

norme européenne  
norme française

NF EN 1991-1-4

NOVEMBRE 2005

Indice de classement : P 08-114-1

ICS : 91.080.01

**Eurocode 1 : Actions sur les structures**

**Partie 1-4 : Actions générales — Actions du vent**

E : Eurocode 1: Actions on structures — Part 1-4: General actions — Wind actions  
D : Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke —  
Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen — Windlasten

# Action du vent selon EC1

*Norme française homologuée*

Par décision du Directeur Général d'AFNOR le 5 octobre 2005 pour prendre effet le 5 novembre 2005.

Est destinée à remplacer la norme européenne NF EN 1991-1-4 (indice de classement : P 08-114-1) de septembre 2002. Est destinée à remplacer partiellement le DTU P08-114 (avril 2000 (Règles NV 65)).

**Correspondance**

Le présent document reproduit intégralement la norme européenne EN 1991-1-4:2005.



**Analyse**

La partie 1-4 de l'Eurocode 1 donne les bases pour l'évaluation de l'action du vent sur les structures des bâtiments et des ouvrages de génie civil. Le présent document ne comprend pas de document d'application nationale mais doit être complété par une Annexe Nationale qui définira les modalités de son application sur le territoire français.

**Descripteurs**

Thésaurus International Technique : bâtiment, règle de construction, calcul, action des intempéries, vent, modèle, résistance au vent, charge due aux rafales, pression du vent, charge dynamique, répartition géographique, élément de construction, toiture, mur, clôture, panneau de signalisation, construction en treillis, drapeau, échafaudage, pont.

**Modifications**

Par rapport aux documents destinés à être remplacés, adoption de la norme européenne.

**Corrections**



# Ferrybridge cooling towers collapse

Pontefract, England  
(1965)

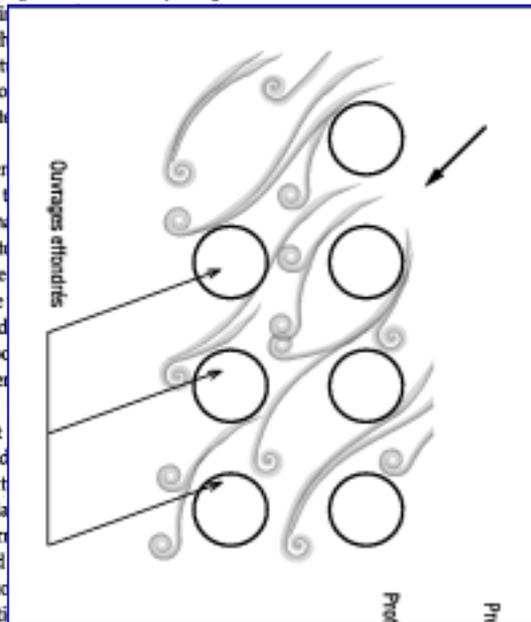
*Design that inadequately accounted for wind forces led to the collapse of three giant water cooling towers, spurring important research into wind dynamics.*

On November 1, 1965, at the Ferrybridge power station near Pontefract, England, three of the largest natural draft cooling towers in the world collapsed during a gale force wind. The cooling towers at Ferrybridge, operated by Britain's Central Electricity Generating Board, were complete but not in operation. The wind stretched the membranes of the towers beyond their structural capacity, causing the concrete to vibrate at a high-pitch and ripple into the side sections ultimately buckled into the center.

## Background

Cooling towers play a critical role in power generation. They use low-temperature water for use as a coolant within the power plant. The cooling towers at the Ferrybridge power station were "thin shell" towers, with concrete walls only 12 inches thick. The towers cool water by spraying it through cooler air into the tower. The hourglass shape of natural draft towers and the upward flow of air draws the water up through the concrete tube. The water then falls back down, and the cycle repeats. The towers at Ferrybridge were designed to handle wind forces, but they were not designed to handle the wind forces that occurred during the collapse.

The cooling towers at Ferrybridge rose 375 feet and spanned 290 feet in diameter at their bases, and were "thin shell" towers, with concrete walls only 12 inches thick. In contrast, the shell of an egg as large as the towers would be 25 inches thick. The eight towers at Ferrybridge were arranged in two rows of four, staggered into a checkerboard pattern. The towers were designed to be closer together than towers in previous designs to provide mutual support, a localized area of superior foundation.



Britain's Central Electricity Generating Board, an acknowledged leader in thin shell concrete cooling towers, did not venture into innovative design or

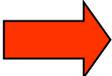
# PLAN

- Evolution de la norme de calcul aux vent
- Principes et champs d'application de la norme NF-1991-1-4
- Définitions et comparaison avec la norme NV65-2000
- Fiche de calcul au vent selon EC1
- Exemples de calcul
  - Exercices de calcul

# PLAN

- **Evolution de la norme de calcul aux vent**
- Principes et champs d'application de la norme NF-1991-1-4
- Définitions et comparaison avec la norme NV65-2000
- Fiche de calcul au vent selon EC1
- Exemples de calcul
  - Exercices de calcul

# Avant les Eurocodes ...



## **Jusqu'à 1944 :**

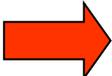
Les mêmes règles pour tout type de bâtiment, pression

Hormis le règlement du Ministère de l'Air, ils n'envisageaient pas l'existence des dépressions.



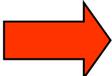
A la demande du Ministère de la Reconstruction, une Commission fut créée pour établir un règlement tenant compte des données scientifiques et statistiques

Peu de données pour les bâtiments ....



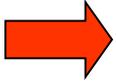
## **Règles NV 46**

*mettre rapidement entre les mains des constructeurs un document leur permettant de faire face, sans gaspillage de matériaux et avec sécurité, à la tâche de la reconstruction*



On établit le principe de révision régulière de la norme

# Avant les Eurocodes ...



Règles NV65 : pourquoi

(1/2)

## 1 Faciliter l'utilisation des règles

*une guide + 5 articles, chacun pour un type de construction*

## 2 Etendre le champ d'utilisation des règles

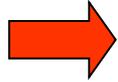
coefficients aérodynamiques pour un plus grand nombre de cas  
résultats d'essais exécutés à l'étranger et en France

## 3 Tenir compte de l'évolution des types et modes de constructions

immeubles ou structures de grande hauteur, beaucoup en  
préfabriqués,  
matériaux légers pour les toitures et les revêtements de façades.

- ***faible coefficient d'amortissement, très sensibles aux rafales et aux tourbillons de Bénard-Karman***

# Avant les Eurocodes ...



**Règles NV65 : pourquoi**

**(2/2)**

## **4 Tenir compte de l'évolution des méthodes de calcul et de détermination de la sécurité**

état de service et de « mise hors service »

## **5 Tenir compte de l'évolution des idées sur la détermination de la vitesse de calcul du vent**

gradient du vent ou vitesse du vent ? Quelle hauteur ?

Incertitudes sur ::

- correspondance des enregistrements sur une durée donnée antérieure et de ceux de la durée future de la construction,
- durée et dimensions des rafales,
- variation de leurs vitesses en fonction de la hauteur,
- conditions de la topographie locale,
- transposition de résultats d'essais sur maquettes au tunnel aérodynamique à des structures placées dans un vent naturel et soumises à tous les effets de l'environnement (interaction - sillage - Venturi).

# Eurocodes

## **Une évolution « normale » de la norme NV65**

plusieurs évolutions dans le temps, ex. version 2000, ...

## **Un contexte de mondialisation et de construction de l'EU**

- pouvoir exporter le savoir et le savoir-faire
- mettre sur une même base les différentes techniques de dimensionnement
- préserver les spécificités et les expériences nationales

### **Textes normatifs**

Les principes  
Les procédures  
Combinaisons

### **Annexes nationales**

Valeurs des coefficients  
Choix des méthodes alternatives



# PLAN

- Evolution de la norme de calcul aux vent
- **Principes et champs d'application de la norme NF-1991-1-4**
- Définitions et comparaison avec la norme NV65-2000
- Fiche de calcul au vent selon EC1
- Exemples de calcul
  - Exercices de calcul

# CONTENU, CHAMP D'APPLICATION

**Actions suivantes du vent sur les constructions sont considérées par la norme:**

- a) les pressions aérodynamiques exercées par le vent à la surface, extérieure et intérieure des constructions ; ces pressions sont normales aux parois
- b) les forces de frottement tangentielles sur les surfaces de très grandes dimensions balayées par le vent ;
- c) les actions d'ensemble (forces, moments) exercées par le vent turbulent sur les structures et leurs éléments. Deux approches sont proposées :
  - la plus simple (la plupart des constructions) ;
  - détaillée constructions élancées et de grandes dimensions, à grandes périodes propres et dont, par conséquent, les modes propres peuvent être excités significativement par la turbulence.

Il s'agit d'actions fonctions croissantes de la vitesse du vent. Elles sont calculées pour une **vitesse de référence**, définie sur une base probabiliste

### 3.2 Représentations des actions du vent

(1) L'action du vent est représentée par un ensemble simplifié de pressions ou de forces dont les effets sont équivalents aux effets extrêmes du vent turbulent.

actions du vent → actions fixes variables

### 3.4 Valeurs caractéristiques

(1) Les actions du vent calculées selon l'EN 1991-1-4 sont des valeurs caractéristiques Elles sont déterminées à partir des valeurs de référence de la vitesse ou de la pression dynamique. Conformément à l'EN 1990 4.1.2 (7)P, ***les valeurs de référence sont des valeurs caractéristiques dont la probabilité de dépassement sur une période d'un an, est égale à 0,02, ce qui équivaut à une période moyenne de retour de 50 ans.***

**Cette vitesse caractérise en quelque sorte la tempête la plus « sévère » que l'on accepte de considérer dans le dimensionnement des ouvrages.**

# CONTENU, CHAMP D'APPLICATION

Deux autres types d'action, qui peuvent affecter dangereusement les constructions élancées, à des vitesses de vent inférieures à la vitesse de référence

**d)** de l'excitation d'un mode propre, à la résonance, par le sillage tourbillonnaire de la construction considérée (phénomène appelé aussi des « tourbillons alternés » ou des « tourbillons de Bénard-Karman »)

**e)** des instabilités aéroélastiques du type « galop », liées à l'existence de forces aéroélastiques induites par le déplacement de la construction et à l'interaction de ce déplacement avec le vent

Action assimilable à un amortissement aérodynamique, négatif dans certains cas et par conséquent capable de réduire, voire d'annuler l'amortissement total (somme des amortissements structurel et aérodynamique).

**Sont concernés** : les **constructions** à la fois suffisamment **souples** pour que leurs déplacements soient significatifs, **peu amorties** et **relativement légères**.

# CONTENU, CHAMP D'APPLICATION

## Constructions concernées par le code

- bâtiments et leurs éléments.
- cheminées et autres constructions encastrées  
(mais il devra être complété en ce qui concerne les tours en treillis et l'application aux mâts haubannés).
- ponts routiers ou de chemin de fer jusqu'à 200 m de portée et aux passerelles pour piétons ou cyclistes jusqu'à 30 m de portée  
(des exigences particulières sont ajoutées)

## Le code n'est pas applicable

- Aux structures offshore
- Aux ponts suspendus ou à haubans

# PRINCIPES

L'action du vent est représentée par un ensemble de pressions ou de forces statiques dont les effets sur la construction étudiée sont équivalents aux effets extrêmes du vent.

1 - **Vitesse de vent de référence, définie sur une base probabiliste par une carte météorologique**

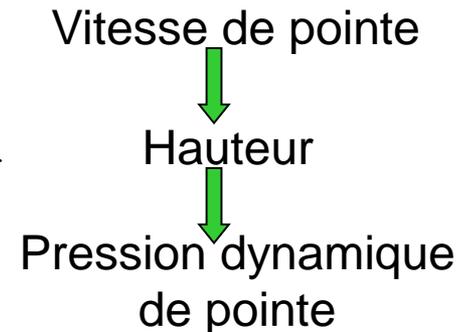
2 - Coefficient d'exposition, fonction du site (topographie, rugosité) et de la hauteur au-dessus du sol.

3 - Choix d'une procédure, simple ou détaillée, pour le calcul des effets dynamiques du vent

4 - Coefficients **de pression** ou **de force**, pour différents types de constructions

- bâtiments à base rectangulaire (murs verticaux, toitures plates ou à 1, 2 ou 4 versants, toitures multiples, toitures en voûte)
- toitures isolées,
- panneaux, murs isolés, pleins ou poreux,

- Élément structural
- Drapeaux
- Treillis
- Ponts,



# PLAN

- **Evolution de la norme de calcul aux vent**
- Principes et champs d'application de la norme NF-1991-1-4
- **Définitions et comparaison avec la norme NV65-2000**
- Fiche de calcul au vent selon EC1
- Exemples de calcul
  - Exercices de calcul

# Définitions et comparaisons avec NV65

Les **pressions aérodynamiques**  $w$  sur les surfaces (e)xternes et (i)nternes

$$w_e = q_{ref} \cdot C_e(z_e) \cdot C_{pe}$$

$$w_i = q_{ref} \cdot C_e(z_i) \cdot C_{pi}$$

$q_{ref}$  **pression dynamique moyenne de référence**

$C_e(z_e), C_e(z_i)$  coefficient « d'exposition », fonction des caractéristiques du site de construction (rugosité, topographie) et de la hauteur au-dessus du sol

$C_{pe}, C_{pi}$  coefficient de pression extérieure ou intérieure.

La pression « nette » sur une paroi est la différence des pressions sur chacune des surfaces avec la convention de signe habituelle (pression positive lorsqu'elle est dirigée vers la surface et pression négative (dépression ou succion) dans l'autre cas).

