29814	0.00645	0.012	0.11845	0.355255	12.57

**Tab. XXII** : Variation du décrément logarithmique en fonction de h ; et pourcentage de réduction de force

⇒ Une réduction approximative de 14% de la charge induite  $q(T)$  est vérifiée dans le cas de présence d'un dispositif d'amortissement.

$$\Rightarrow \delta = \ln \frac{q(T)}{q(T+t)} \quad (\text{formule générale})$$

$$\Rightarrow q(T) - q(T+t) = (e^\delta - 1) \cdot q(T)$$

$$\Leftrightarrow \Delta q \sim 0,14 \cdot q(T)$$

#### IV. Simulation numérique pour section rectangulaire et circulaire :

Nous établissons un bâtiment circulaire de diamètre 20 m, ayant une hauteur de 122 m (hauteur étage 3,4m) localisé dans la région IV. Les éléments structuraux contribuant à la rigidité de la structure valent 12% de la surface total de l'étage : le bâtiment contient des voiles périphériques d'épaisseur 0.5m, et un noyau central de rayon 1.75m. Pour le bâtiment rectangulaire de section (14.5\*19.5) m<sup>2</sup> et de hauteur 122m contenant 6% de la surface par étage d'éléments contribuant à la rigidité, on étudie deux direction de charge (x et y ).

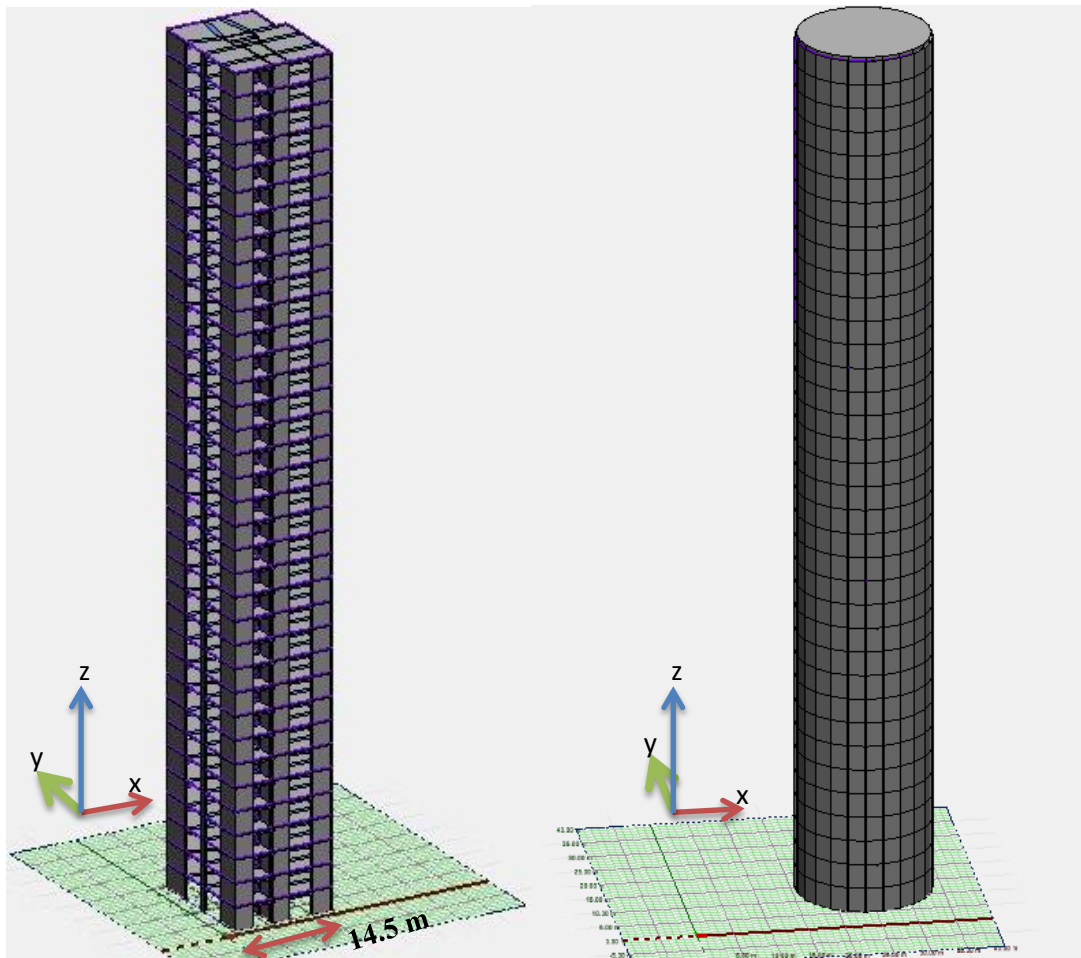


Fig. 27 : Bâtiment circulaire sur logiciel « Advance Design »

Tout paramètre concernant le vent est introduit au logiciel manuellement :

- 1) On a calculé l'intensité de turbulence sur 6 parois du bâtiment tel que :
  - a.  $I_v(20) = 0.33$
  - b.  $I_v(40) = 0.268$
  - c.  $I_v(60) = 0.246$
  - d.  $I_v(80) = 0.228$
  - e.  $I_v(100) = 0.218$
  - f.  $I_v(122) = 0.208$
- 2) On a calculé la pression dynamique de pointe :
  - a.  $w_e = 1 * q_p(20) \sim 0.68 \text{ KN/m}^2$
  - b.  $w_e = 1 * q_p(40) \sim 0.89 \text{ KN/m}^2$
  - c.  $w_e = 1 * q_p(60) \sim 1 \text{ KN/m}^2$
  - d.  $w_e = 1 * q_p(80) \sim 1.1 \text{ KN/m}^2$
  - e.  $w_e = 1 * q_p(100) \sim 1.2 \text{ KN/m}^2$
  - f.  $w_e = 1 * q_p(120) \sim 1.3 \text{ KN/m}^2$
- 3) On a introduit les combinaisons dans le cas de présence du vent et de détachement tourbillonnaire (cf. fig 28)
  - a. Cas 1 : charge permanente  $G = G_{total} - (pp.dalle) = 400 \text{ Kg/m}^2$
  - b. Cas 2 : charge variable  $Q_{total} = 150 \text{ Kg/m}^2$
  - c. Cas 3 : charge du vent  $w_e$
  - d. Cas 4 : charge due au détachement tourbillonnaire  $F_w(s)$

Combinaisons | Béton | Métal | Bois

	Coeff	Cas	Coeff	Cas	Coeff	Cas	Coeff	Cas	Coeff	Cas	Coeff	Cas	Coeff	Cas	Coeff	Cas	Coeff	Cas	Coeff	Cas	Coeff	Cas
103	1.1	1	1.5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
104	1.1	1	1.5	3	1.5	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
105	1.1	1	1.5	3	1.05	2	1.5	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
106	1.35	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
107	1.35	1	1.5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
108	1.35	1	1.5	2	0.9	3	0.9	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
109	1.35	1	1.5	3	1.5	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
110	1.35	1	1.5	3	1.05	2	1.5	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
111	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
112	1	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
113	1	1	0.6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
114	1	1	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
115	1	1	1	3	0.7	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

< >

Nom : Type : Code : Numéro

ELU StrGeo 0

Fig. 28 : Tableau de combinaison introduit au logiciel « Advance Design »



Après avoir déclenché le modèle d'analyse, on représente les plus importants paramètres :

# 1. Mode propres :

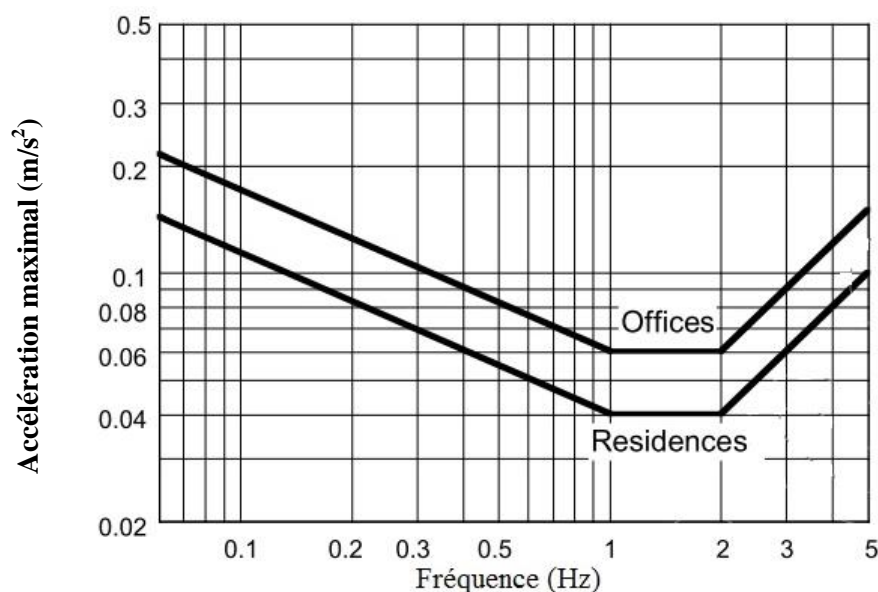
Grandeurs des modes propres (circulaire)					
Mode (N°)	Pulsation (Rad/s)	Période (s)	Fréquence (Hz)	Énergie (J)	Amortissement (%)
1	2.70	2.32	0.43	3.63	4.00
2	2.71	2.32	0.43	3.63	4.00
3	14.59	0.43	2.32	105.48	4.00
4	14.62	0.43	2.32	105.76	4.00
5	19.20	0.33	3.06	183.90	4.00
6	26.70	0.24	4.25	342.61	4.00
7	34.66	0.18	5.52	592.40	4.00
8	34.74	0.18	5.53	595.32	4.00
9	57.19	0.11	9.10	1602.39	4.00
10	57.35	0.11	9.13	1613.01	4.00
Grandeurs des modes propres (rectangulaire – vent suivant d=19.5 m)					
Mode (N°)	Pulsation (Rad/s)	Période (s)	Fréquence (Hz)	Énergie (J)	Amortissement (%)
1	1.58	3.98	0.25	0.82	4.00
2	2.42	2.59	0.39	2.31	4.00
3	4.16	1.51	0.66	5.72	4.00
4	6.11	1.03	0.97	13	4.00
5	10.19	0.62	1.62	38.43	4.00
6	13.37	0.47	2.13	66.47	4.00
7	16.47	0.38	2.62	92.40	4.00
8	21.11	0.30	3.36	179.21	4.00
9	22.61	0.28	3.60	199.82	4.00
10	29.58	0.21	4.71	352.31	4.00
Grandeurs des modes propres (rectangulaire – vent suivant d=14.5 m)					
Mode (N°)	Pulsation (Rad/s)	Période (s)	Fréquence (Hz)	Énergie (J)	Amortissement (%)
1	1.58	3.98	0.25	0.82	4.00
2	2.42	2.59	0.39	2.31	4.00
3	4.16	1.51	0.66	5.72	4.00
4	6.11	1.03	0.97	13	4.00
5	10.19	0.62	1.62	38.43	4.00
6	13.37	0.47	2.13	66.47	4.00
7	16.47	0.38	2.62	92.40	4.00
8	21.11	0.30	3.36	179.21	4.00
9	22.61	0.28	3.60	199.82	4.00
10	29.58	0.21	4.71	352.31	4.00

**Tab. XXIII :** Grandeurs des modes propres pour les bâtiments étudiés

En comparant la fréquence du premier mode obtenue grâce au logiciel et la réponse approximative établie dans le document pour une section circulaire ( $n_1$ ), on réalise que les deux valeurs sont à peu près égales : par calcul approximatif, on aura  $n_1 = 0.58 \text{ Hz}$  pour 6% d'élément de contreventement.

De même, pour les sections rectangulaires, en utilisant la formule approchée de  $n_1$ , on aura pour  $d$  égale à 19.5m, une fréquence propre égale à 0.36 ; et pour  $d$  égale à 14.5m une valeur de 0.31 Hz.

