

norme européenne **NF EN 1991-1-4**
 Novembre 2005
 norme française
 Indice de classement : P 06-114-1

ICS : 91.080.01

Eurocode 1 : Actions sur les structures

Partie 1-4 : Actions générales — Actions du vent

Actions du vent sur les structures selon EC1 (NF EN 1991-1-4)

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 expérimentale XP ENV 1991-2-4 (Indice de classement : P 06-102-4) de septembre 2000. Est destinée à remplacer partiellement le DTU P06-002 d'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

Édité et diffusé par l'Association Française de Normalisation (AFNOR) — 11, avenue Francis de Pressensac — 93571 Saint-Denis La Plaine Cedex
 Tél. : + 33 (0)1 41 62 80 00 — Fax : + 33 (0)1 49 17 90 00 — www.afnor.fr

Sur ce document...

Ce document est destiné aux étudiants qui suivent le cours de Dynamique des Structures de l'option Constructions Durables de l'Ecole Polytechnique d'Orléans. Il présente de façon assez succincte les règles de la prise en compte de l'action du vent selon les EuroCodes1 (EC1 NF EN 1991-1-4, 2005 et son Annexe nationale 2008). Le cours fait suite aux règles de calcul au vent NAV65 dispensé déjà et qui est encore dans nos jours une norme largement utilisée dans les bureaux d'étude, mais qui est appelée à être remplacée par les règles décrits dans les Eurocodes. Vous trouverez donc sûrement des similitudes (et tant mieux !) avec Nv65 et on insistera d'avantage sur les différences entre deux approches. Afin de faciliter le repérage dans la norme

les équations et les figures portent leur numérotation originale dans la norme. N'hésitez pas à consulter les autres documents mis à votre disposition dans le site du cours. Bon courage et ... bon vent !

I. Caractéristiques des actions du vent

Article 3.2 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.

Du point de vue des EuroCodes1 il s'agit des actions **variables** qui s'appliquent directement sur les **parois extérieures** des constructions fermées et, qu'à cause de la porosité de ces parois, elles agissent aussi sur les **parois intérieures**. Les actions du vent, pour la plus part des constructions, peuvent être considérées comme des forces statiques équivalentes aux effets extrêmes du vent turbulent dans sa direction. Elles s'exercent donc sous forme de pressions (**forces normales réparties sur les parois**) et des forces tangentielles (dues au frottement) et notamment aux parois de grande surface.

Article 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.**

Le tableau suivant donne le coefficient de probabilité c_{prob} en fonction de la probabilité p de dépassement au cours d'une année, ou de son inverse qui est la période de retour

Probabilité p de dépassement	0,02	0,04	0,10	0,20	0,50
Période de retour (années)	50	25	10	5	2
c_{prob}	1,00	0,97	0,92	0,88	0,82

2. Vitesse du vent et pression dynamique

2.1 Valeurs de référence

Il convient de déterminer la vitesse moyenne du vent v_m à partir de la vitesse de référence du vent v_b qui dépend du climat du lieu, ainsi que de la variation du vent en fonction de la hauteur déterminée

à partir de la rugosité du terrain et de l'orographie . La vitesse de référence est définie par :

$$v_b = c_{dir} c_{season} v_{b,0} \quad (\text{Éq. 4.1 de la norme})$$

avec :

- c_{dir} : coefficient de direction de vent (sans autre indication égale à 1)
- c_{season} : coefficient de saison (sans autre indication égale à 1)
- $v_{b,0}$: vitesse de référence de base du vent

La vitesse de référence de base du vent est définie comme étant la vitesse moyenne sur 10 minutes à 10 m au-dessus du sol, en terrain dégagé de type «rase campagne» (catégorie II), avec une probabilité de dépassement annuel de 0,02 . Ces valeurs sont données dans le tableau 4.2.de l'Annexe nationale (NA) tandis que la figure 4.3(NA) est une carte illustrant les régions

métropolitaines, dont la définition précise est donnée ci-après, par départements et, lorsque c'est nécessaire, par cantons.