## $q_{ref}$ pression dynamique moyenne de référence - définition

$$q_{ref} = \frac{1}{2} \rho V_{ref}^2$$

$\rho$  la masse volumique de l'air (1,25 kg/m<sup>3</sup>),  
 $V_{ref}$  est la vitesse de référence du vent.

Vitesse de référence = vitesse moyenne (sur 10 minutes), supposée mesurée à 10 m de hauteur, en site plat et peu rugueux (catégorie II). **Les valeurs de référence sont des valeurs caractéristiques dont la probabilité de dépassement sur une période d'un an, est égale à 0,02, ce qui équivaut à une période moyenne de retour de 50 ans**

*Ex : la tempête qui a traversé la Bretagne et la Normandie en octobre 1987 correspondait sensiblement à cette fréquence d'occurrence.*

Étude des vents sur la période 1949-1992, dans 80 stations météorologiques.

Les actions du vent calculées sur la base de cette vitesse de référence, **sont des actions « caractéristiques »**, elles seront pondérées par un coefficient  $\gamma$  supérieur à l'unité (par exemple : 1,5) dans les vérifications à l'état-limite ultime.

# Vitesse de référence $V_{ref}$ - définition

$$V_b = C_{DIR} \cdot C_{TEM} \cdot C_{ALT} \cdot V_{b,0}$$

$C_{DIR}$  coefficient de direction du vent.

Les vents très forts ne sont pas également probables dans toutes les directions. En Grande-Bretagne, le coefficient  $C_{DIR}$  est pris égal à 0,76 pour les vents de secteur Est et 1,05 pour les vents de Sud-Ouest. En France  $C_{DIR} = 1$  dans

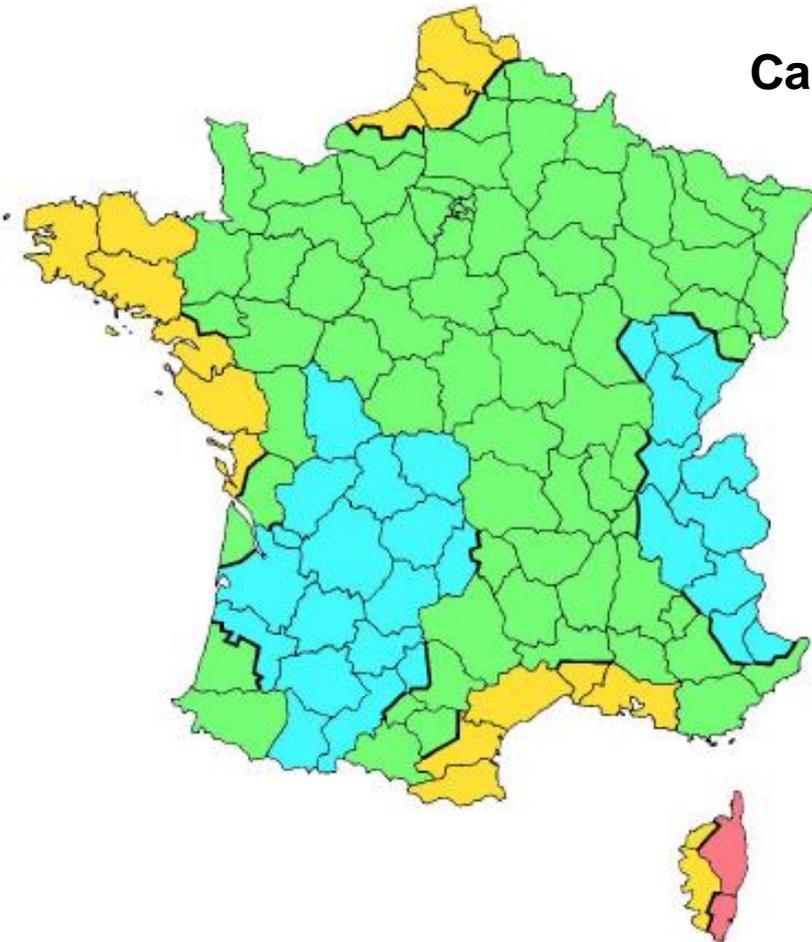
$C_{TEM}$  permet une réduction de la vitesse de référence pour les constructions « temporaires » ou celles dont les conditions d'exposition au vent sont temporaires. En France  $C_{TEM} = 0,9$

$C_{ALT}$  En France  $C_{ALT} = 1$

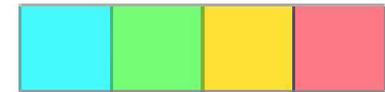
En comparaison avec NV 65 :

- Pression dynamique « normale » (NV65) > Pression de référence (EC1)
- (EC1) Il ne s'agit pas des valeurs maximales de vitesses
- NV65 → actions « nominales » ( x 1.65)
- EC1 → action dynamique de référence (x 2.35)

## Carte des vents de France



-Précisions au niveau cantonal  
(Voir fichier Excel dans le site du cours)

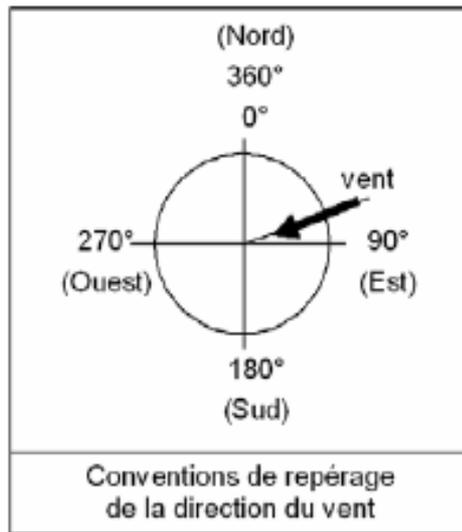
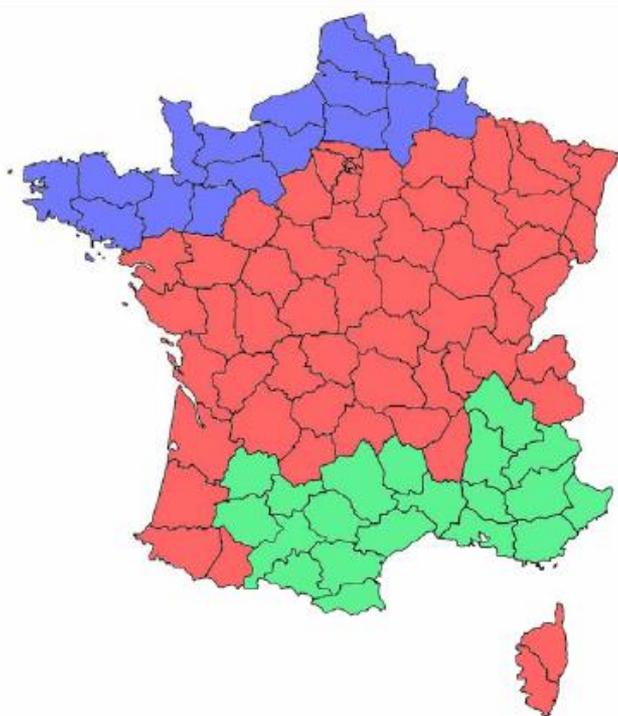


Régions :	1	2	3	4
Valeur de base de la vitesse de référence du vent $v_{b,0}$ [m/s]	22	24	26	28

Tableau 4.2(NA) – Valeur de base de la vitesse de référence

Régions :	France métropolitaine				Départements d'Outre-Mer	
	1	2	3	4	Guyane	Guadeloupe Martinique Réunion (Mayotte)
Vitesse de référence $v_{b,0}$ [m/s]	22	24	26	28	17	34

## Coefficient de direction



$c_{dir} = 1$ sauf dans les cas suivants		
Zone	Secteur angulaire nominal inclus dans l'intervalle :	$c_{dir}$
1 	[ 10° - 150° ]	0,70
2 	[ 70° - 150° ]	0,70
3 	[ 50° - 250° ]	0,85



## Coefficient de saison



avril à septembre : 0,8    0,9  
 octobre à mars : 1,0    1,0

# Vitesse moyenne du vent

La vitesse moyenne du vent 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

$$v_m(z) = c_r(z) \times c_o(z) \times v_b$$

Tous les termes définis !

$$V_b = C_{DIR} \cdot C_{TEM} \cdot C_{ALT} \cdot V_{b,O}$$

Coefficient de rugosité  
(d'environnement)

Coefficient d'orographie

# Coefficient de rugosité (d'environnement)

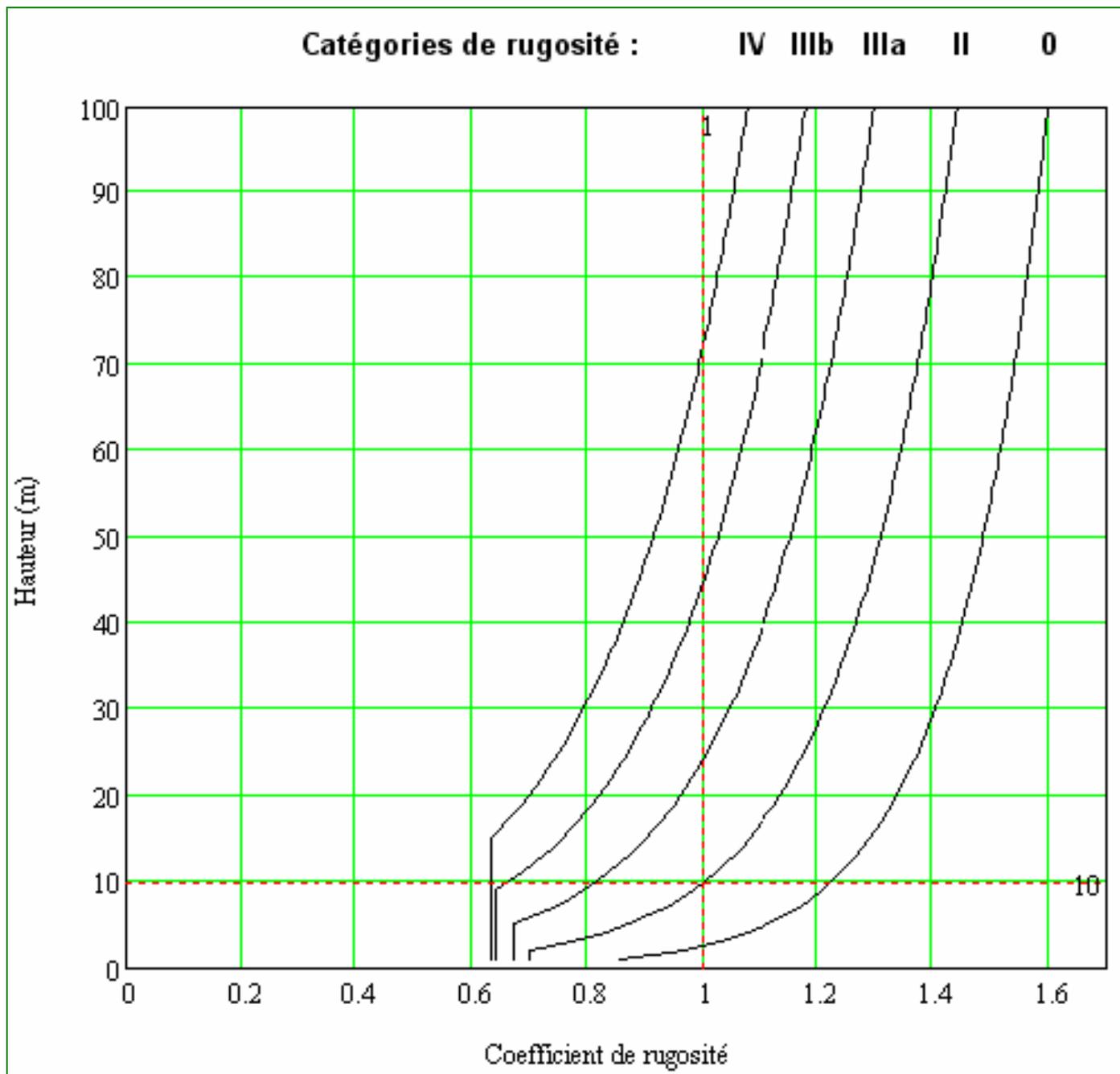
$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{pour} \quad z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$$

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

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} \quad z_{\max} = 200m$$

**Tableau 4.1(NA) — Catégories et paramètres de terrain**

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 (haies, arbres, bâtiments, etc.) séparés les uns des autres de plus d'au moins 20 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 recouvertes de bâtiments dont la hauteur moyenne est supérieure à 15 m ; forêts	1,0	15