En se basant sur le guide d'évaluation « ISO 6897 » de la réponse humaine probable aux vibrations, l'intervalle de réponse humaine varie de 0.063 Hz à 1 Hz. Le déplacement horizontal acceptable pour la catégorie B des bâtiments (bureaux) est traduit par la courbe d'évaluation où on observe une variation de l'accélération maximale du bâtiment en fonction de la fréquence propre en flexion de la structure. La courbe d'évaluation d'un bâtiment de catégorie A vaut 2/3 de celle de la catégorie B (cf. fig. 29).



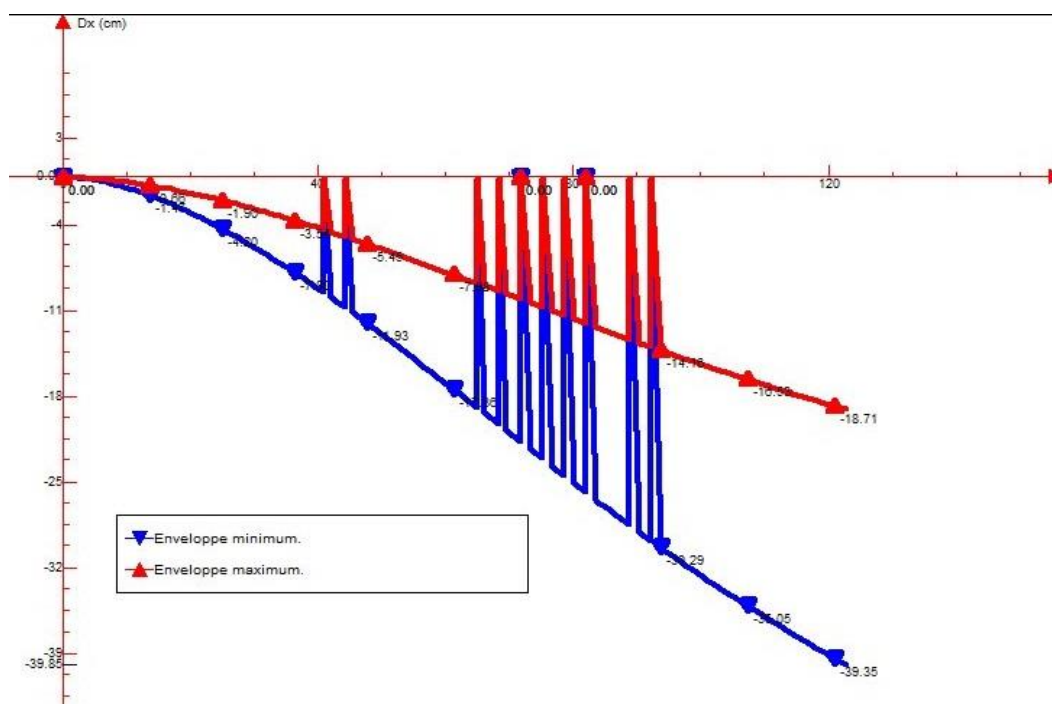
**Fig.29** : Variation de la fréquence propre en fonction de l'accélération maximale

## 2. Déplacement

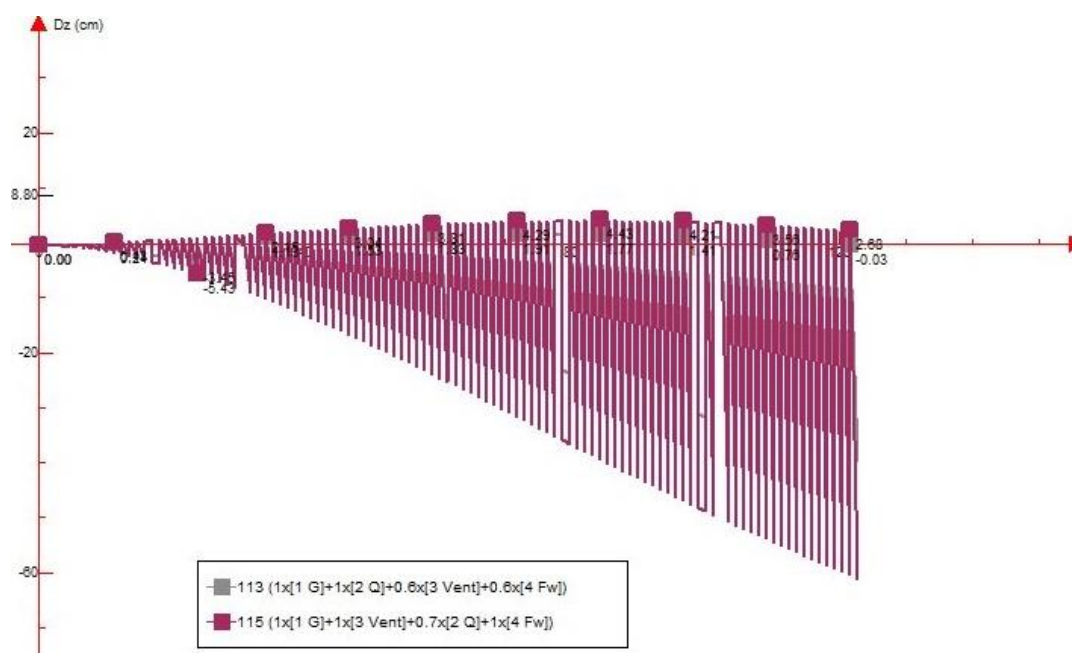
Les figures suivantes sont les résultats obtenues par le logiciel Advance Design, pour deux directions du vent

### a) *Section rectangulaire – vent suivant x :*

Dans ce cas, on aura « d » égal à 14.5m et b égal à 19.5m



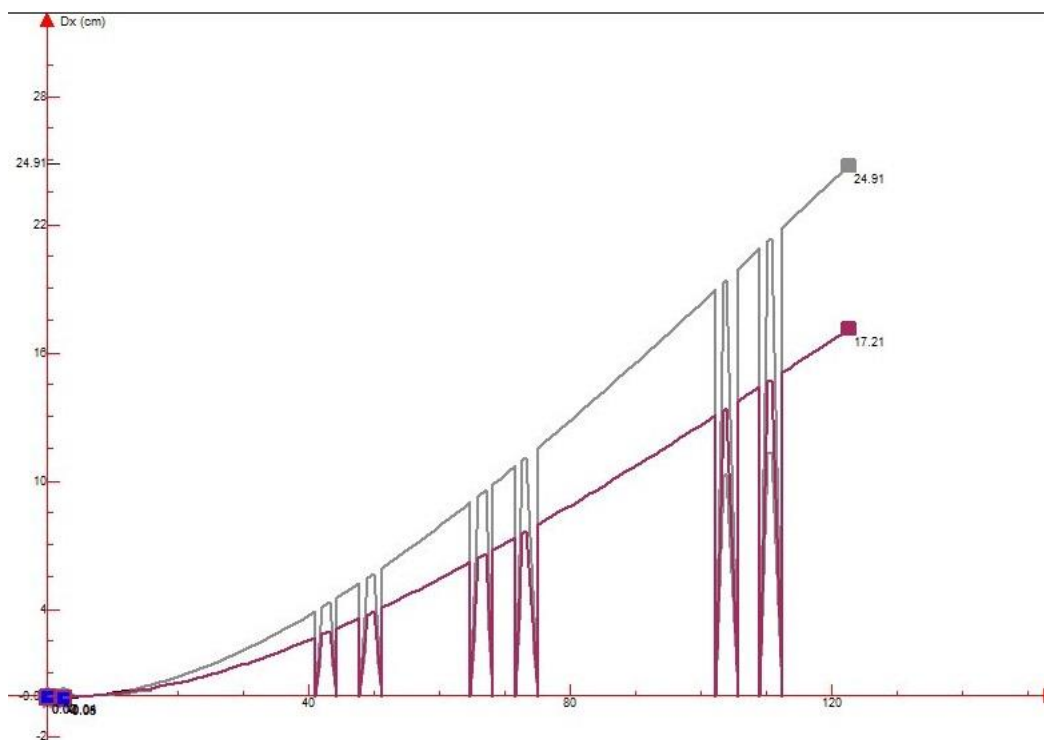
**Fig. 30 :** Déplacement suivant x du bâtiment



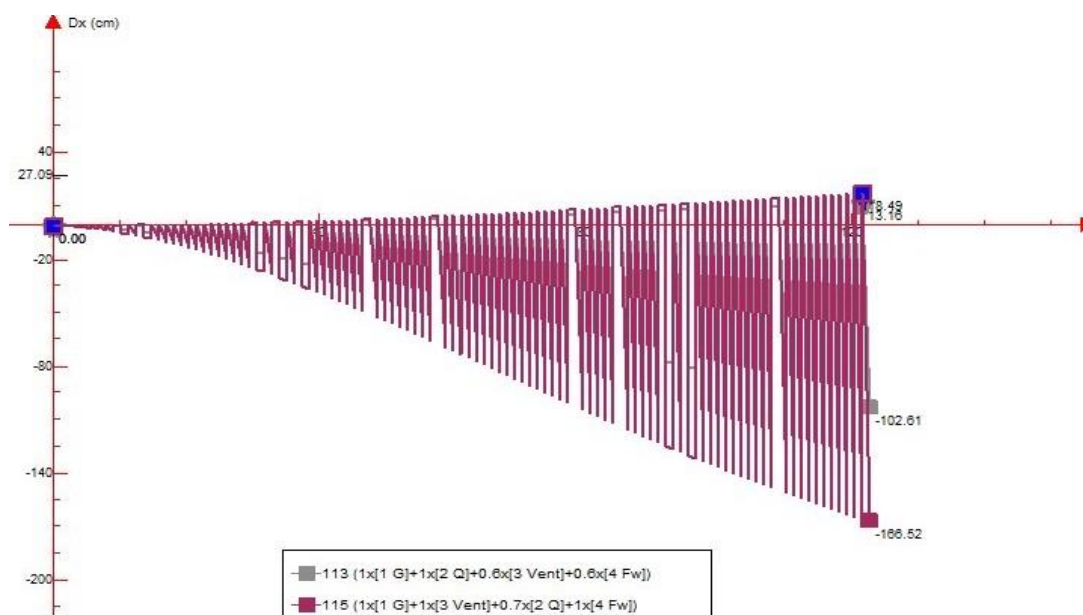
**Fig. 31 :** Déplacement suivant y du bâtiment

**b) Section rectangulaire – vent suivant y :**

Dans ce cas, d égal 19.5m et b égal à 14.5m



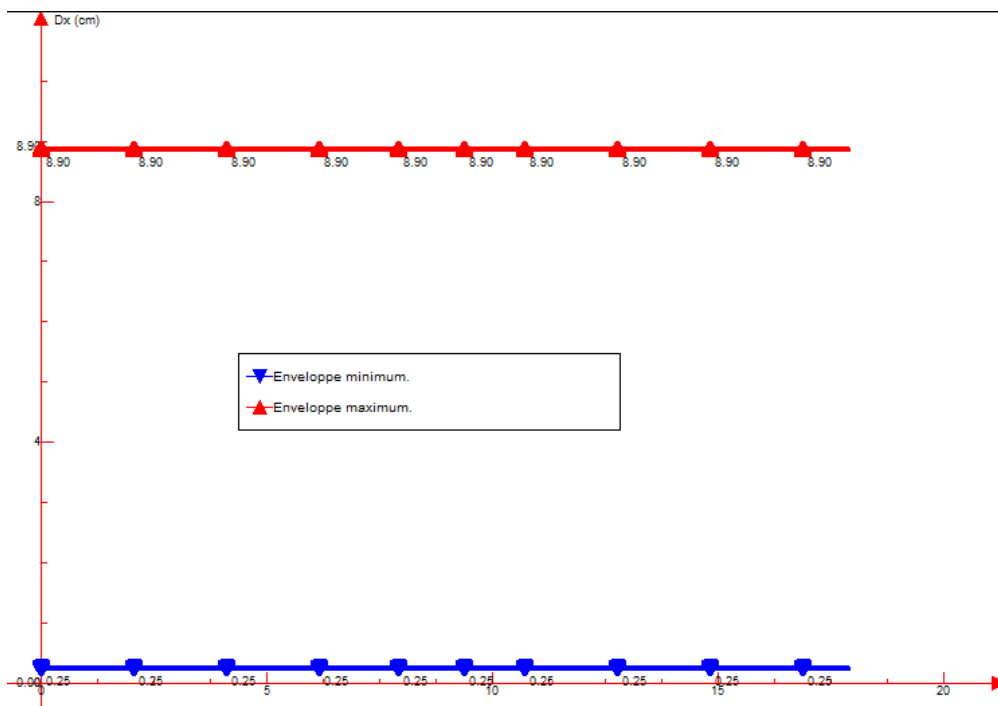
**Fig. 32 :** Déplacement suivant y du bâtiment