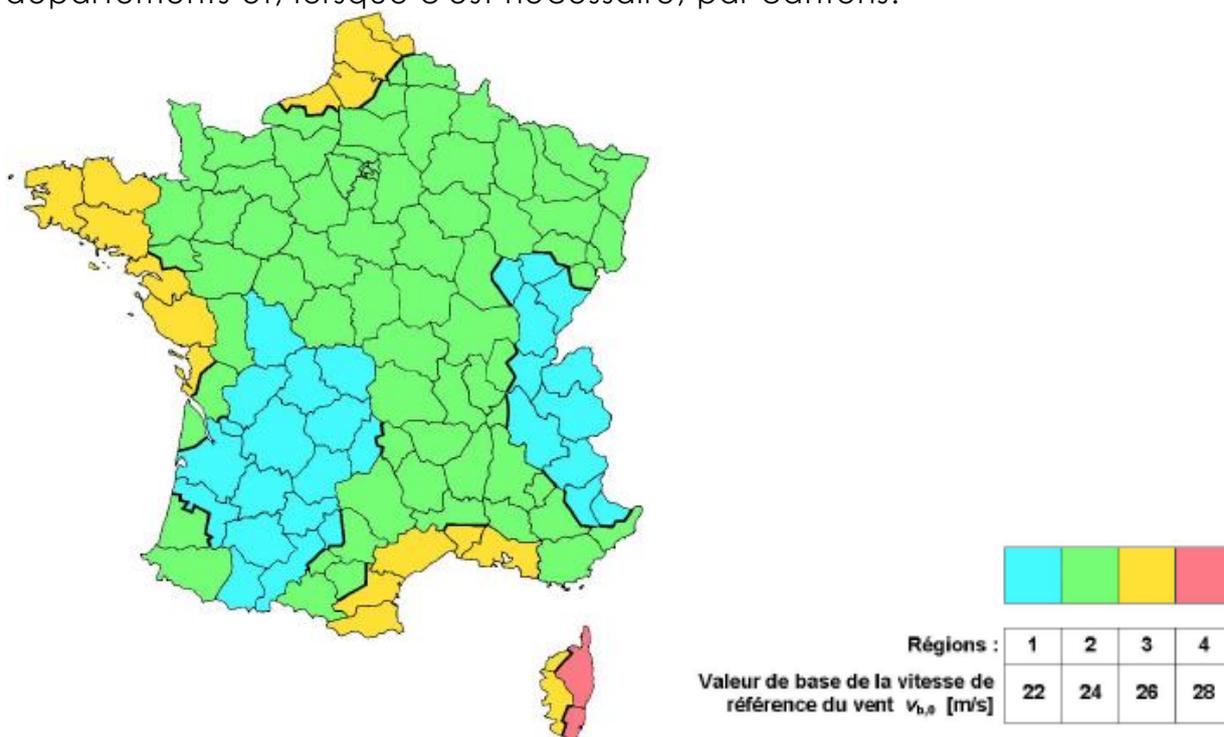


Figure 1 : Carte de la valeur de base de la vitesse de référence en France (D'après la Figure 4.3(NA))

Dans l'annexe nationale on trouve un tableau plus détaillé du classement des régions.

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

Les coefficients c_{dir} et c_{season} sont souvent pris égaux à 1 (en se mettant ainsi en sécurité). Cependant, il est loisible d'utiliser les valeurs définies par la carte suivante, à condition que le secteur angulaire nominal incluant les directions de vent associées aux coefficients de pression (ou de force) exploités dans les calculs, soit tout entier contenu par l'intervalle spécifié à la figure 2.