**Figure 4.6(NA) — Rugosité 0 (mer) et IV (ville)**



**Figure 4.7(NA) — Rugosité II (rase campagne, aéroport)**



**Figure 4.8(NA) — Rugosité II (rase campagne)**



**Figure 4.9(NA) — Rugosité IIIa (campagne avec des haies, bocage...)**



**Figure 4.10(NA) — Rugosité IIIb (bocage dense)**



**Figure 4.11(NA) — Rugosité IIIb (zone industrielle)**



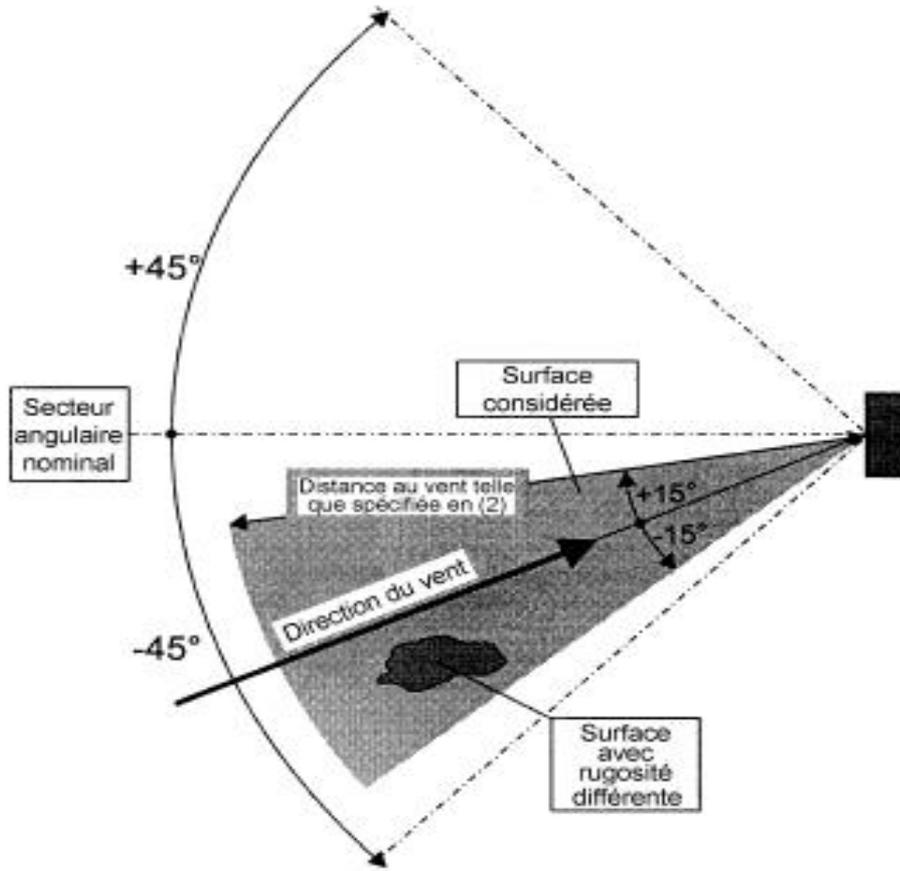
**Figure 4.12(NA) — Rugosité IV (ville)**



**Rugosité IV (ville)**



**Figure 4.14(NA) — Rugosité IV (forêt)**



Principe de délimitation de la zone à prendre en compte dans le calcul du coefficient de rugosité

-La distance au vent, ou rayon  $R$  dépend de la hauteur  $h$  de la construction :

$$R = 23 \cdot h^{1,2} \text{ avec } R > 300 \text{ m}$$

Lorsqu'il existe au moins deux catégories de terrain dans le secteur angulaire considéré, il convient de retenir la catégorie correspondant à la plus faible longueur de rugosité

# Coefficient d'orographie

$$v_m(z) = c_r(z) \times c_0(z) \times v_b$$

Procédure 1 : lorsque l'orographie est constituée d'obstacles de hauteurs et de formes variées( le cas le plus fréquemment rencontré)

Procédure 2 : lorsque l'orographie constituée d'obstacles bien individualisés et importants (ex. une colline isolée, une falaise)

# Procédure 1

(a) L'altitude moyenne locale du terrain environnant la construction,  $A_m$ , est définie par :

$$A_m = \frac{2 \cdot A_C + A_{N1} + A_{N2} + A_{E1} + A_{E2} + A_{S1} + A_{S2} + A_{O1} + A_{O2}}{10}$$

-  $A_C$  est l'altitude du lieu de construction ;

$A_{N1}, A_{E1}, A_{S1}, A_{O1}$  l'altitude aux points situés, dans les quatre directions cardinales (nord, est, sud, ouest) à une distance de 500 m du lieu de construction ;

$A_{N2}, A_{E2}, A_{S2}, A_{O2}$  l'altitude aux points situés, dans les quatre directions cardinales à une distance de 1 000 m du lieu de construction.

(b) L'altitude relative du lieu de construction  $\Delta A_C$  :  $\Delta A_C = A_C - A_m$

(c) Le coefficient d'orographie  $c_o$  en terrain complexe est défini par :

$$c_o(z) = 1 + 0,004 \cdot \Delta A_C \cdot \exp[-0,014 (z - 10)] \quad \text{pour } z \geq 10 \text{ m}$$

$$c_o(z) = c_o(10) \quad \text{pour } z < 10 \text{ m}$$

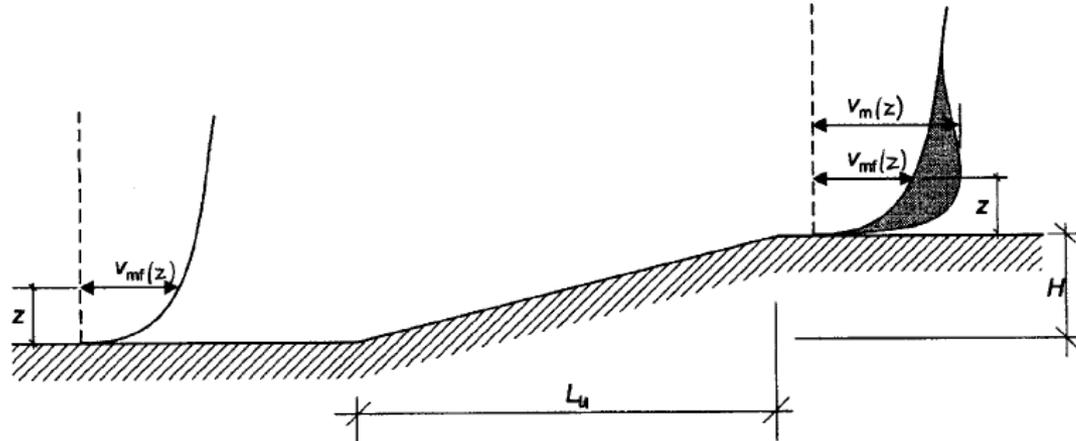
## Limitations :

1) Dans les cas où le calcul conduit à  $c_o < 1,0$  , on retiendra  $c_o = 1,0$

2) Dans les cas où le calcul conduit à  $c_o > 1,15$  , il convient de déterminer le coefficient d'orographie au moyen d'une étude spécifique par modélisation ou maquette.

# Procédure 2

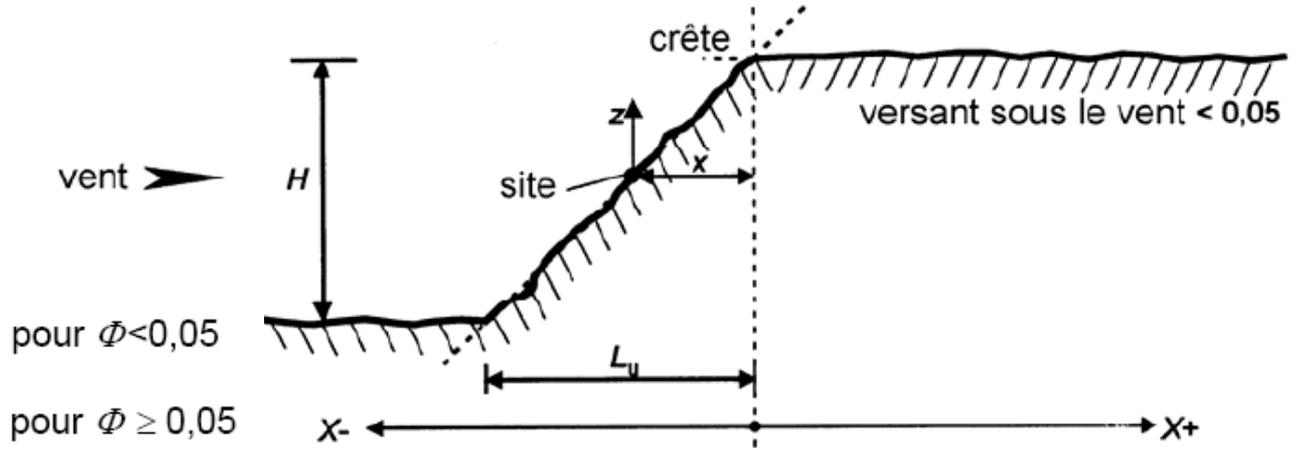
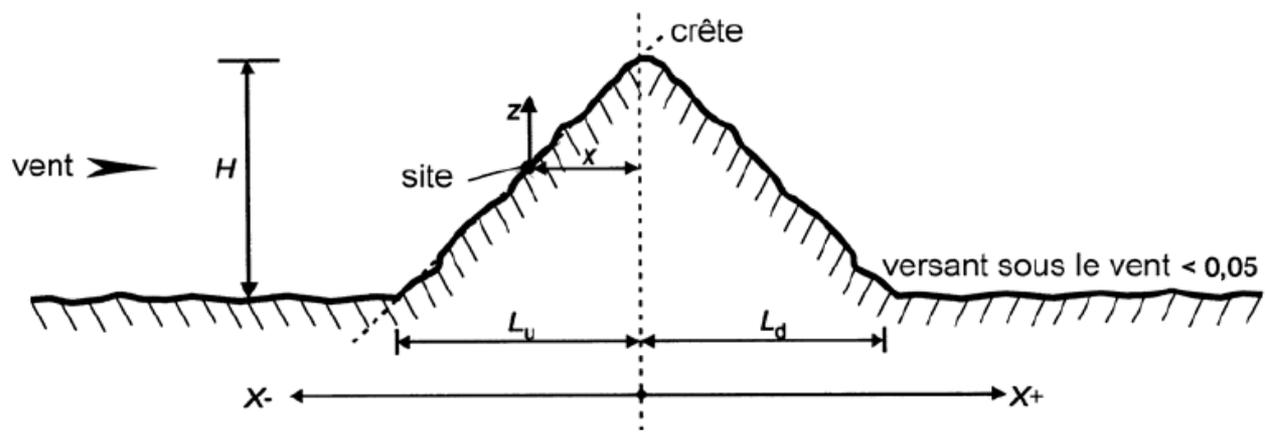
- (a) Sur les collines isolées ou en chaîne, ou les falaises et les escarpements, la vitesse du vent varie en fonction de la pente du versant amont, dans la direction du vent,  $\Phi = H/L_u$ . La longueur  $L_u$  est mesurée dans le plan vertical contenant la direction du vent.



$c_o = v_m(z)/v_{mf}(z)$  avec  $v_m(z)$  : vitesse moyenne du vent à la hauteur  $z$  au-dessus du terrain, et  $v_{mf}(z)$  : vitesse moyenne du vent à la hauteur  $z$  au-dessus d'un terrain plat

L'augmentation la plus importante des vitesses du vent se produit à proximité du sommet du versant. Au voisinage du sommet, à une distance du sommet  $X < k_{red}L$ , il est défini comme suit

$c_o = 1$	pour $\Phi < 0,05$	$L = L_u/2$	pour $\Phi < 0,25$
$c_o = 1 + S_{max} \left( 1 - \frac{ X }{k_{red}L} \right) \cdot e^{-\alpha z/L}$	pour $\Phi \geq 0,05$	$L = 2H$	pour $\Phi > 0,25$



$$c_o = 1$$

$$c_o = 1 + S_{\max} \left( 1 - \frac{|X|}{k_{\text{red}} L} \right) \cdot e^{-\alpha z/L}$$

pour  $\Phi < 0,05$

pour  $\Phi \geq 0,05$

Forme de l'obstacle	$S_{\max}$	$\alpha$	$k_{\text{red}}$	
			$X < 0$	$X > 0$
Collines en chaîne	$2,2 H/L$	3	1,5	1,5
Falaises et escarpements	$1,3 H/L$	2,5	1,5	4
Collines isolées	$1,6 H/L$	4	1,5	1,5

## Orographie due aux bâtiments de grandes hauteurs

Si hauteur  $H$  supérieure à 30 m, excédant sensiblement celles des autres constructions qui l'entourent → susceptible d'aggraver les effets du vent sur celles-ci.

Considérer cette aggravation pour les constructions avoisinantes de hauteur inférieure à  $H/2$  et situées à une distance  $x < 2r$   $r = \min \{H, 2L\}$

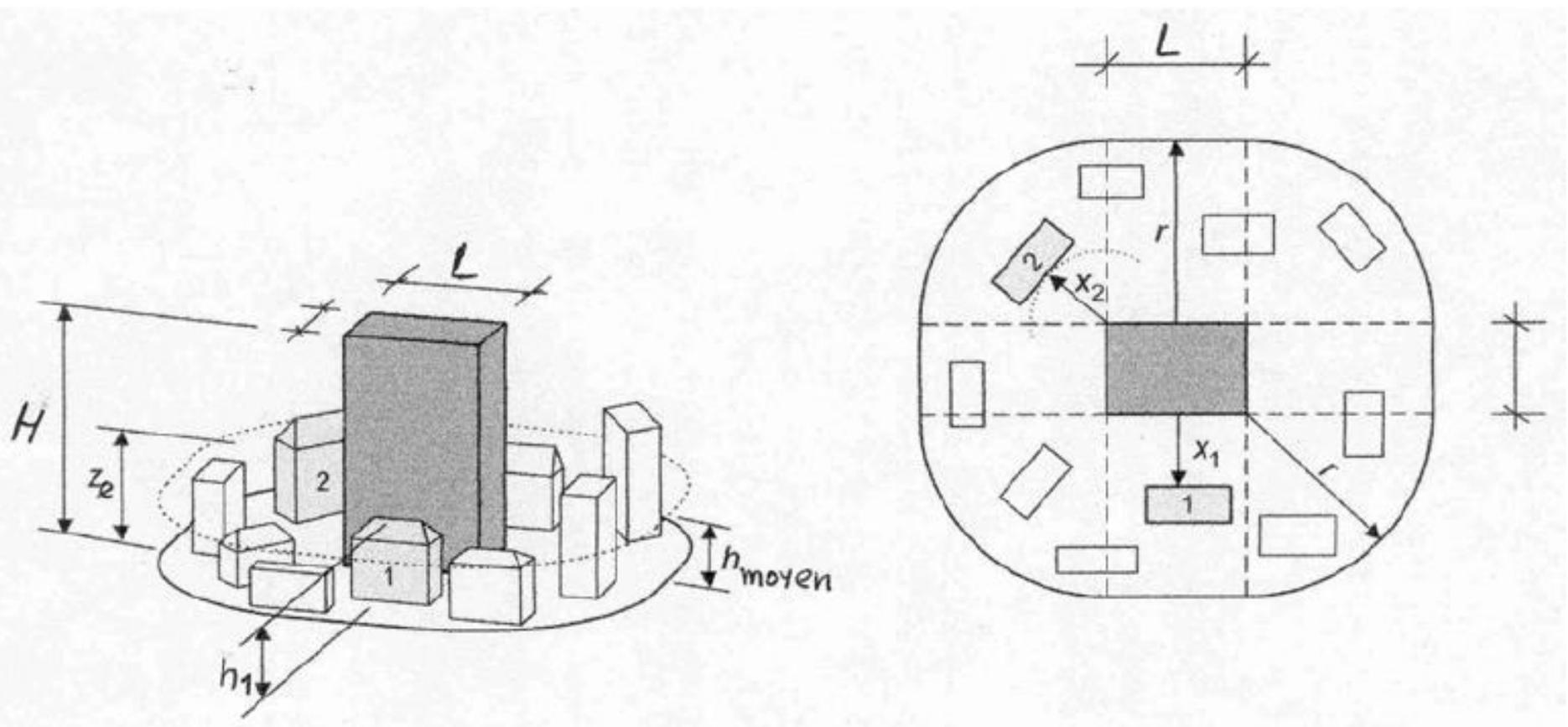
Un bâtiment est considéré comme dominant lorsque sa hauteur  $H$  est supérieure à deux fois la hauteur moyenne des autres constructions situées à une distance inférieure à la valeur  $r$ .