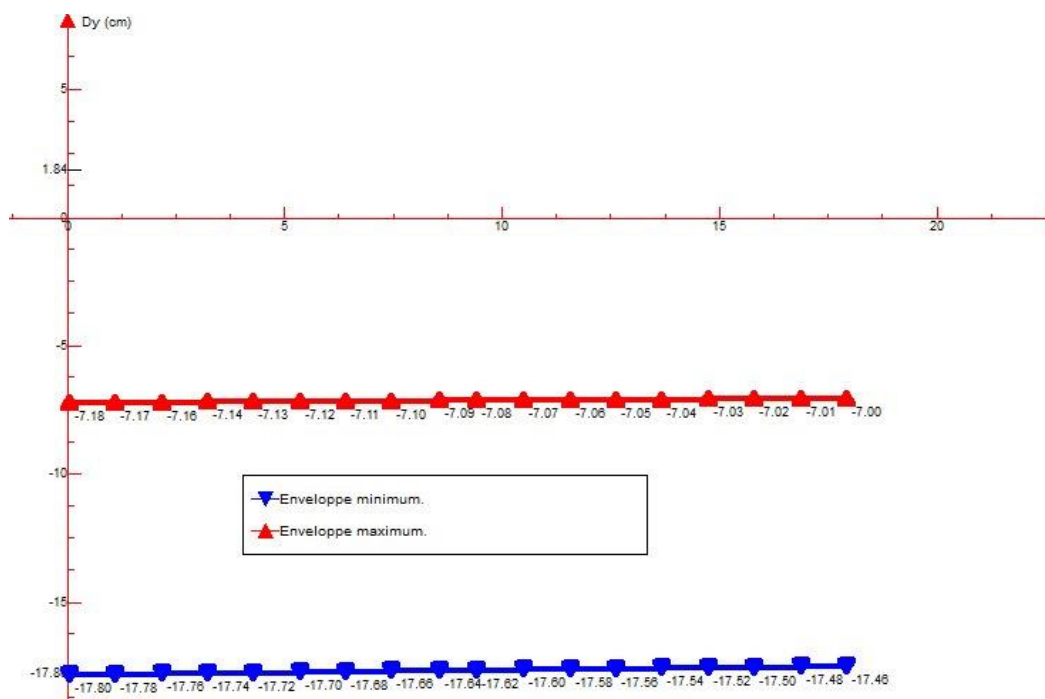
**Fig. 33 :** Déplacement suivant x du bâtiment

c) *Section circulaire :*

Pour une section circulaire, quelque soit la direction du vent le déplacement suivant et perpendiculairement au vent est le même. Rappelons que les éléments structuraux contribuant à la rigidité de la structure valent 12% de la surface total de l'étage.



**Fig. 34 :** Déplacement à la tête dans la même direction du vent suivant x



**Fig. 35 :** Déplacement à la tête dans la direction perpendiculaire au vent.

On réalise une similitude de déplacement entre le logiciel et les formules empiriques déjà faite. Dans le cas du cylindre, la conception du bâtiment dans « Advance » à requit une surface d'élément contribuant à la rigidité de 12% : on remarque une diminution de 0.5 fois approximativement du déplacement dans la direction perpendiculaire par rapport au calcul numérique fait sur Excel pour un pourcentage de 6% d'élément de rigidité.

### Chapitre 3 : Application sur bâtiment optimal

Le bâtiment conçu respecte les déductions citées au (cf. III – Chap. 2). Par suite, le bâtiment comporte les dimensions suivantes :

- $(b \times d) \text{ m}^2 = (15 \times 30) \text{ m}^2$  (vérifiant la condition  $d/b \in [2 ; 3]$ )
- $r = 3\text{m}$  (vérifiant la condition  $r/b \in [0.2 ; 0.3]$ )
- $h = 165\text{m}$  (vérifiant la condition  $h/d < 6$ )  
 $\Rightarrow 165/3.4 = 48.53$  étages **soit  $h=48 \times 3.4=163.2\text{m}$**
- Pourcentage d'éléments contribuant à la rigidité = 6%
- $e_{\text{voile}} = 0.4\text{m}$

Le bâtiment est situé dans la *région IV* où il est entouré d'obstacles distants de 9m (donc  $x=9\text{m}$ ), ayant une hauteur moyenne d'obstruction de 15m (donc  $h_{\text{ave}} = 15\text{m}$ ). La pente du versant au vent vaut  $\Phi = 0$  (donc  $C_0(z) = 1$ )

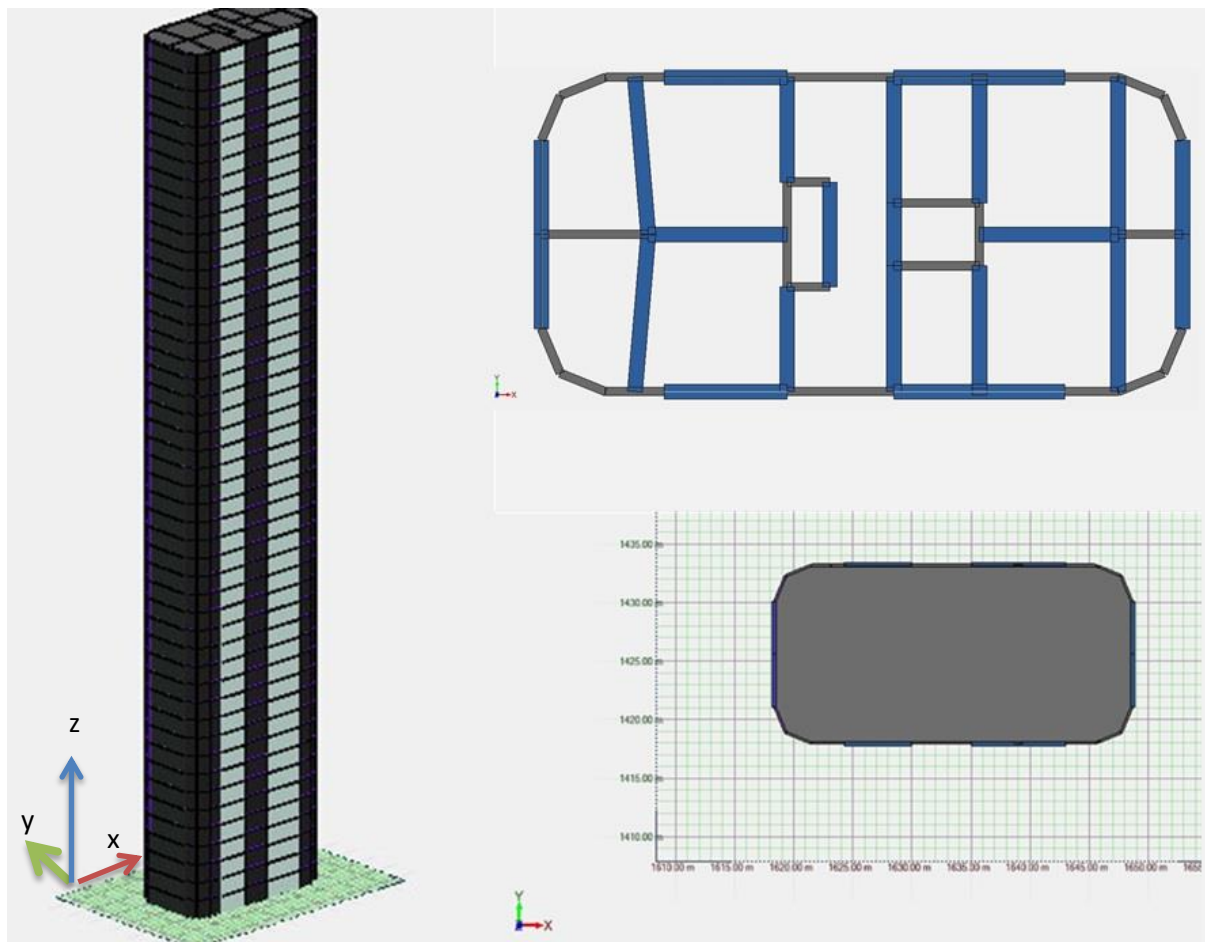


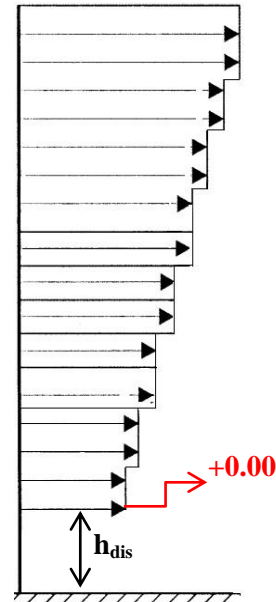
Fig. 36 : Bâtiment optimal sur Advance Design

**Donc :**

- $k_l = C_0(z) \cdot [1 - 2 \cdot 10^{-4} (\log_{10}(z_0) + 3)^6] = 0.8542$
- $k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} = 0.23433$  avec :  $z_0 = 1$
- $V_b = 26 \text{ m/s}$
- $V_m = 0.23433 \cdot 26 \cdot \ln\left(\frac{z}{1}\right)$
- $I_v(z) = \frac{0.8542}{\ln(z/1)}$
- $q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho^1 \cdot V_m^2$  avec :  $q_p(z) = w_e(\text{car } c_{pe} = 1)$

z	V <sub>m</sub> (z)	I <sub>v</sub> (z)	q <sub>p</sub> (z) (N/m <sup>2</sup> )	q <sub>p</sub> (z) (KN/m <sup>2</sup> )
0	0	0	0	0
15	16.49901	0.31543	534.8815	0.534882
35.2	21.69596	0.239873	772.4224	0.772422
55.4	24.45915	0.212774	912.1938	0.912194
75.6	26.35319	0.197482	1013.404	1.013404
95.8	27.79595	0.187232	1093.448	1.093448
116	28.96163	0.179696	1159.981	1.159981
136.2	29.9397	0.173825	1217.091	1.217091
151.2	30.57624	0.170207	1254.889	1.254889

**Tab. XXIV :** Résultat de  $q_p(z)$  pour le bâtiment optimal



La fréquence propre du bâtiment, de masse  $m_e$  égal à **2541.18KN/m**, est de **0.3356 Hz**. Cette fréquence correspond à une accélération maximale de **0.065 m/s<sup>2</sup>** (cf. fig.29) : l'accélération trouvée correspond au mouvement du bâtiment suivant l'axe x.

Par suite, la vitesse critique du vent est égale à **111.871 m/s**.