**Pour une construction de hauteur inférieure à  $H/2$  et située à une distance  $x$  du bâtiment dominant inférieure à  $r$ , on prend pour le hauteur de référence, la valeur  $z_e = r/2$**

**Pour une construction de hauteur inférieure à  $H/2$  et située à une distance  $r < x < 2r$  du bâtiment dominant comprise l'hauteur de référence sera, la valeur obtenue par interpolation linéaire entre la valeur  $r/2$  précédemment prescrite et la hauteur  $h$  de la construction**

$$z_e = \frac{1}{2} \left[ r - \left( 1 - \frac{2h}{r} \right) \cdot (x - r) \right]$$

# Orographie des hauts bâtiments



# Turbulence du vent

La composante turbulente de la vitesse du vent a une valeur moyenne nulle et un écart type  $\sigma_v$ .

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

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

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

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

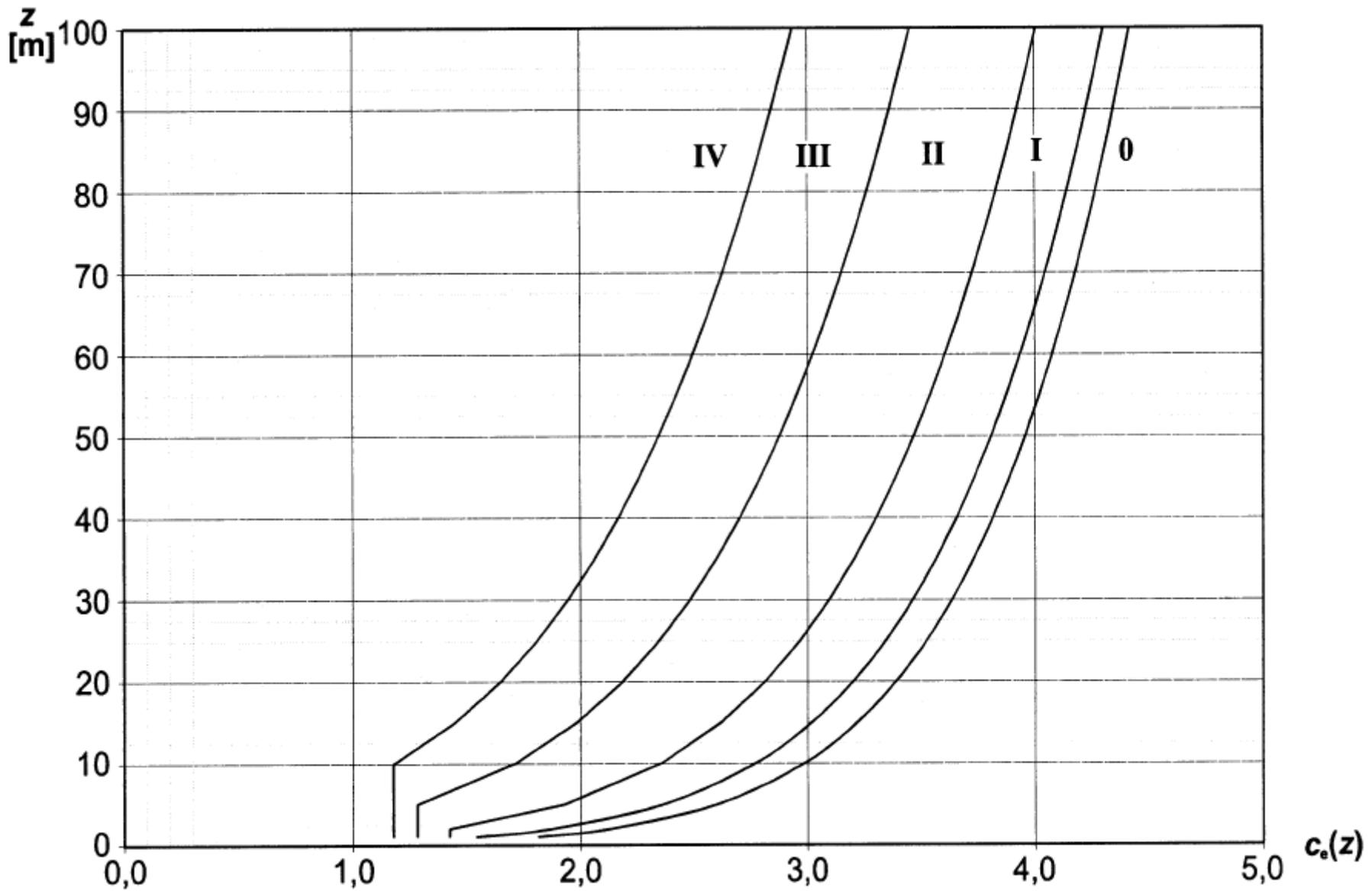
$k_l$  = le coefficient de turbulence. La valeur recommandée  $k_l = 1,0$   
 $c_o$  est le coefficient orographique  $z_0$  est la longueur de rugosité (tableau 4.1)

## Pression de référence et pression dynamique de pointe

pression dynamique de référence  $q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_b^2$

pression dynamique de pointe

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

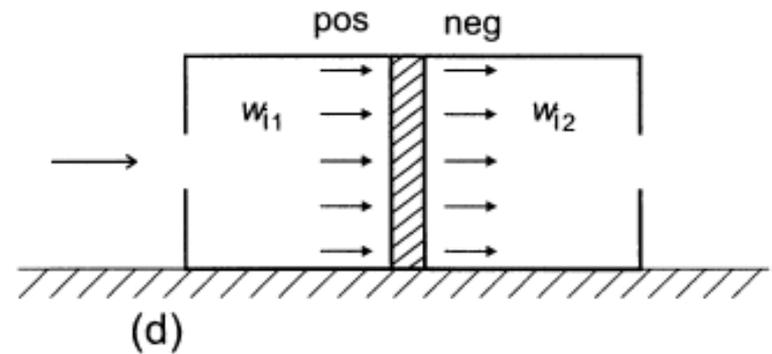
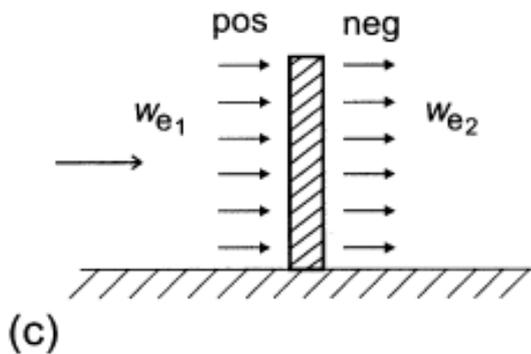
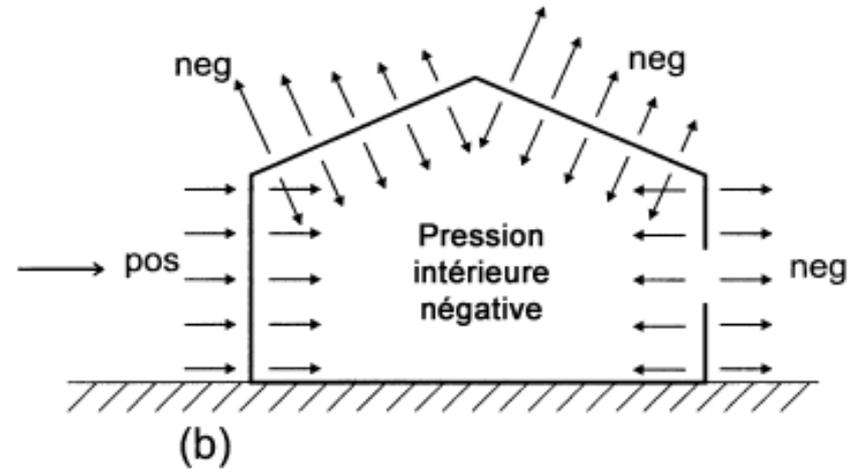
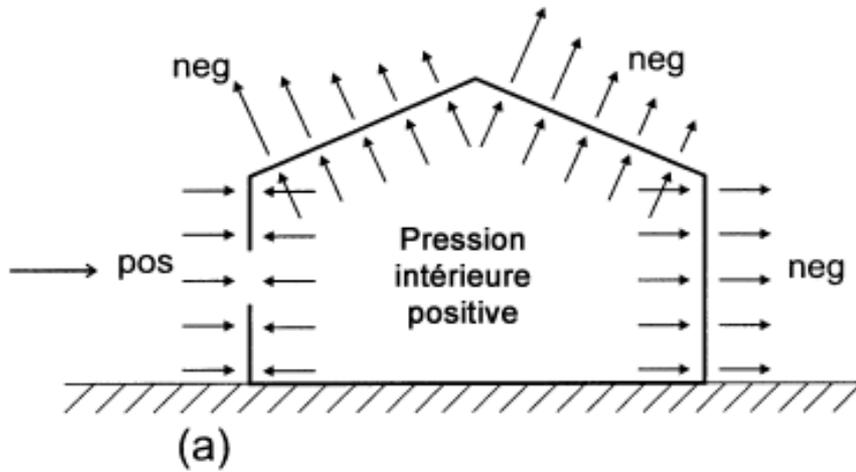


# Pressions exercées par le vent

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

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

Coefficients de pression et hauteur d'application



# Forces exercées par le vent

La force exercée par le vent  $F_w$  agissant sur une construction ou un élément de construction peut être déterminée directement par: 1)  $F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$

ou par sommation vectorielle 2)  $F_w = c_s c_d \cdot \sum_{\text{éléments}} c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$

$c_s c_d$  le coefficient structural;

$c_f$  le coefficient de force applicable à la construction ou à l'élément de construction

$A_{ref}$  l'aire de référence de la construction ou de l'élément de construction,

3) On peut également faire la somme vectorielle des forces externe et internes

forces extérieures :

$$F_{w,e} = c_s c_d \cdot \sum_{\text{surfaces}} w_e \cdot A_{ref}$$

forces intérieures :

$$F_{w,i} = \sum_{\text{surfaces}} w_i \cdot A_{ref}$$

forces de frottement :

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

# Choix du coefficient aérodynamique

## coefficients de pression pour :

- les bâtiments, tant les pressions intérieures que les pressions extérieures ;
- les cylindres à base circulaire

## coefficients de pression nette pour :

- les toitures isolées,
- les murs isolés, les acrotères et les clôtures

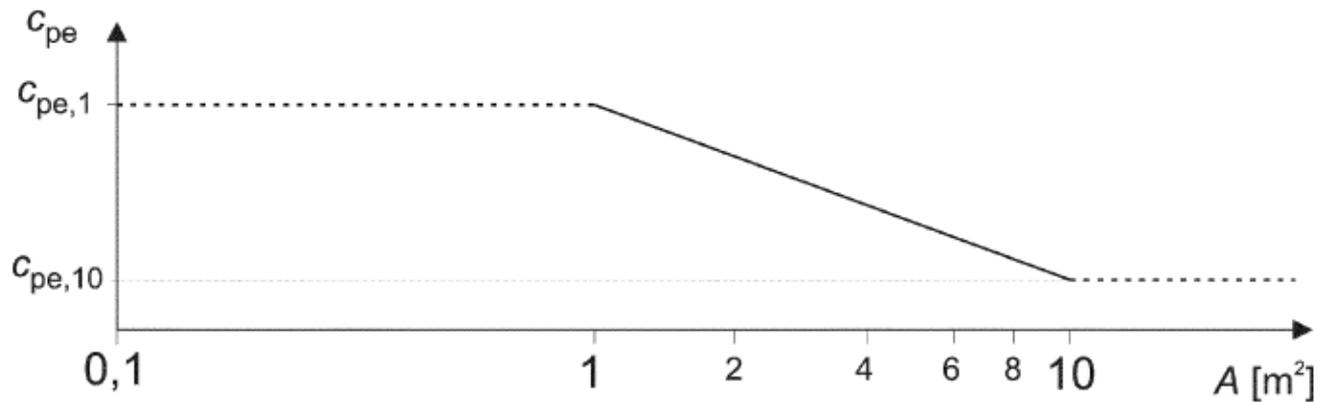
## les coefficients de force pour :

- les panneaux de signalisation
- les éléments structuraux de section transversale rectangulaire
- les éléments structuraux de section à arêtes vives
- les éléments structuraux de section polygonale régulière
- les cylindres à base circulaire;
- les sphères;
- les structures en treillis et les échafaudages
- les drapeau.

# Coefficients de pression

Deux types de coefficients dépendant 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 m<sup>2</sup> et 10 m<sup>2</sup> 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.

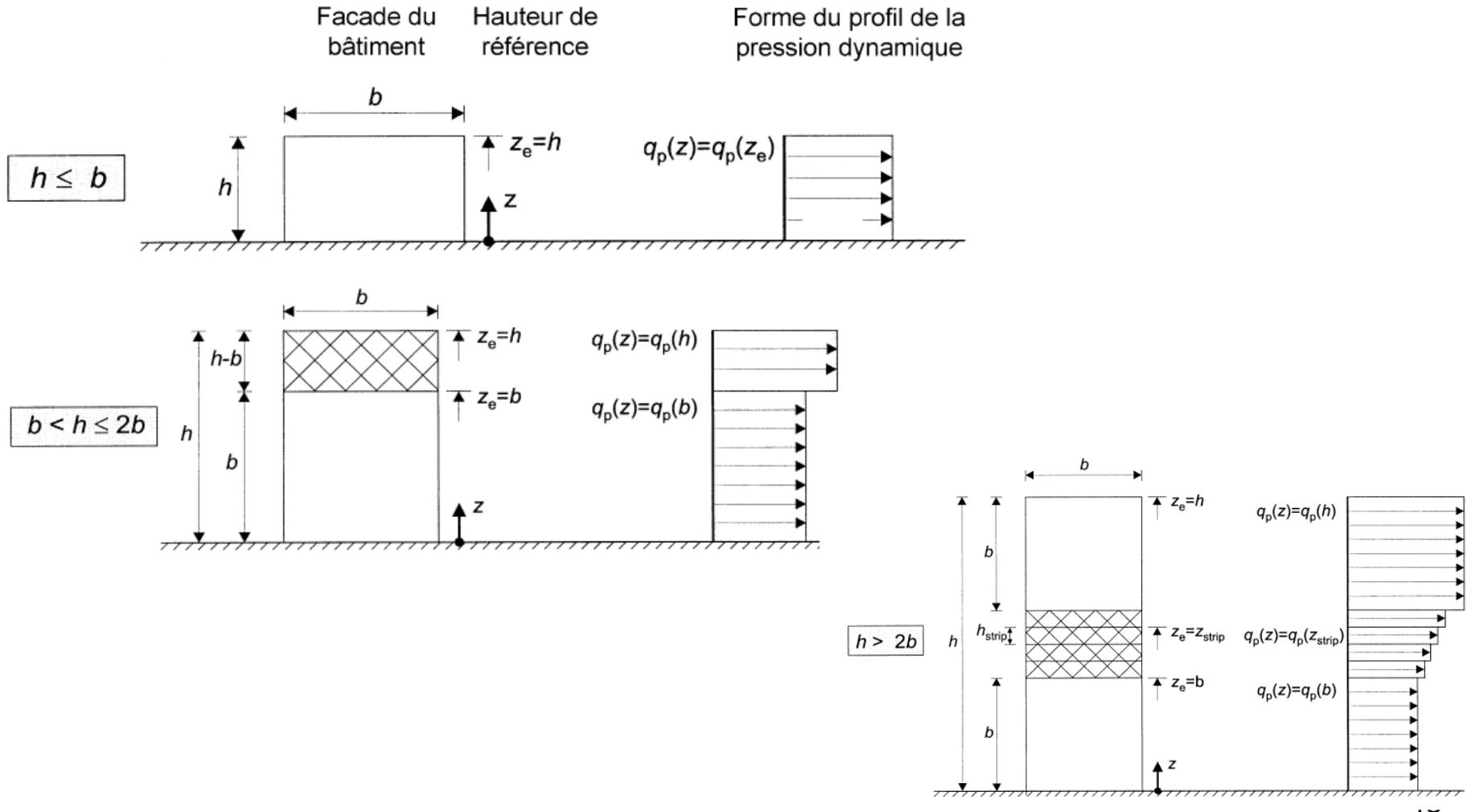
Pour les surfaces intermédiaires interpolation logarithmique



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

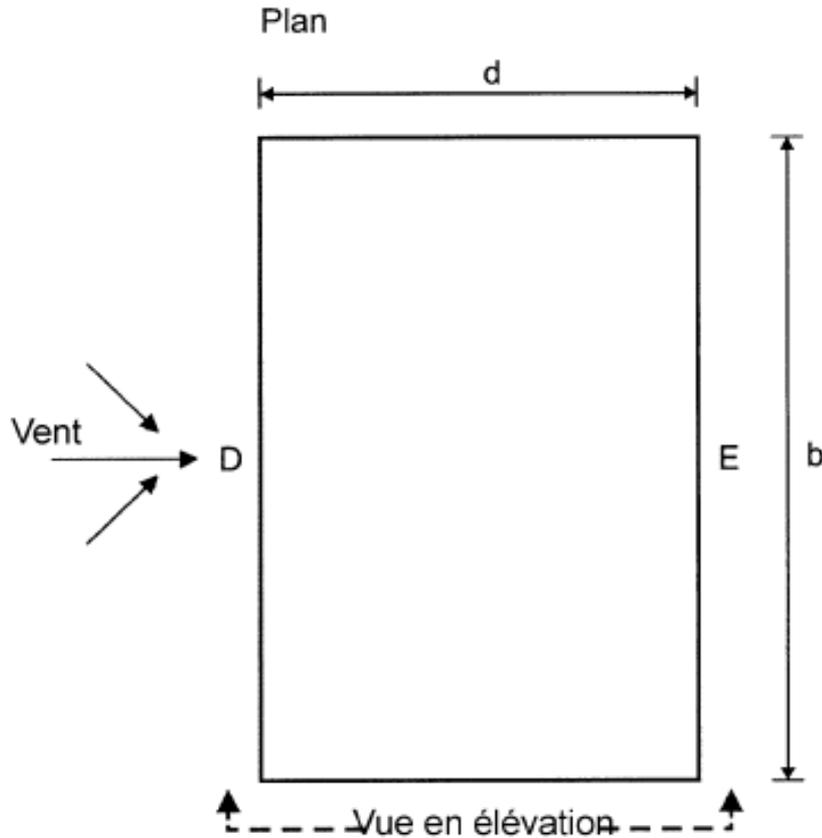
# Coefficients de pression

## Murs verticaux des bâtiments à plan rectangulaire



# Coefficients de pression

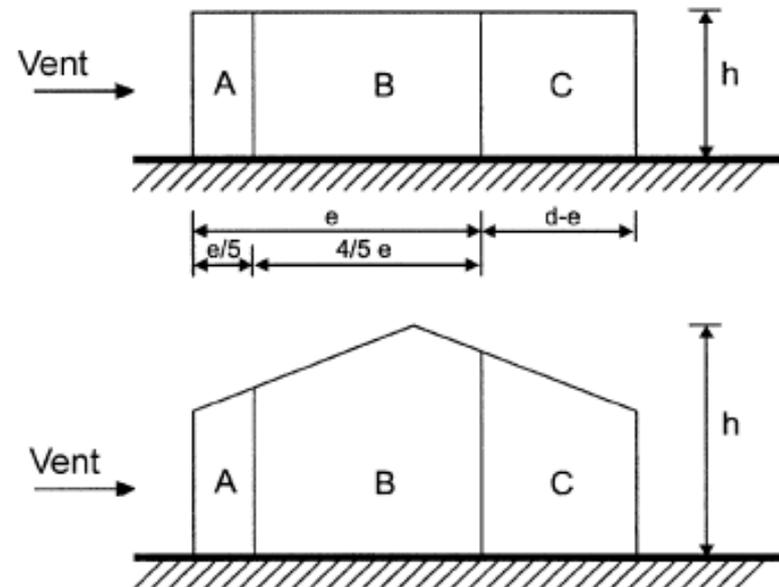
## Murs verticaux des bâtiments à plan rectangulaire



$e$  = la plus petite des deux dimensions suivantes :  $b$  ou  $2h$

$b$  : dimension du côté perpendiculaire au vent

Vue en élévation pour  $e < d$



# Coefficients de pression

## Murs verticaux des bâtiments à plan rectangulaire

Vue en élévation pour  $e \geq d$

Vue en élévation pour  $e \geq 5d$

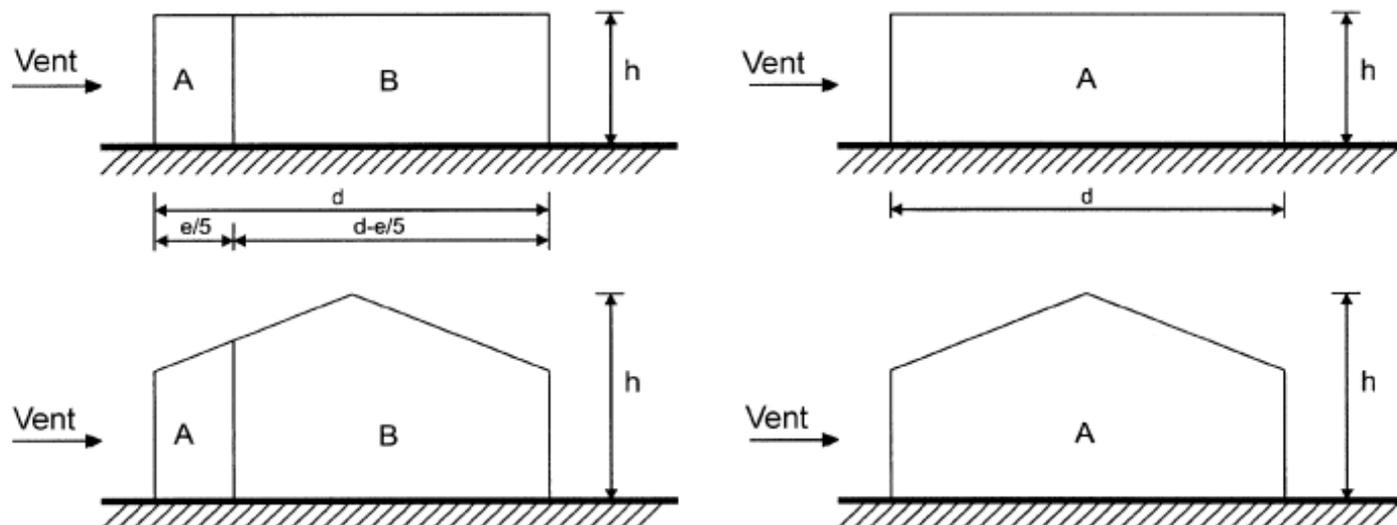
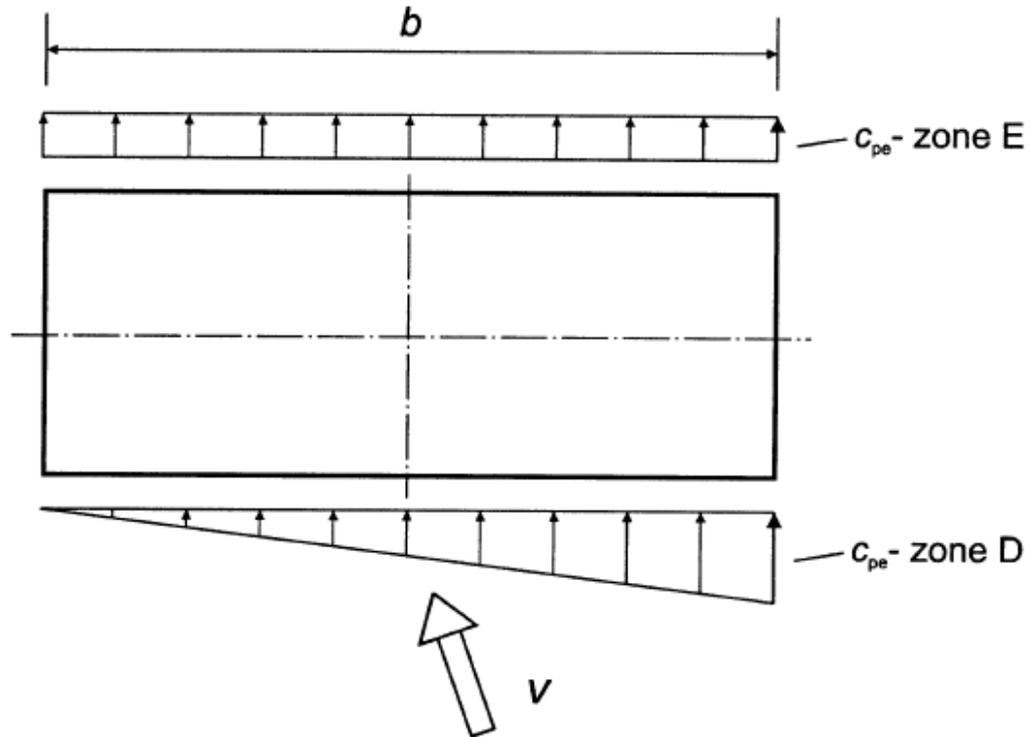