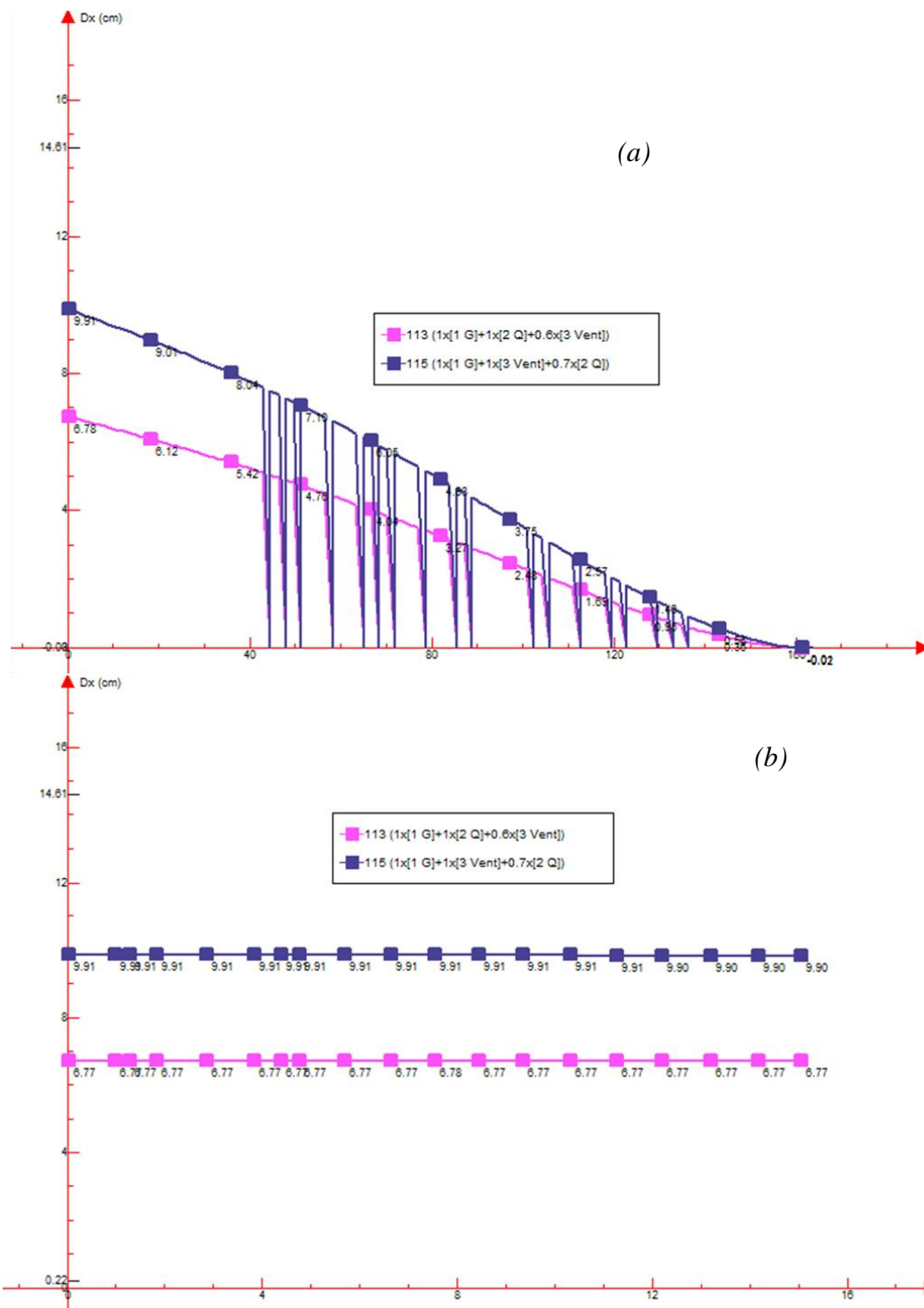
Or :

$$\begin{cases} \frac{h}{d} = 5.44 \\ \text{et} \\ V_{crit,i} > 1,25 \cdot V_m \end{cases}$$

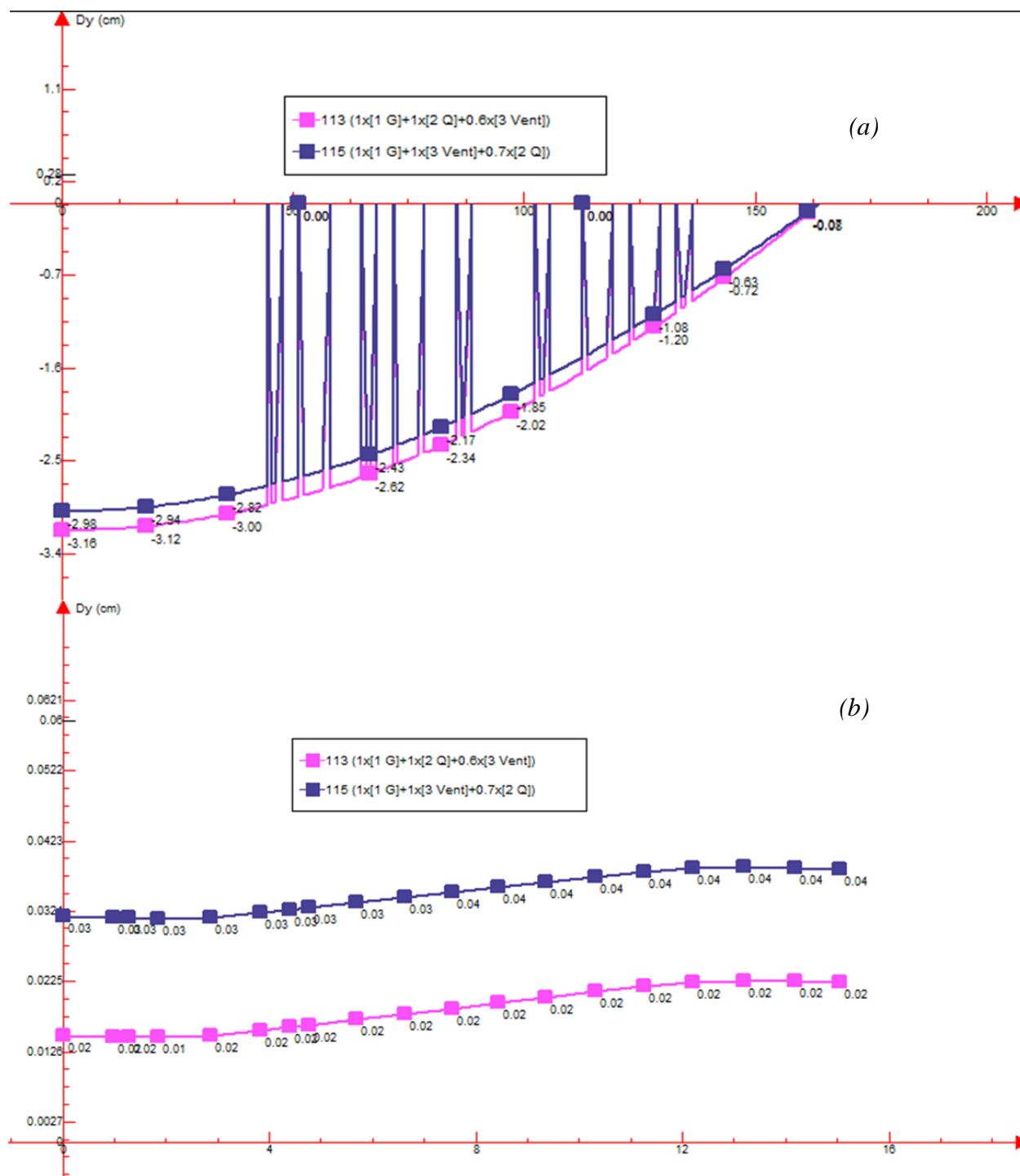
⇒ *il n'existe pas de détachement tourbillonnaire*



Des résultats ont été fournis par le logiciel, en effectuant des sections selon l'axe longitudinal et transversal du bâtiment.



**Fig. 37 :** Variation de Dx selon l'axe longitudinal (a), et variation de Dx à la tête du bâtiment en fonction de x (b) en cm.



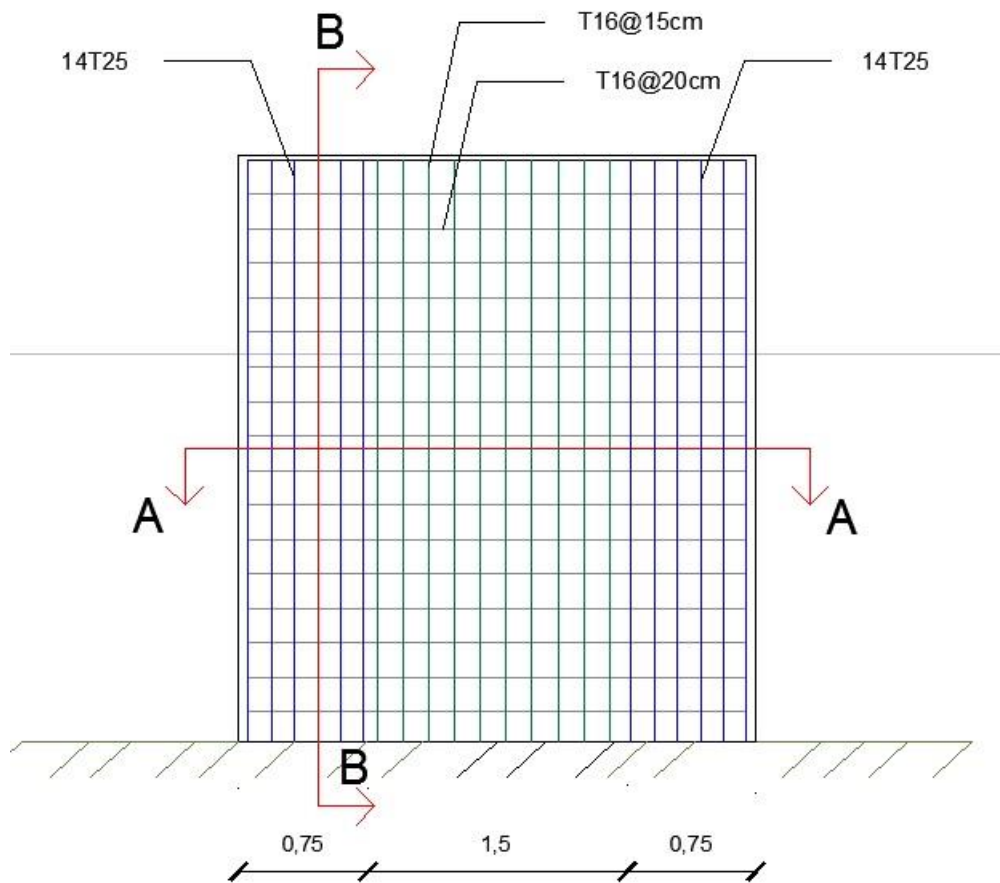
**Fig. 38** : Variation du Dy selon l'axe longitudinal (a), et variation de Dy à la tête du bâtiment en fonction de y (b) en cm

Du point de vue déplacement, en comparant les figures 30,32 et 34 illustrant les déplacements selon la direction du vent, on réalise que le bâtiment optimal répond à ce type de chargement d'une façon meilleur malgré son élancement qui est de 1.35 fois plus important. De même, en comparant les figures 31, 33, et 35, on remarque une amélioration remarquable du déplacement suivant la direction perpendiculaire au vent ce qui rend ce genre de volume de bâtiment l'optimal.

D'après l'AN française de l'EN 1992-1-1 :

Afin de visualiser la résistance de la structure, on prend le ferrailage de voile de contreventement au pied de la structure d'épaisseur 40 cm où le moment est maximal (fig.40)

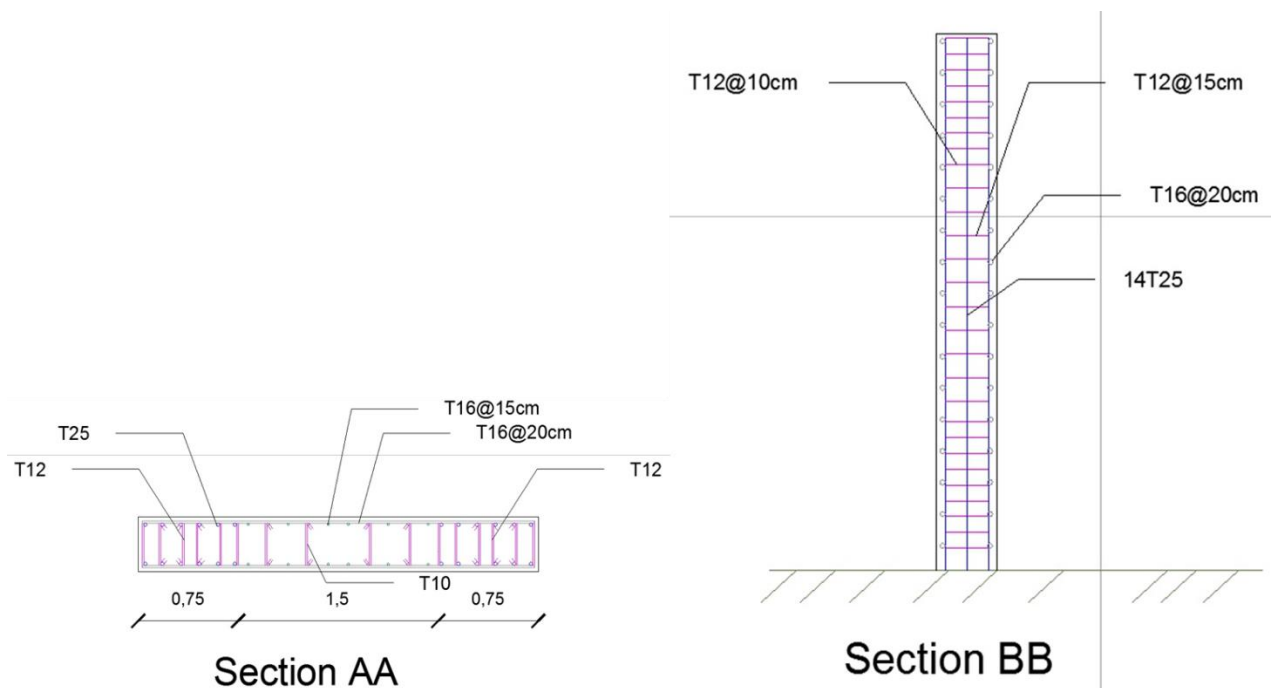
Par hypothèse, on a pris  $f_{ck} = 35\text{MPa}$  et  $f_{yk} = 500\text{ Mpa}$



## Vue en face

**Fig. 40** : Ferrailage de la voile au pied du bâtiment

( $M=4752.64\text{KN/m}$  ;  $N=10368.1\text{KN}$  ;  $T=770.45\text{ KN}$ )



**Fig.41** : Section de la voile considéré

Illustrons les grandeurs des modes propres générées pour dix modes par le logiciel :

Grandeurs des modes propres					
Mode (N°)	Pulsation (Rad/s)	Période (s)	Fréquence (Hz)	Énergie (J)	Amortissement (%)
1	1.03	6.08	0.16	0.28	4.00
2	1.33	4.74	0.21	0.45	4.00
3	1.63	3.86	0.26	0.63	4.00
4	3.80	1.65	0.6	4.32	4.00
5	4.80	1.31	0.76	6.08	4.00
6	5.62	1.12	0.89	8.26	4.00
7	8.16	0.77	1.3	22.56	4.00
8	10.36	0.61	1.65	29.42	4.00
9	11.68	0.54	1.86	39.9	4.00
10	13.85	0.45	2.2	71.47	4.00

**Tab. XXV** : Variation de la fréquence en fonction des modes

En comparant les fréquences des dix premiers modes du tableau XXV avec celles du tableau XXIII, on réalise une amélioration du comportement du bâtiment en absence de dispositif d'amortissement, où la fréquence du bâtiment actuelle est de 0.16Hz alors que le bâtiment du paragraphe (IV-1) est de 0.25 Hz. En effet, la structure établit dans le présent paragraphe correspond à un déplacement beaucoup plus petit que les cas précédent durant une période

qui vaut approximativement le double : on peut classer ce projet dans la gamme 2 du tableau XXVI.

<b>Gamme</b>	<b>Accélération (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>Effet</b>
<b>1</b>	<0.05	Aucune perception du mouvement
<b>2</b>	0.05 – 0.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Personnes sensibles peuvent percevoir le mouvement</li> <li>• Les objets suspendus peuvent se déplacer légèrement</li> </ul>
<b>3</b>	0.1 – 0.25	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La majorité des gens percevront le mouvement</li> <li>• L'amplitude de mouvement peut affecter les travaux administratifs</li> <li>• L'exposition à long terme induit le vertige</li> </ul>
<b>4</b>	0.25 – 0.4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les travaux administratifs sont difficiles ou impossibles à accomplir</li> </ul>
<b>5</b>	0.4 – 0.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les gens perçoivent fortement le mouvement</li> <li>• Difficulté de marcher naturellement</li> <li>• Perte d'équilibre des personnes debout</li> </ul>
<b>6</b>	0.5 – 0.6	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La plupart des gens ne peuvent tolérer le mouvement et ne peuvent pas marcher naturellement</li> </ul>
<b>7</b>	0.6 – 0.7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les gens ne peuvent plus marcher</li> </ul>
<b>8</b>	> 0.85	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les objets commencent à tomber et les gens peuvent être blessés</li> </ul>

**Tab. XXVI :** Niveaux de perception humaine

## **Conclusion :**

Le phénomène du vent est principalement complexe où nous avons simplifié le plus que possible cette charge dynamique afin de décrire analytiquement et numériquement le comportement du bâtiment.

L'étude de plusieurs cas de bâtiment accompagnée de changements de paramètres dépendant du vent, ont abouti à concevoir le bâtiment élancé le plus approprié, de caractéristiques spécifiés précédemment sans variation de la section selon l'axe longitudinal du bâtiment.

Plusieurs solution complémentaire peuvent être utilisés afin d'avoir une réponse plus favorable et ceci par utilisation d'un système amortisseur accordé, ou par variant la section, solution où on fait appel aux ingénieurs aéronautiques.

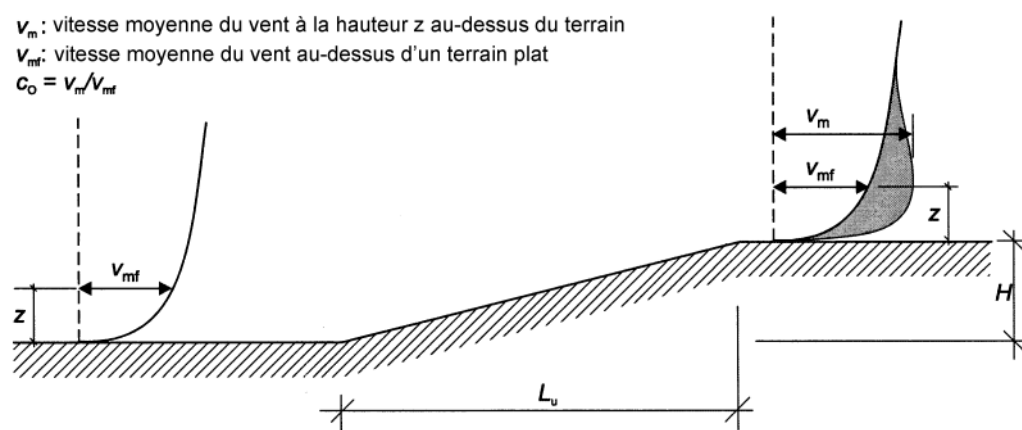
## Annexe

### 1) Longueur de rugosité « $z_0$ »

Catégorie de terrain		$z_0$ [m]	$z_{\min}$ [m]
0	Mer ou zone côtière exposée aux vents de mer ; lacs et plans d'eau parcourus par le vent sur une distance d'au moins 5 km	0,005	1
II	Rase campagne, avec ou non quelques obstacles isolés (arbres, bâtiments, etc.) séparés les uns des autres de plus de 40 fois leur hauteur	0,05	2
IIIa	Campagne avec des haies ; vignobles ; bocage ; habitat dispersé	0,20	5
IIIb	Zones urbanisées ou industrielles ; bocage dense ; vergers	0,5	9
IV	Zones urbaines dont au moins 15 % de la surface sont recouverts de bâtiments dont la hauteur moyenne est supérieure à 15 m ; forêts	1,0	15

### 2) Coefficient orographique $C_0(z)$ (extrait de l'EC1, A.3)

Sur les collines isolées ou en chaîne, ou les falaises et les espaces la vitesse du vent varie en fonction de la pente, dans la direction du vent, du versant amont  $\Phi = H/L_u$  ; la hauteur  $H$  et la longueur  $L_u$  sont définies à la figure 24 ci-dessous :



**Fig. 42 :** Schématisation de l'augmentation du vent due à l'orographie

L'augmentation la plus importante des vitesses du vent se produit à proximité du sommet du versant, et est déterminée à partir du coefficient d'orographie  $C_0$ . La pente n'a pas d'effet significatif sur l'écart type de la turbulence.

Le coefficient d'orographie,  $c_o(z) = v_m/v_{mf}$  tient compte de l'augmentation de la vitesse moyenne du vent passant au-dessus des collines et des escarpements (mais non dans des régions ondulées et montagneuses). Il est lié à la vitesse du vent à la base de la colline ou de l'escarpement. Il convient de prendre en compte les effets de l'orographie dans les situations suivantes :

- a) pour les sites (de construction) situés sur les versants au vent de collines et de chaînes de collines :
  - lorsque  $0,05 < \phi \leq 0,3$  et pour  $|x| \leq L_u/2$  ;
- b) pour les sites situés sur les versants sous le vent de collines et de chaînes de collines :
  - lorsque  $\phi < 0,3$  et pour  $x < L_d/2$  ;
  - lorsque  $\phi \geq 0,3$  et pour  $x < 1,6 H$  ;
- c) pour les sites situés sur les versants au vent de falaises et d'escarpements :
  - lorsque  $0,05 < \phi \leq 0,3$  et pour  $|x| \leq L_u/2$  ;
- d) pour les sites situés sur les versants sous le vent de falaises et d'escarpements :
  - lorsque  $\phi < 0,3$  et  $x < 1,5 L_e$  ;
  - lorsque  $\phi \geq 0,3$  et  $x < 5 H$ .

Le coefficient d'orographie est défini par :

$$\begin{aligned}
 c_0 &= 1 && \text{pour } \phi < 0,05 \\
 c_0 &= 1 + 2 \cdot s \cdot \phi && \text{pour } 0,05 < \phi \leq 0,3 \\
 c_0 &= 1 + 0,6 \cdot s && \text{pour } \phi > 0,3
 \end{aligned}$$

où :

- $s$  est le coefficient obtenu à partir de la Figure A.2 ou de la Figure A.3 (figures où les longueurs sont rapportées à la longueur effective du versant au vent,  $L_e$ ) ;
- $\phi$  est la pente du versant au vent  $H/L_u$  dans la direction du vent (voir Figure A.2 et Figure A.3) ;
- $L_e$  est la longueur effective du versant au vent, définie dans le Tableau A.2 ;
- $L_u$  est la longueur réelle du versant au vent dans la direction du vent ;
- $L_d$  est la longueur réelle du versant sous le vent dans la direction du vent ;
- $H$  est la hauteur effective de l'obstacle ;
- $x$  est la distance horizontale entre le lieu de construction et le sommet de la crête ;
- $z$  est la distance verticale mesurée à partir du niveau du sol au lieu considéré.

**Tableau A.2 — Valeurs de la longueur effective  $L_e$**

Type de pente ( $\phi = H/L_u$ )	
Pente modérée ( $0,05 < \phi < 0,3$ )	Pente forte ( $\phi > 0,3$ )
$L_e = L_u$	$L_e = H/0,3$

NOTE Les graphiques calculés des Figures A.2 et A.3 excèdent le domaine d'application défini ci-dessus. La prise en considération des effets orographiques au-delà de ces limites est facultative.



Dans les vallées,  $c_0(z)$  peut être fixé à 1,0 quand aucune accélération due aux effets d'entonnoir n'est à prévoir. Pour les constructions situées dans des vallées, ou pour des ponts franchissant des vallées profondes, il convient de tenir compte de toute augmentation de la vitesse du vent due aux effets d'entonnoir.