Figure 7.5 — Légende relative aux murs verticaux

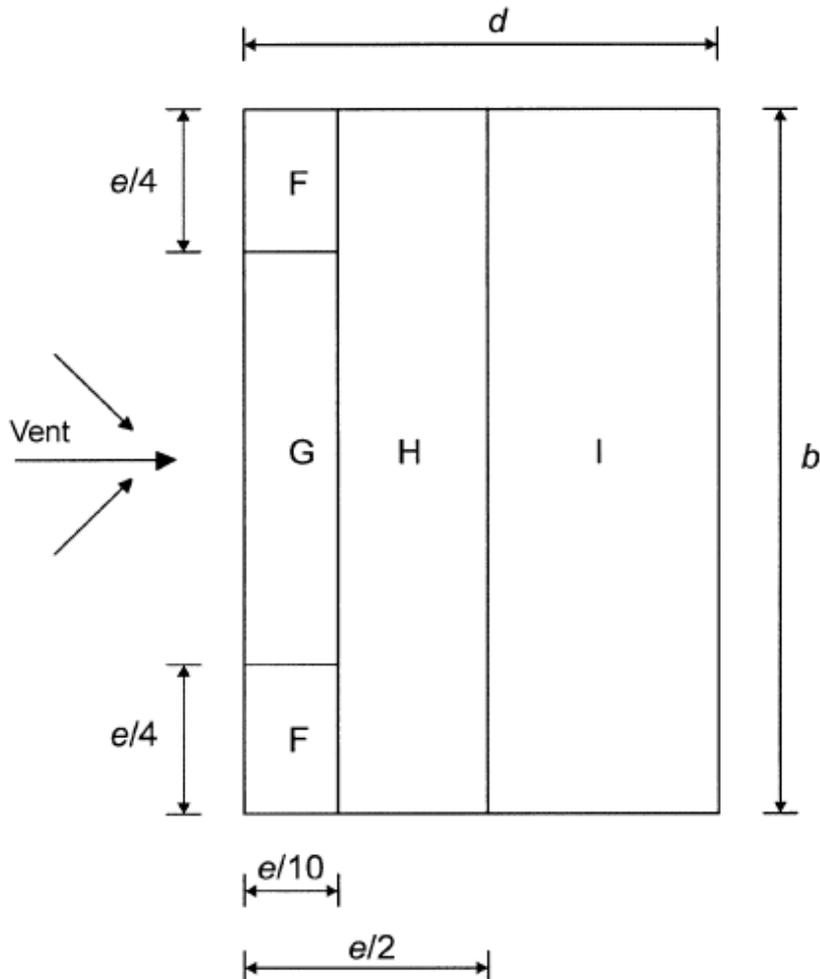
Zone	A		B		C		D		E	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$								
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,7	
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,5	
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0	-0,3	

# Pour les constructions sensibles à la torsion



# Coefficients de pression

## Toitures-terrasse

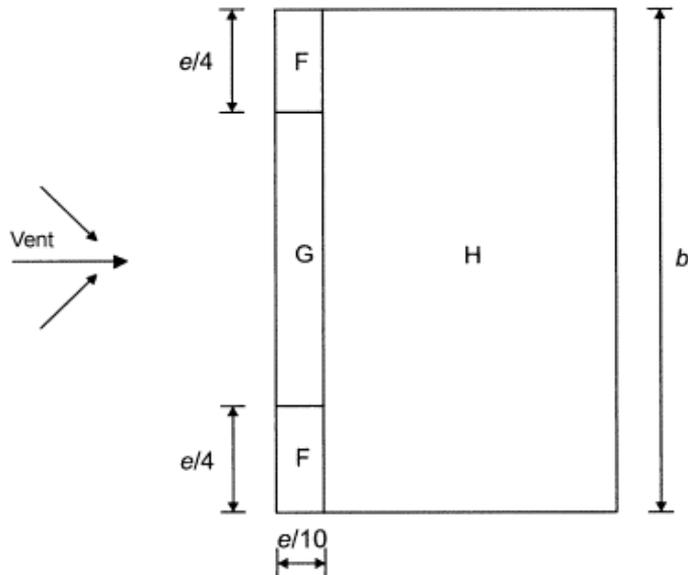
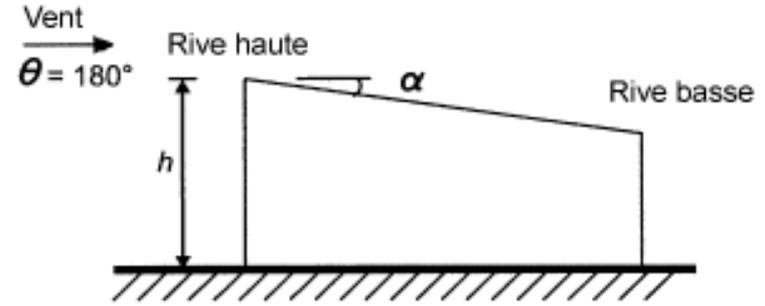
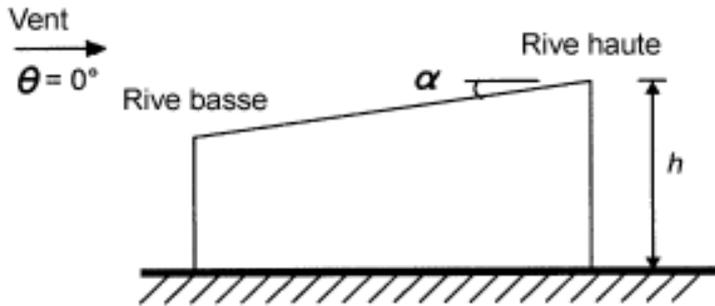


$e$  = la plus petite des deux dimensions suivantes :  $b$  ou  $2h$

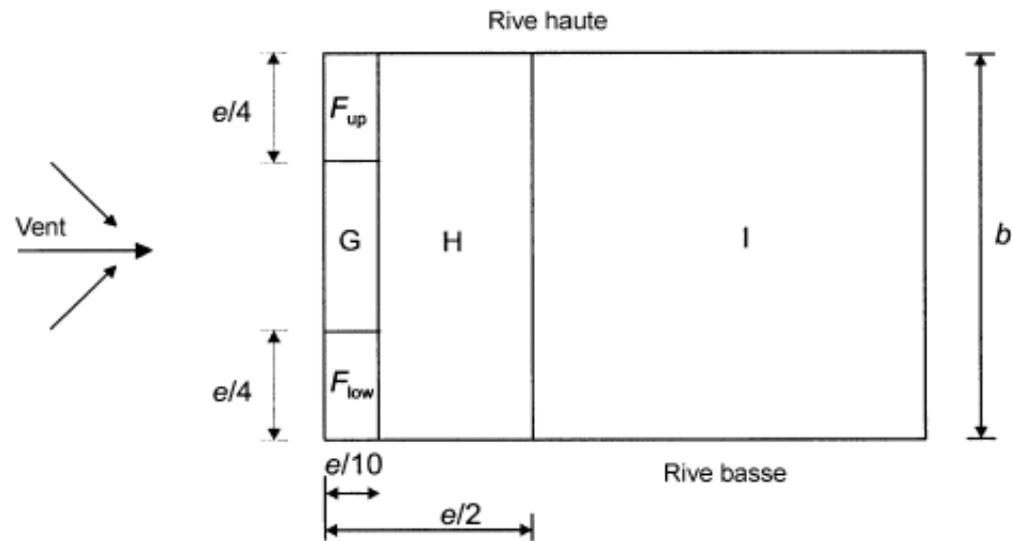
$b$  : dimension du côté perpendiculaire au vent

# Coefficients de pression

Toitures à un seul versant ( $z_e=h$ )



(b) Directions du vent  $\theta = 0^\circ$  et  $\theta = 180^\circ$



(c) Direction du vent  $\theta = 90^\circ$

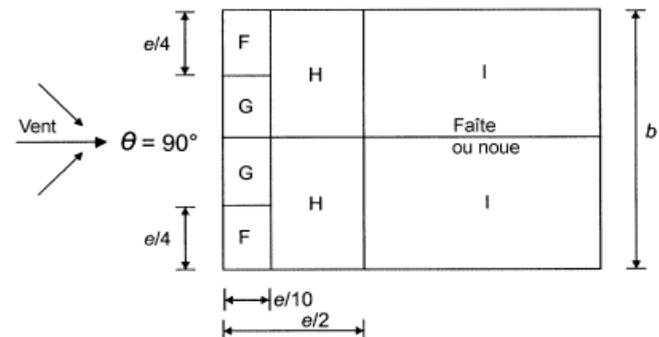
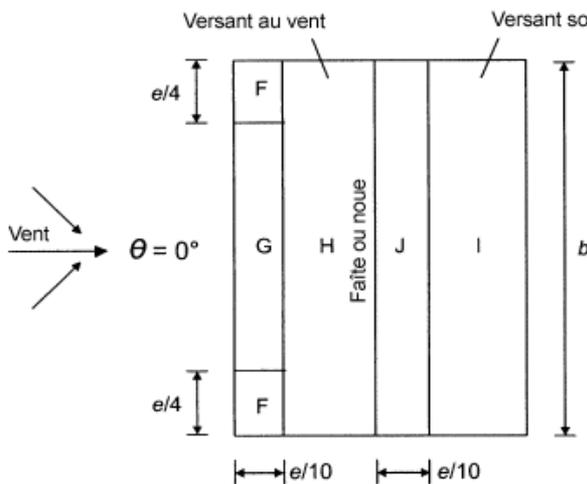
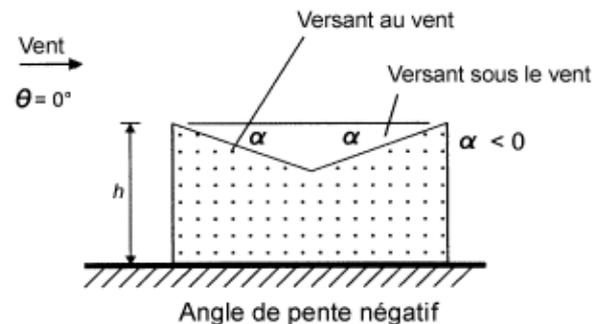
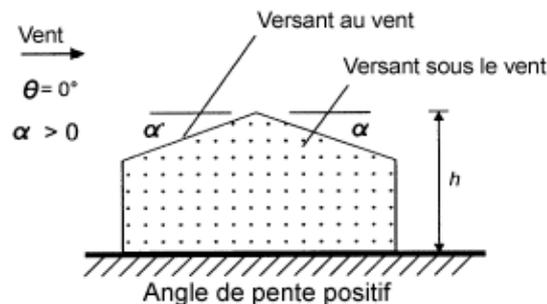
# Coefficients de pression

Toitures à un seul versant ( $z_e=h$ )

Angle de pente $\alpha$	Zone pour la direction du vent $\theta = 0^\circ$						Zone pour la direction du vent $\theta = 180^\circ$					
	F		G		H		F		G		H	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
5°	-1,7	-2,5	-1,2	-2,0	-0,6	-1,2	-2,3	-2,5	-1,3	-2,0	-0,8	-1,2
	+0,0		+0,0		+0,0							
15°	-0,9	-2,0	-0,8	-1,5	-0,3		-2,5	-2,8	-1,3	-2,0	-0,9	-1,2
	+0,2		+0,2		+0,2							
30°	-0,5	-1,5	-0,5	-1,5	-0,2		-1,1	-2,3	-0,8	-1,5	-0,8	
	+0,7		+0,7		+0,4							
45°	-0,0		-0,0		-0,0		-0,6	-1,3	-0,5		-0,7	
	+0,7		+0,7		+0,6							
60°	+0,7		+0,7		+0,7		-0,5	-1,0	-0,5		-0,5	
75°	+0,8		+0,8		+0,8		-0,5	-1,0	-0,5		-0,5	

# Coefficients de pression

## Toitures à deux versants ( $z_e=h$ )



$e$  = la plus petite des deux dimensions suivantes :  $b$  ou  $2h$

(c) Direction du vent  $\theta = 90^\circ$

(b) Direction du vent  $\theta = 0^\circ$

$b$  : dimension du côté perpendiculaire au vent

# Coefficients de pression

## Toitures à deux versants ( $z_e=h$ )

Tableau 7.4a — Coefficients de pression extérieure applicables aux toitures à deux versants

Angle de pente $\alpha$	Zone pour la direction du vent $\theta = 0^\circ$									
	F		G		H		I		J	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
$-45^\circ$	-0,6		-0,6		-0,8		-0,7		-1,0	-1,5
$-30^\circ$	-1,1	-2,0	-0,8	-1,5	-0,8		-0,6		-0,8	-1,4
$-15^\circ$	-2,5	-2,8	-1,3	-2,0	-0,9	-1,2	-0,5		-0,7	-1,2
$-5^\circ$	-2,3	-2,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,2	+0,2		+0,2	
							-0,6		-0,6	
$5^\circ$	-1,7	-2,5	-1,2	-2,0	-0,6	-1,2	-0,6		+0,2	
	+0,0		+0,0		+0,0				-0,6	
$15^\circ$	-0,9	-2,0	-0,8	-1,5	-0,3		-0,4		-1,0	-1,5
	+0,2		+0,2		+0,2		+0,0		+0,0	+0,0
$30^\circ$	-0,5	-1,5	-0,5	-1,5	-0,2		-0,4		-0,5	
	+0,7		+0,7		+0,4		+0,0		+0,0	
$45^\circ$	-0,0		-0,0		-0,0		-0,2		-0,3	
	+0,7		+0,7		+0,6		+0,0		+0,0	
$60^\circ$	+0,7		+0,7		+0,7		-0,2		-0,3	
$75^\circ$	+0,8		+0,8		+0,8		-0,2		-0,3	

# Coefficients de pression

Toitures à deux versants ( $z_e=h$ )

Tableau 7.4b — Coefficients de pression extérieure applicables aux toitures à deux versants