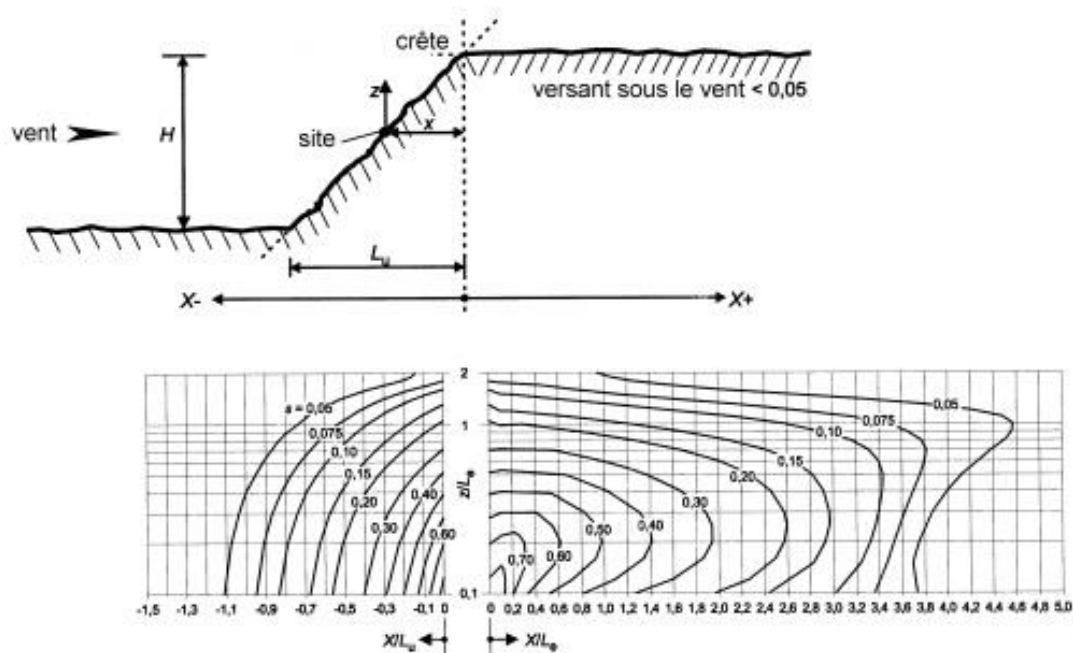


Figure A.2 — Coefficient  $s$  pour les falaises et les escarpements

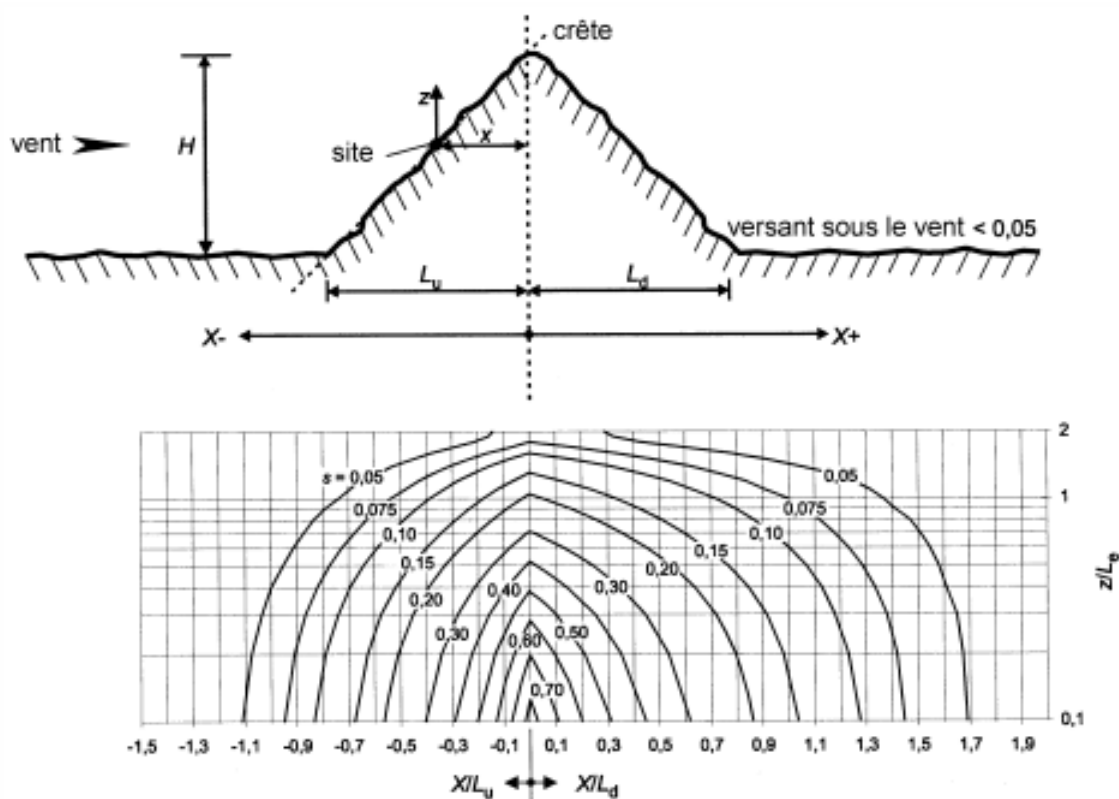


Figure A.3 — Coefficient  $s$  pour les collines isolées ou en chaîne

(5) Les expressions A.4 à A.7 et A.11 peuvent être utilisées pour calculer la valeur du coefficient  $s$ . Du fait du caractère empirique de ces expressions, il est tout particulièrement important que les valeurs des paramètres utilisés soient limitées aux plages énoncées, sous peine d'obtenir des valeurs non valables.

**a) domaine au vent pour tous les types orographiques** (Figures A.2 et A.3) :

— Pour les plages  $-1,5 \leq \frac{X}{L_u} \leq 0$  et  $0 \leq \frac{Z}{L_e} \leq 2,0$  prendre :

$$s = A \cdot e^{\left( B \cdot \frac{X}{L_u} \right)} \quad \dots (A.4)$$

où

$$A = 0,1552 \cdot \left( \frac{Z}{L_e} \right)^4 - 0,8575 \cdot \left( \frac{Z}{L_e} \right)^3 + 1,8133 \cdot \left( \frac{Z}{L_e} \right)^2 - 1,9115 \cdot \left( \frac{Z}{L_e} \right) + 1,0124 \quad \dots (A.5)$$

et

$$B = 0,3542 \cdot \left( \frac{Z}{L_e} \right)^2 - 1,0577 \cdot \left( \frac{Z}{L_e} \right) + 2,6456 \quad \dots (A.6)$$

— Lorsque  $\frac{X}{L_u} < -1,5$  ou  $\frac{Z}{L_e} > 2$  prendre :

$s = 0$

**b) domaine sous le vent dans le cas des falaises et des escarpements** (Figure A.2) :

— Pour les plages  $-0,1 \leq \frac{X}{L_e} \leq 3,5$  et  $0,1 \leq \frac{Z}{L_e} \leq 2,0$  prendre :

$$s = A \cdot \left( \log \left[ \frac{X}{L_e} \right] \right)^2 + B \cdot \left( \log \left[ \frac{X}{L_e} \right] \right) + C \quad \dots (A.7)$$

où :

$$A = -1,3420 \cdot \left( \log \left[ \frac{Z}{L_e} \right] \right)^3 - 0,8222 \cdot \left( \log \left[ \frac{Z}{L_e} \right] \right)^2 + 0,4609 \cdot \log \left[ \frac{Z}{L_e} \right] - 0,0791 \quad \dots (A.8)$$

$$B = -1,0196 \cdot \left( \log \left[ \frac{Z}{L_e} \right] \right)^3 - 0,8910 \cdot \left( \log \left[ \frac{Z}{L_e} \right] \right)^2 + 0,5343 \cdot \log \left[ \frac{Z}{L_e} \right] - 0,1156 \quad \dots (A.9)$$

$$C = 0,8030 \cdot \left( \log \left[ \frac{Z}{L_e} \right] \right)^3 + 0,4236 \cdot \left( \log \left[ \frac{Z}{L_e} \right] \right)^2 - 0,5738 \cdot \log \left[ \frac{Z}{L_e} \right] + 0,1606 \quad \dots (A.10)$$

— Pour la plage  $0 \leq \frac{X}{L_e} \leq 0,1$

effectuer une interpolation entre les valeurs pour  $\frac{X}{L_e} = 0$  ( $s = A$  dans l'expression (A.5)) et  $\frac{X}{L_e} = 0,1$ .

— Lorsque :  $\frac{Z}{L_e} < 0,1$  utiliser les valeurs pour  $\frac{Z}{L_e} = 0,1$ .

— Lorsque :  $\frac{Z}{L_e} > 3,5$  ou  $\frac{Z}{L_e} > 2,0$  prendre la valeur  $s = 0$ .

c) domaine sous le vent dans le cas des collines et des chaînes de collines (Figure A.3) :

— Pour les plages  $0 \leq \frac{X}{L_d} \leq 2,0$  et  $0 \leq \frac{Z}{L_e} \leq 2,0$  prendre :

$$s = A \cdot e^{\left(B \cdot \frac{X}{L_d}\right)} \quad \dots (A.11)$$

où

$$A = 0,1552 \cdot \left(\frac{Z}{L_e}\right)^4 - 0,8575 \cdot \left(\frac{Z}{L_e}\right)^3 + 1,8133 \cdot \left(\frac{Z}{L_e}\right)^2 - 1,9115 \cdot \left(\frac{Z}{L_e}\right) + 1,0124 \quad \dots (A.12)$$

$$B = -0,3056 \cdot \left(\frac{Z}{L_e}\right)^2 + 1,0212 \cdot \left(\frac{Z}{L_e}\right) - 1,7637 \quad \dots (A.13)$$

— Lorsque  $\frac{X}{L_d} > 2,0$  ou  $\frac{Z}{L_e} > 2,0$  prendre :

$$s = 0$$

NOTE Les expressions (A.5) et (A.12) sont identiques.

### 3) Coefficient de force pour bâtiments circulaire $C_f$

(1) Il convient de déterminer le coefficient de force  $c_f$  applicable à un cylindre à base circulaire de longueur finie à partir de l'expression

$$C_f = C_{f,0} \cdot \psi_{\lambda}$$

où :

$C_{f,0}$  est le coefficient de force des cylindres sans écoulement de contournement aux extrémités

$\psi_{\lambda}$  est le facteur d'effet d'extrémités

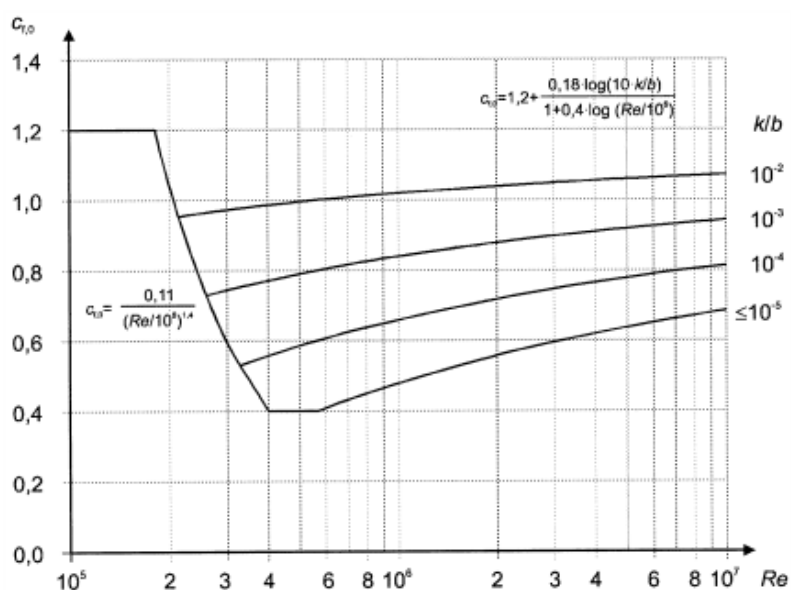


Fig. 43: Variation de  $C_{f,0}$  en fonction de  $Re$  et  $k/b$

La figure précédente est fondée sur le nombre de Reynolds calculé avec :