Angle de pente $\alpha$	Zone pour la direction du vent $\theta = 90^\circ$							
	F		G		H		I	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
-45°	-1,4	-2,0	-1,2	-2,0	-1,0	-1,3	-0,9	-1,2
-30°	-1,5	-2,1	-1,2	-2,0	-1,0	-1,3	-0,9	-1,2
-15°	-1,9	-2,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,2	-0,8	-1,2
-5°	-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	-0,6	-1,2
5°	-1,6	-2,2	-1,3	-2,0	-0,7	-1,2	-0,6	
15°	-1,3	-2,0	-1,3	-2,0	-0,6	-1,2	-0,5	
30°	-1,1	-1,5	-1,4	-2,0	-0,8	-1,2	-0,5	
45°	-1,1	-1,5	-1,4	-2,0	-0,9	-1,2	-0,5	
60°	-1,1	-1,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,0	-0,5	
75°	-1,1	-1,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,0	-0,5	



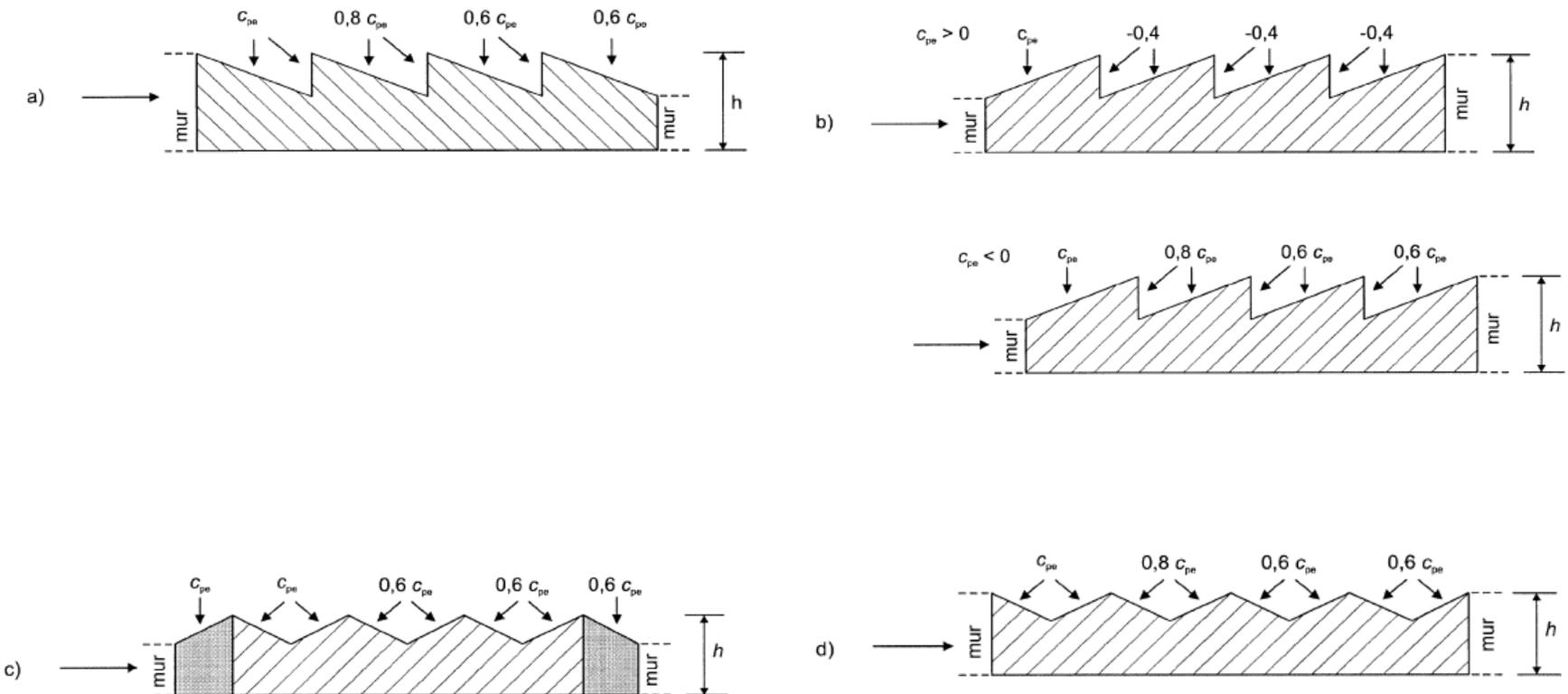
Tableau 7.5 — Coefficients de pression extérieure applicables aux toitures à quatre versants des bâtiments

Angle de pente $\alpha_0$ pour $\theta = 0^\circ$ $\alpha_{90}$ pour $\theta = 90^\circ$	Zone pour la direction du vent $\theta = 0^\circ$ et $\theta = 90^\circ$																		
	F		G		H		I		J		K		L		M		N		
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$
5°	-1,7	-2,5	-1,2	-2,0	-0,6	-1,2	-0,3		-0,6		-0,6		-1,2	-2,0	-0,6	-1,2	-0,4		
	+0,0		+0,0		+0,0														
15°	-0,9	-2,0	-0,8	-1,5	-0,3		-0,5		-1,0	-1,5	-1,2	-2,0	-1,4	-2,0	-0,6	-1,2	-0,3		
	+0,2		+0,2		+0,2														
30°	-0,5	-1,5	-0,5	-1,5	-0,2		-0,4		-0,7	-1,2	-0,5		-1,4	-2,0	-0,8	-1,2	-0,2		
	+0,5		+0,7		+0,4														
45°	-0,0		-0,0		-0,0		-0,3		-0,6		-0,3		-1,3	-2,0	-0,8	-1,2	-0,2		
	+0,7		+0,7		+0,6														
60°	+0,7		+0,7		+0,7		-0,3		-0,6		-0,3		-1,2	-2,0	-0,4		-0,2		
75°	+0,8		+0,8		+0,8		-0,3		-0,6		-0,3		-1,2	-2,0	-0,4		-0,2		

# Coefficients de pression

## Toitures multiples (shed)

coefficients de modification applicables aux pressions (locales et globales) relatives aux directions du vent  $0^\circ$  et  $180^\circ$  sur chaque travée



# Coefficients de pression

## Pression intérieure

Les pressions intérieure et extérieure doivent être considérées comme agissant simultanément. La combinaison la plus défavorable des pressions extérieure et intérieure doit être envisagée pour chaque combinaison d'ouvertures potentielles et autres sources de fuites d'air.

Le coefficient de pression intérieure,  $c_{pi}$ , dépend de la dimension et de la répartition des ouvertures dans l'enveloppe du bâtiment.

**Limites** : sur au moins deux faces du bâtiment (façades ou toiture), l'aire totale des ouvertures existant sur chacune des faces représente < 30 % de l'aire de cette

Si non : toiture isolée

**Face dominante** : l'aire des ouvertures dans la face est au moins égale à deux fois l'aire des ouvertures et des fuites d'air dans les autres faces

$$c_{pi} = 0,75 \cdot c_{pe}$$

2 fois

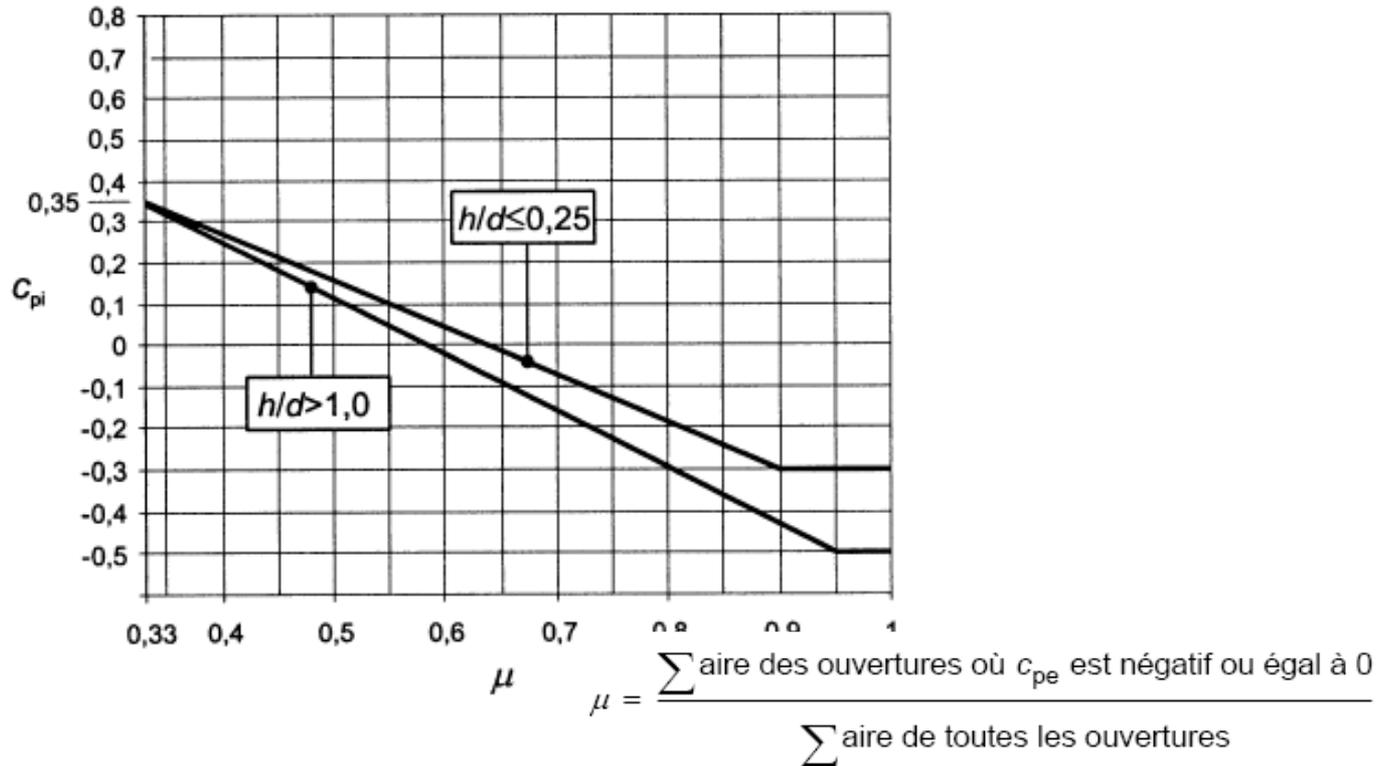
$$c_{pi} = 0,90 \cdot c_{pe}$$

3 fois

# Coefficients de pression

## Pression intérieure

Bâtiment sans face dominante



Si impossible de calculer  $\mu$  on prend la valeur la plus sévère entre  $c_{pi}=0,2$  et  $c_{pi}=-0,3$

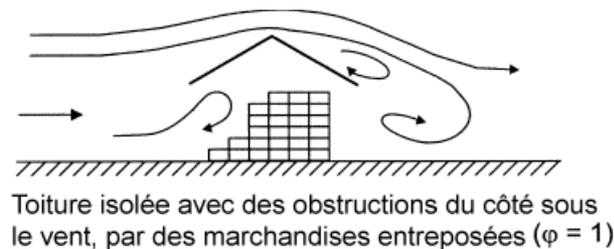
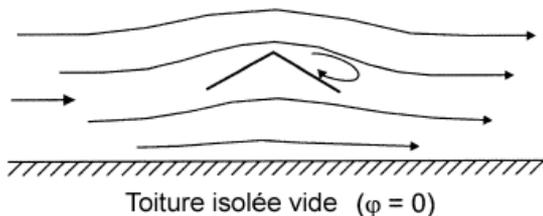
Silos ouvertes et cheminées  $c_{pi}=-0,6$

Réservoir ventilés à petites ouverture  $c_{pi}=-0,4$

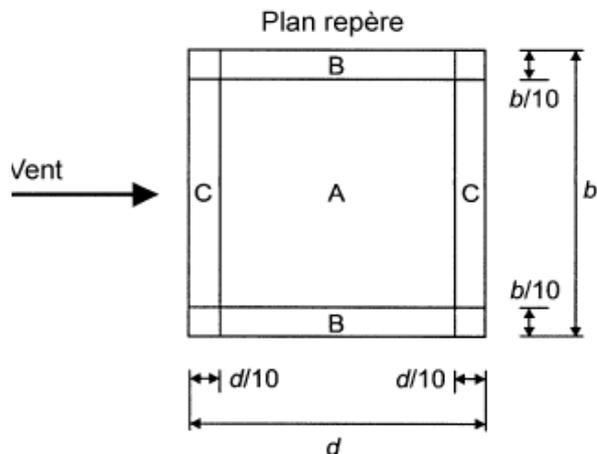
# Coefficients de pression

**Toitures isolées** : Coefficient de pression nette et coefficient de force

Degré d'obstruction



Coefficients de pression nette  $c_{p,net}$



Coefficients dans le tableau

# Forces exercées par le vent

La force exercée par le vent  $F_w$  agissant sur une construction ou un élément de construction peut être déterminée directement par: 1)  $F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$

ou par sommation vectorielle 2)  $F_w = c_s c_d \cdot \sum_{\text{éléments}} c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$

$c_s c_d$  le coefficient structural;

$c_f$  le coefficient de force applicable à la construction ou à l'élément de construction

$A_{ref}$  l'aire de référence de la construction ou de l'élément de construction,

3) On peut également faire la somme vectorielle des forces externe et internes

forces extérieures :

$$F_{w,e} = c_s c_d \cdot \sum_{\text{surfaces}} w_e \cdot A_{ref}$$

forces intérieures :

$$F_{w,i} = \sum_{\text{surfaces}} w_i \cdot A_{ref}$$

forces de frottement :