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot q_p(z)}{\rho}}$$

Plusieurs valeurs de rugosité de surface équivalente « k » sont données dans le tableau suivant :

Type de surface	Rugosité équivalente k [mm]	Type de surface	Rugosité équivalente k [mm]
verre	0,0015	béton lisse	0,2
métal poli	0,002	bois raboté	0,5
peinture lisse	0,006	béton brut	1,0
peinture appliquée au pistolet	0,02	bois brut	2,0
acier (produits clairs)	0,05	rouille	2,0
fonte	0,2	maçonnerie de brique	3,0
acier galvanisé	0,2		

**Tab. XVII :** Valeurs de rugosité de surface équivalente k

#### 4) Facteur de pointe $K_p$ (utilisée pour $C_s C_d$ )

Le facteur de pointe est défini comme le rapport de la valeur maximale de la partie fluctuante de la réponse à son écart type à partir de la formule suivante, représentée à la figure 25

$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)}} \text{ ou } k_p = 3 \text{ selon la plus grande valeur}$$

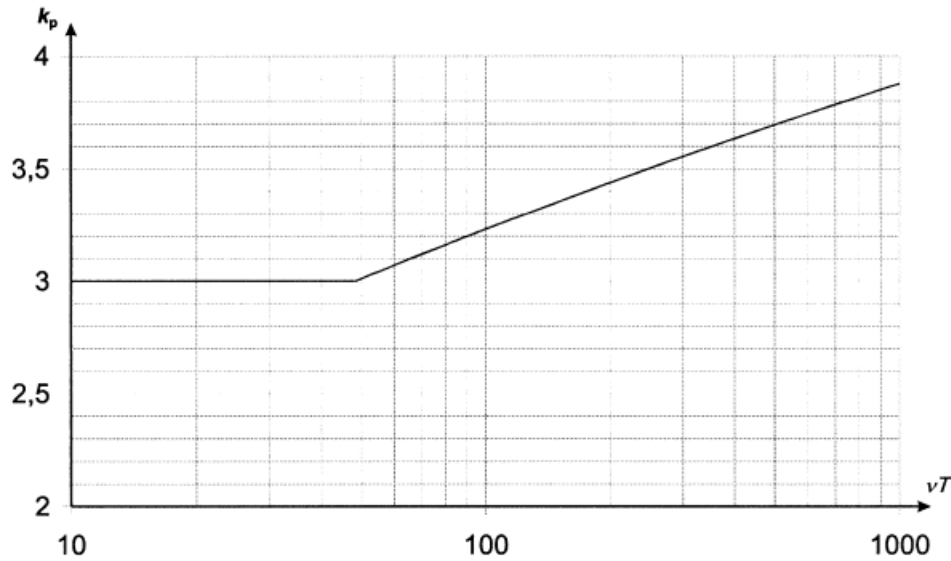
où :

$v$  est la fréquence de franchissement donnée en (4) ;

$T$  est la durée d'intégration de la vitesse moyenne du vent,  $T = 600$  s ;

(4) Il convient de déterminer la fréquence  $v$  à partir de l'expression (B.5) :

$$v = n_{1,x} \times \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} ; v \geq 0,08 \text{ Hz}$$



**Fig. 44** : Facteur de pointe  $k_p$

##### 5) Calcul de $B^2$ et $R^2$

- a) Le coefficient de réponse quasi-statique «  $B^2$  » traduisant l'absence de corrélation parfaite de la pression sur la surface de la construction peut être calculé à l'aide de la formule :

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0.9 * \left( \frac{b + h}{L(z_s)} \right)^{0.63}}$$

Avec :

- $b, h$  : largeur et hauteur de la construction
- $L(z_s)$  : échelle de turbulence représentant la dimension moyenne des rafales du vent naturel. Pour les hauteurs inférieures à 200 m, l'échelle de turbulence peut être calculée à l'aide de la formule :

$$L(z) = L_T \cdot (z/z_T)^\alpha$$

- b) Le coefficient de réponse résonante «  $R^2$  » traduit l'effet de la turbulence en résonance avec le mode de vibration considéré de la construction :

$$R = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot S_L(z_s, n_{1,x}) \cdot R_h(\eta_h) \cdot R_b(\eta_b)$$

Avec :

- $\delta$  : décrement logarithmique total d'amortissement pour le mode fondamental de flexion estimé grâce à :

$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d$$

- $\delta_s$  : décrement logarithmique d'amortissement structural trouvé dans le tableau suivant

Type de construction		Amortissement structural $\delta_s$
bâtiments en béton armé		0,10
bâtiments en acier		0,05
structures mixtes béton + acier		0,08
tours et cheminées en béton armé		0,03
cheminées en acier soudé non revêtues sans isolation thermique externe		0,012
cheminées en acier soudé non revêtues avec isolation thermique externe		0,020
cheminée en acier avec un conduit et isolation thermique externe <sup>a)</sup>	$h/b < 18$	0,020
	$20 \leq h/b < 24$	0,040
	$h/b \geq 26$	0,014
cheminée en acier avec plusieurs conduits et isolation thermique externe <sup>a)</sup>	$h/b < 18$	0,020
	$20 \leq h/b < 24$	0,040
	$h/b \geq 26$	0,025
cheminée en acier avec conduit en brique intérieur		0,070
cheminée en acier avec gunite à l'intérieur		0,030
cheminées couplées sans conduit		0,015
cheminée en acier haubanée sans conduit		0,04
ponts en acier + pylônes en treillis en acier	soudés	0,02
	assemblés par boulons à haute résistance	0,03
	assemblés par boulons ordinaires	0,05
ponts mixtes		0,04
ponts en béton	précontraint sans fissures	0,04
	avec fissures	0,10
ponts en bois		0,06 – 0,12
ponts en alliages d'aluminium		0,02
ponts en résine renforcée de fibres ou verre		0,04 – 0,08
câbles	fils parallèles	0,006
	fils en torons	0,020
<p>NOTE 1 Les valeurs relatives aux composites de bois et de plastique sont des valeurs données uniquement à titre indicatif. Dans les cas où il est montré que les effets aérodynamiques sont significatifs dans le calcul, des valeurs d'une plus grande précision sont nécessaires et peuvent être obtenues en consultant un spécialiste (avec l'accord, le cas échéant, de l'autorité compétente).</p> <p>NOTE 2 Dans le cas de ponts à câbles, les valeurs données dans le Tableau F.2 doivent être multipliées par le coefficient 0,75.</p> <p>a) L'interpolation linéaire peut être utilisée pour les valeurs intermédiaires de <math>h/b</math>.</p>		

**Tab. XXVIII :** Valeurs du décrement logarithmique d'amortissement structural du mode fondamental

- $\delta_a$  : décrement logarithmique d'amortissement aérodynamique pour le mode fondamental pris égal à

$$\delta_a = \frac{C_f \cdot \rho \cdot V_m(z_s)}{2 \cdot n_1 \cdot m_e}$$

- $\delta_d$  : décrement logarithmique d'amortissement dû à des dispositifs spéciaux

$$\delta_d = \zeta \cdot \frac{1}{n_1 \cdot 2\pi}$$

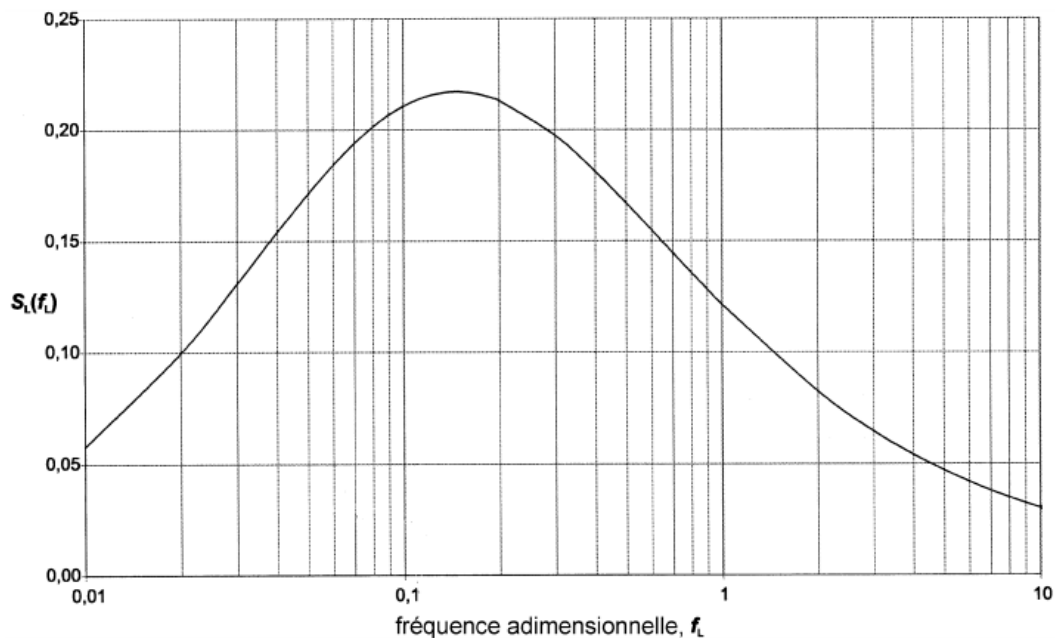
( $\zeta = 4\%$  pour B.A)

- $S_L(z_s, n)$  : distribution du vent en fréquence exprimé par la fonction de densité spectrale de puissance adimensionnelle exprimé par

$$S_L(z_s, n) = \frac{6,8 \cdot f_L(z_s, n)}{(1 + 10,2 \cdot f_L(z_s, n))^{5/3}}$$

- $f_L(z_s, n)$  : fréquence adimensionnelle calculé pour la fréquence  $n_1$  propre de la structure en Hz.

$$f_L(z_s, n) = \frac{n \cdot L(z)}{V_m(z)}$$



**Fig. 45** : Fonction de densité spectrale de puissance adimensionnelle

- $R_h, R_b$  sont des fonctions d'admittance aérodynamique données par

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 \cdot \eta_h^2} (1 - e^{-2 \cdot \eta_h}) ; R_h = 1 \text{ pour } \eta_h = 0$$

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 \cdot \eta_b^2} (1 - e^{-2 \cdot \eta_b}) ; R_b = 1 \text{ pour } \eta_b = 0$$

$$\text{avec } \eta_h = \frac{4,6 \cdot h}{L(z_s)} \cdot f_L(z_s, n_{1,x}) \text{ et } \eta_b = \frac{4,6 \cdot b}{L(z_s)} \cdot f_L(z_s, n_{1,x})$$

#### 6) Fréquence fondamentale pour bâtiment circulaire

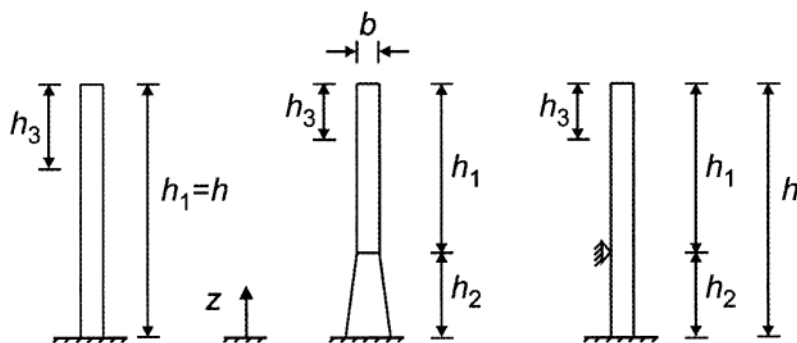
$$n_1 = \frac{\varepsilon_1 \cdot b}{h_{\text{eff}}^2} \cdot \sqrt{\frac{W_s}{W_t}} \quad [\text{Hz}]$$

Avec :

- $b$  : diamètre en tête (m)
- $h_{\text{eff}}$  : hauteur équivalente de la structure où

$$h_{\text{eff}} = h_1 + \frac{h_2}{3}$$

- $W_s$  : poids des éléments structuraux contribuant à la rigidité de la structure
- $W_t$  : poids total de la structure
- $\varepsilon_1$  : égal à 1000 pour structure métallique, et à 700 pour structure en béton ou maçonnerie.



**Fig. 46 :** Paramètres géométriques des structures cylindriques



## 7) Hypothèses

Pour les tableaux d'optimisation, on y fixe les hypothèses suivantes :

- $G_{\text{total}} = 900 \text{ Kg/m}^2$
- $Q_{\text{total}} = 150 \text{ Kg/m}^2$   
 $\Rightarrow 1,35.G_{\text{total}} + 1,5.Q_{\text{total}} = 1440 \text{ Kg/m}^2$
- $m_e = \frac{14,4 \cdot (\text{nombre d'étages}) \cdot b \cdot d}{h_{\text{total}}} \quad (\text{pour section rectangulaire})$   

$$= \frac{14,4 \cdot (h_{\text{total}}/3,4) \cdot b \cdot 20}{h_{\text{total}}}$$

$$\Rightarrow m_e = 87,706 \cdot b \text{ (KN/m)}$$
- $m_e = \frac{14,4 \cdot (\text{nombre d'étages}) \cdot \pi \cdot \phi^2}{4 \cdot h_{\text{total}}}$   

$$= \frac{14,4 \cdot (h_{\text{totale}}/3,4) \cdot \pi \cdot \phi^2}{4 \cdot h_{\text{total}}}$$

$$\Rightarrow m_e = 3,326 \cdot \phi^2 \text{ (KN/m)}$$
- La surface des éléments structuraux (vue en plan) par rapport à la surface total de l'étage est prise égale à **0.06** ( => **6% de la surface contribuant à la rigidité**)

$$\Rightarrow W_s = [0.06 \cdot (\pi \cdot \phi^2)] \cdot 25 \cdot (\text{nombre d'étages}) \quad (\text{KN})$$

$$\Rightarrow W_t = (\pi \cdot \phi^2) \cdot 14,4 \cdot (\text{nombre d'étages}) \quad (\text{KN})$$

$$\Rightarrow n_1 = \frac{416,6 \cdot \phi}{h^2}$$

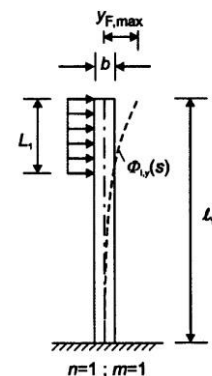
- **Pour le nombre de Reynolds, on prend :**

- $\mu = 0.000018 \text{ Kg/m.s}$

- $u = V_{\text{crit}}$

- $l = \frac{\pi \cdot \phi}{2}$

- Un tourbillon est considéré comme une charge triangulaire, où la résultante est à 0,66h du pied de la structure : en effet, la valeur  $z_s = 0.6h$  de l'EC provient de l'interprétation déjà énoncée. Donc, afin d'appliquer la force  $F_w(s)$  sur le bâtiment, on applique une force uniforme sur 0.4h de la tête de la structure. Cette approximation est représentée dans l'AN E.1.5.2.3 (EC1).



## Liste des figures :

- **Fig.1** : Carte de  $V_{b,0}$  en France
- **Fig. 2** : Carte de  $C_{dir}$  en considérant la convention de repérage du vent
- **Fig. 3** : Variation de  $C_e(z)$  de différents types de terrains en fonction de  $z$
- **Fig. 4** : Distribution de la pression dynamique de pointe
- **Fig. 5** : Hauteur d'obstruction et espacement au vent
- **Fig. 6** : Légende relative aux murs verticaux
- **Fig. 7** : Coefficient de force  $C_{f,0}$  de sections rectangulaires à angles vifs et sans écoulement de contournement aux extrémités
- **Fig. 8** : Variation de  $\Psi_r$  en fonction de  $r/b$
- **Fig. 9** : Valeurs indicatives de  $\Psi_\lambda$  en fonction  $\varphi$  et  $\lambda$
- **Fig. 10** : Répartition de la pression permettant de prendre en compte les effets de torsion
- **Fig. 11** : Variation de  $St$  en fonction de  $d/b$
- **Fig. 12** : écoulement non décollé d'un profil d'ail
- **Fig. 13** : Variation de  $C_D$  en fonction du Ratio  $L/D$
- **Fig. 14** : Exemples d'application de la longueur de corrélation  $L_j$  ( $j=1, 2, 3$ )
- **Fig. 15** : Effet de turbulence sur les couches de cisaillement
- **Fig. 16** : Identification des zones critiques
- **Fig. 17** : Procédé général de simulation numérique
- **Fig. 18** : Variations de  $V_{crit}$  pour  $h$  constante et variable
- **Fig. 19** : Variation de  $V_{crit}$  pour  $h$  constante et  $\emptyset$  variable
- **Fig. 20** : Variations de  $C_f$  pour bâtiment circulaire, et rectangulaire sans et avec angles arrondis
- **Fig. 21** : Variation de  $y_{max}$  en fonction de «  $d$  »
- **Fig. 22** : exemple de variation de  $F_w(s)$  pour  $h=200m$
- **Fig. 23** : Changement de régimes d'écoulement autour d'un cylindre en fonction de  $Re$
- **Fig. 24** : Variation de  $St$  en fonction de  $Re$ , pour une section circulaire.
- **Fig 25** : Ailettes hélicoïdales pour une structure généralement circulaire
- **Fig. 26** : schématisation d'un système amortisseur accordé
- **Fig. 27** : Bâtiment circulaire sur logiciel « Advance Design »

- **Fig. 28** : Tableau de combinaison introduit au logiciel « Advance Design »
- **Fig. 29** : Variation de la fréquence propre en fonction de l'accélération maximale
- **Fig. 30** : Déplacement suivant x du bâtiment
- **Fig. 31** : Déplacement suivant y du bâtiment
- **Fig. 32** : Déplacement suivant y du bâtiment
- **Fig. 33** : Déplacement suivant x du bâtiment
- **Fig. 34** : Déplacement dans la même direction du vent suivant x
- **Fig. 35** : Déplacement dans la direction perpendiculaire au vent.
- **Fig. 36** : Bâtiment optimal sur Advance Design
- **Fig. 37** : Variation de  $D_x$  selon l'axe longitudinal ( $a$ ), et variation de  $D_x$  à la tête du bâtiment en fonction de  $x$  ( $b$ ) en cm.
- **Fig. 38** : Variation du  $D_y$  selon l'axe longitudinal ( $a$ ), et variation de  $D_y$  à la tête du bâtiment en fonction de  $y$  ( $b$ ) en cm
- **Fig. 39** : Variation du  $M_{xx}$  dû au vent au pied de la structure
- **Fig. 40** : Ferrailage de la voile au pied du bâtiment
- **Fig. 41** : Section de la voile considéré
- **Fig. 42** : Schématisation de l'augmentation du vent due à l'orographie
- **Fig. 43** : Variation de  $C_{f,0}$  en fonction de  $Re$  et  $k/b$
- **Fig. 44** : Facteur de pointe  $k_p$
- **Fig. 45** : Fonction de densité spectrale de puissance adimensionnelle
- **Fig. 46** : Paramètres géométriques des structures cylindriques

## Liste des tableaux:

- **Tab. I** : Valeurs recommandées des  $C_{pe,1}$  et  $C_{pe,10}$  pour les murs verticaux des bâtiments à plan rectangulaire
- **Tab. II** : Valeurs recommandées de  $\lambda$
- **Tab. III** :  $St$  pour différentes sections transversales
- **Tab. IV** : Coefficient de frottement «  $c_{fr}$  »
- **Tab. V** : Longueur de corrélation  $L_j$  en fonction de l'amplitude de vibration  $y_{F,max}$
- **Tab. VI** : Constantes pour la détermination de l'effet du détachement tourbillonnaire
- **Tab. VII** : Variations de  $I_v(z)$  en fonction de la hauteur du bâtiment
- **Tab. VIII** : Variations de  $I_v(z)$  en fonction de la hauteur du bâtiment
- **Tab. IX** : Variations de  $I_v(z)$  pour région 4 en fonction de la hauteur du bâtiment
- **Tab. X** : Variations de  $V_{crit}$  en fonction de «  $d$  » et «  $h$  » du bâtiment
- **Tab. XI** : Variations de  $V_{crit}$  pour section circulaire en fonction de «  $d$  » et «  $\emptyset$  » du bâtiment
- **Tab. XII** : Evolution de  $C_f$  pour bâtiment rectangulaire en fonction de  $d/b$  et  $b/h$
- **Tab. XIII** : Evolution de  $C_f$  pour un bâtiment rectangulaire arrondi en fonction de  $d/b$  et  $b/h$
- **Tab. XIV** : Evolution de  $C_f$  pour un bâtiment circulaire de hauteur constante ( $h = 100m$ )
- **Tab. XV** : Evolution de  $C_f$  pour un bâtiment circulaire de hauteur variable
- **Tab. XVI** : tableau comparatif de  $C_{f,0}$  pour bâtiment circulaire et arrondi
- **Tab. XVII** : Evolution de  $y_{max}$  pour un bâtiment rectangulaire de hauteur variable
- **Tab. XVIII** : Evolution de  $y_{max}$  pour un bâtiment circulaire de hauteur variable
- **Tab. XIX** : Variation de  $F_w(s)$  pour  $h = \{200 ; 150\}m$  en fonction de  $d/b$
- **Tab. XX** : Variation de  $F_w(s)$  pour  $h = \{100 ; 50\} m$  en fonction de  $d/b$
- **Tab. XXI** : Variation de  $F_w(s)$  pour  $h = \{200 ; 150 ; 100 ; 50\} m$  en fonction de  $d$
- **Tab. XXII** : Variation du décrétement logarithmique en fonction de  $h$  ; et pourcentage de réduction de force
- **Tab. XXIII** : Grandeurs des modes propres pour les bâtiments étudiés
- **Tab. XXIV** : Résultat de  $q_p(z)$  pour le bâtiment optimal  $k$
- **Tab. XXV** : Variation de la fréquence en fonction des modes
- **Tab. XXVI** : Niveaux de perception humaine

- **Tab. XVII** : Valeurs de rugosité de surface équivalente  $k$
- **Tab. XXVIII** : Valeurs du décrement logarithmique d'amortissement structural du mode fondamental

## Bibliographie :

- 1) BUNGALE S. , *Wind loads, In. Wind and earthquake resistant buildings*, MICHAEL M. , Ed, Library of congress cataloging-in-publication data, U.S.A
- 2) NORME EUROPEENNE, *EN 1991-1-4*, COMITE EUROPEEN DE NORMALISATION.
- 3) NORME EUROPEENNE, *NF EN 1991-1-4*, COMITE EUROPEEN DE NORMALISATION.
- 4) PASCAL H., 2004, *Vibrations couplées avec le vent*, Ecole polytechnique, 62.
- 5) YUNUS Ç, ROBERT T., *Fluid mechanics, Ind. Fundamental of thermal-fluid sciences*, JACK H., JOHN L., McGraw-Hill Book Co., Singapore.
- 6) MEHMET G., HUSEYIN I., *Tall buildings – structural systems and aerodynamic forms*, MICHAEL M., OLMO C., British Library cataloging-in-publication Data, New York.
- 7) ORGANISATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION, *Base de calcul des constructions – Aptitude au service des bâtiments et des passerelles sous vibratons*, ISO 10137, PKN.
- 8) ORGANISATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION, *General principles on reliability for structures*, ISO 2394 :2012, PKN.
- 9) MICHAEL S., Ind. *Computational engineering – Introduction to numerical methods*, Springer Science + Business media, Germany.
- 10) OLIVIER F., 2013, *Action du vent sur les ouvrages – Effets dynamiques*, Université de Nantes, 46