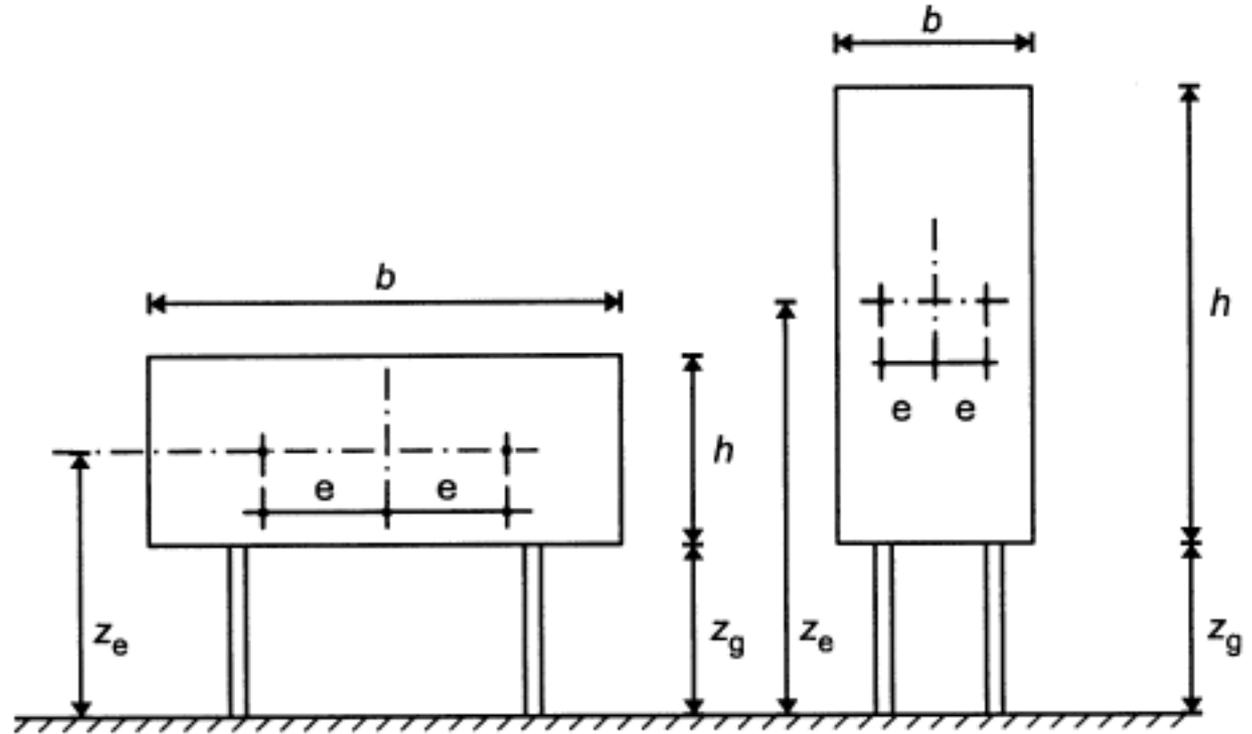
$$F_{fr} = c_{fr} \cdot q_D(z_e) \cdot A_{ref}$$

# Forces exercées par le vent

## Panneaux de signalisation

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$$

$$c_f = 1,80$$



Hauteur de référence :  $z_e = z_g + h/2$ .

Excentricité

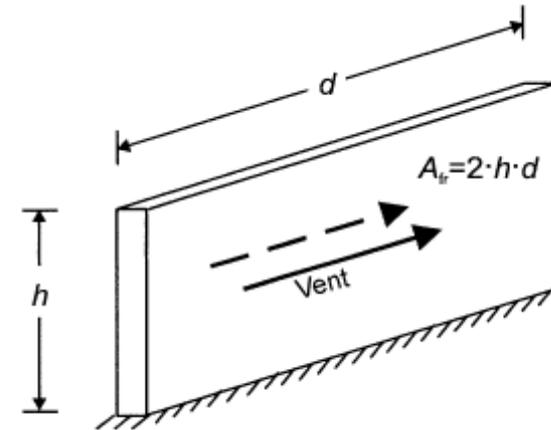
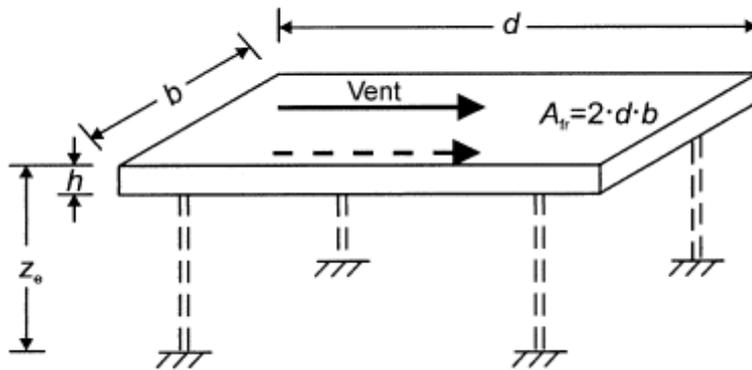
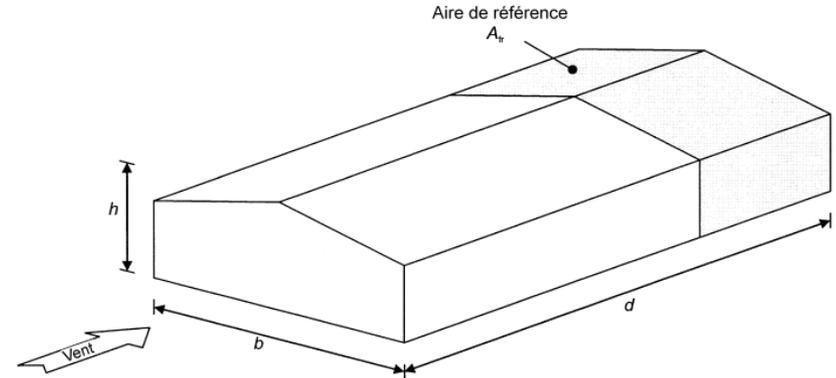
$$e = \pm 0,25 \cdot b$$

Aire de référence :  $A_{ref} = b \cdot h$ .

# Forces exercées par le vent

Tableau 7.10 — Coefficients de frottement  $c_{fr}$  applicables aux murs, acrotères et toitures

Surface	Coefficient de frottement $c_{fr}$
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



# Forces exercées par le vent

Action dynamique : Coefficient dynamique

- 1) Calcul simplifié
- 2) Calcul détaillé

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$$

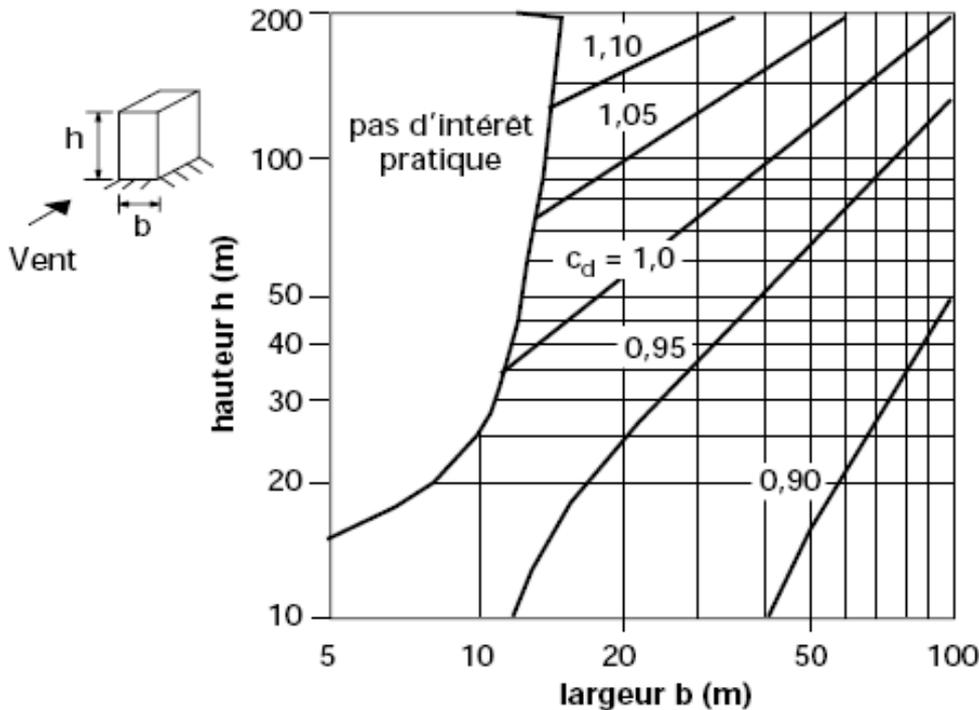


Fig. 5 – Coefficient dynamique pour un bâtiment en acier

La **procédure simple** s'applique aux constructions peu ou pas sensibles à l'effet dynamique « résonant ». Respect de critères simplifiés (dimensions ; matériau de structure) ; la grande majorité des constructions satisfait à ces critères (bâtiments et cheminées jusqu'à 200 m de hauteur ;



## **Paramètre**

### **Pression dynamique de pointe $q_p$**

vitesse de référence du vent  $v_b$

hauteur de référence  $z_e$

catégorie de terrain

pression dynamique de pointe caractéristique  $q_p$

intensité de turbulence  $I_v$

vitesse moyenne du vent  $v_m$

coefficient d'orographie  $c_o(z)$

coefficient de rugosité  $c_r(z)$

### **Pressions exercées par le vent, par exemple sur les revêtements, fixations et éléments de construction**

coefficient de pression intérieure  $c_{pi}$

coefficient de pression extérieure  $c_{pe}$

coefficient de pression nette  $c_{p,net}$

pression aérodynamique extérieure :  $w_e = q_p c_{pe}$

pression aérodynamique intérieure :  $w_i = q_p c_{pi}$

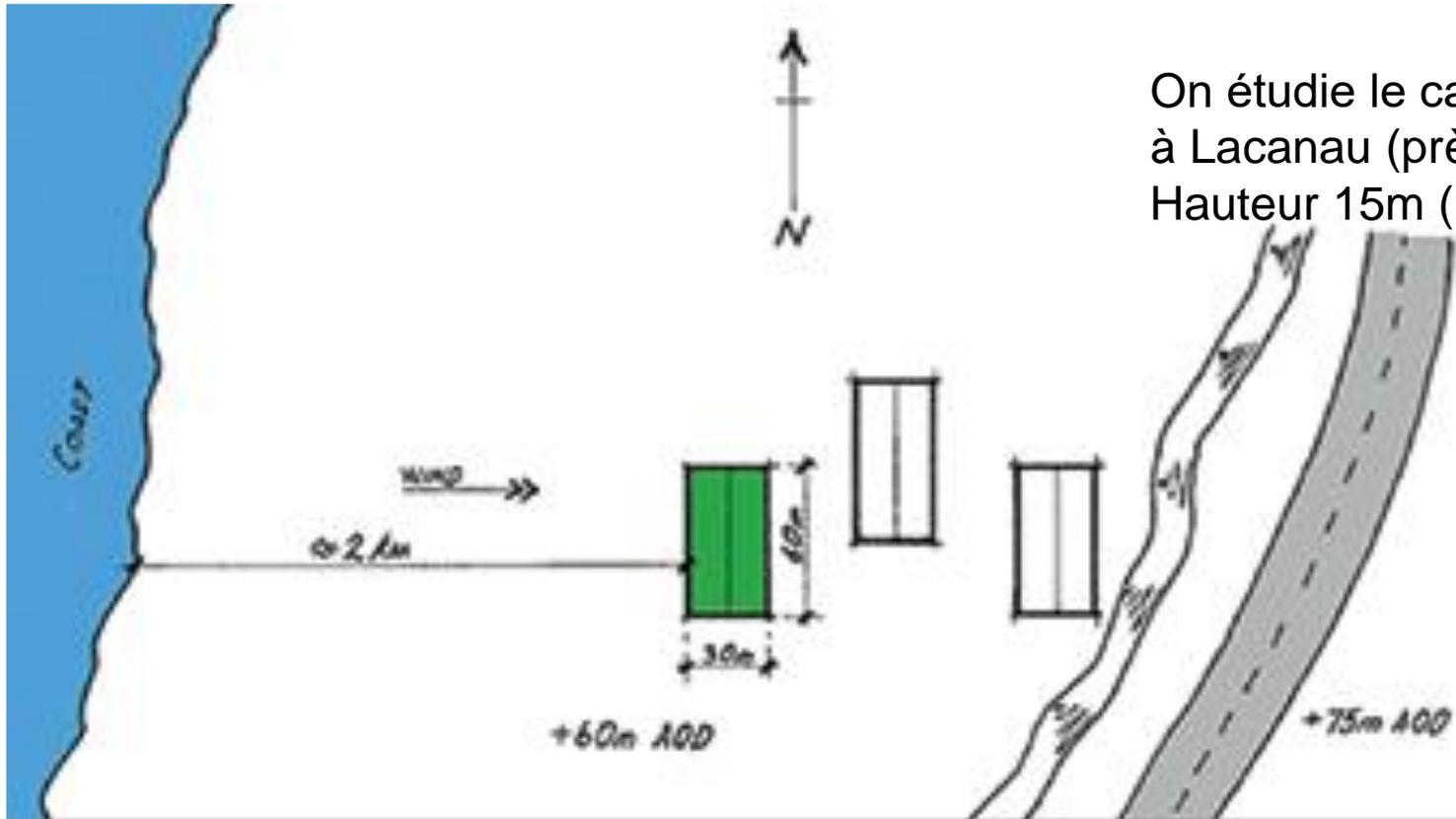
### **Forces exercées par le vent sur les constructions, par exemple pour les effets globaux du vent**

coefficient structural :  $c_{scd}$

force exercée par le vent  $F_w$  calculée à partir des coefficients de force

force exercée par le vent  $F_w$  calculée à partir des coefficients de pression

# Exemple



On étudie le cas d'une maison à Lacanau (près de Bordeaux)  
Hauteur 15m (maximum)