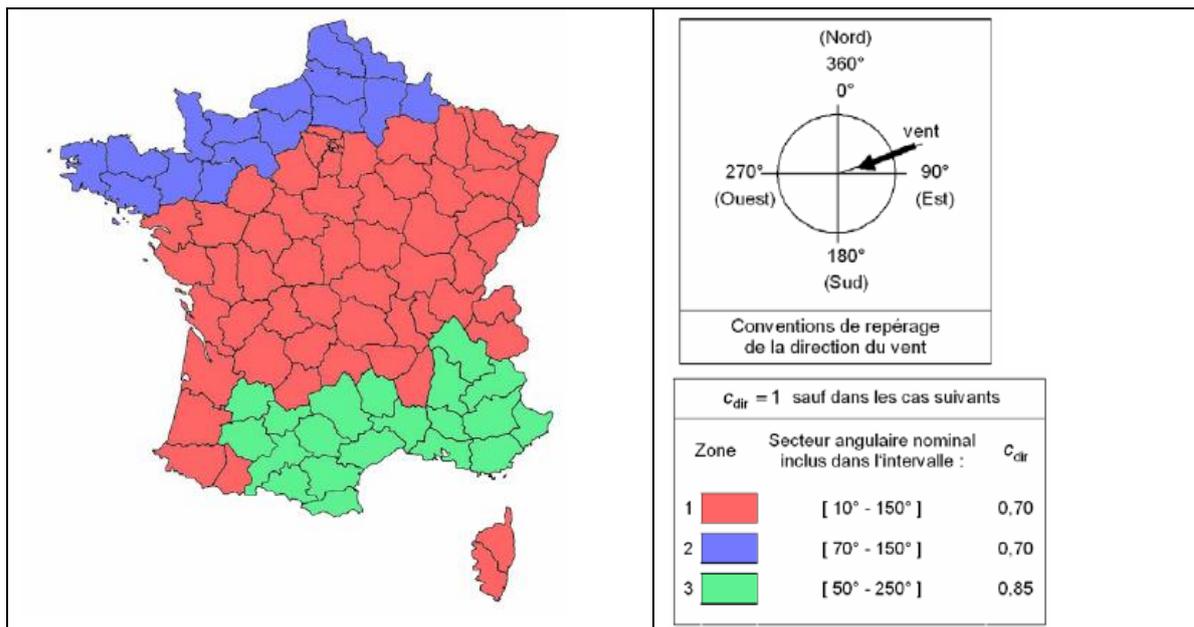
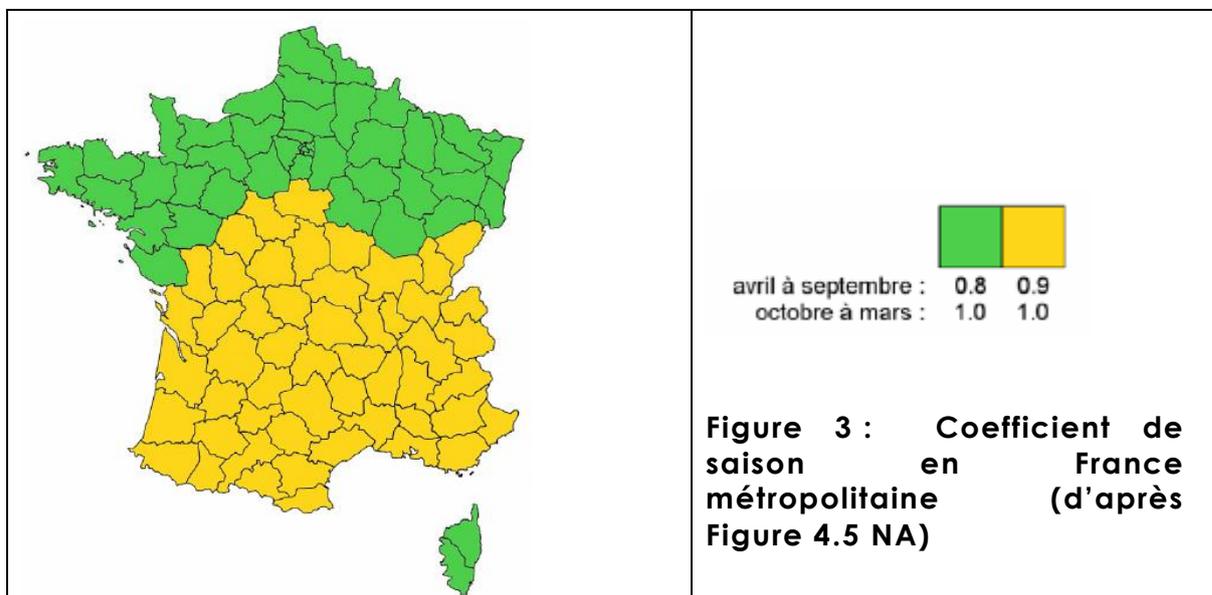


Figure 2 : Coefficient de direction en France métropolitaine (D'après la figure 4.4(NA))

En particulière, on souligne que pour les Départements d'Outre-Mer, le coefficient de direction est égale à 1.

Le coefficient de saison aussi pourrait être pris conforme à la figure 3. Notons que lorsque la durée de la situation de projet considérée n'est pas entièrement incluse dans la période avril à septembre, on retient $c_{saison} = 1$.



2.2 Vent moyen

2.2.1. Variation avec la hauteur

(1) 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 (4.3).

$$v_m(z) = c_r(z) \times c_0(z) \times v_b \quad (\text{Eq. 4.3 de EC1})$$

avec $c_r(z)$ coefficient de la rugosité et $c_0(z)$ le coefficient de l'orographie.

Le coefficient de rugosité, $c_r(z)$, tient compte de la variabilité de la vitesse moyenne du vent sur le site de la construction due à :

- la hauteur au-dessus du niveau du sol ;
- la rugosité du terrain en amont de la construction dans la direction du vent considérée

2.2.2 Coefficient de rugosité

La valeur du coefficient de rugosité est définie sur la base d'un profil logarithmique de la vitesse du vent (Eq. 4.4 de la norme) :

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

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

avec z_0 étant la longueur de la rugosité et k_r le facteur de terrain (dépendant de z_0) via la formule

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

Dans ces expressions $z_{0,II} = 0,05$ (zone de terrain II) et $z_{\max} = 200m$, tandis que les autres valeurs sont indiquées dans le tableau 4.1NA de l'annexe nationale. Notez que l'annexe nationale ne comprend pas de catégorie I

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 (forêts, leur hauteur bres, 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 recouverts de bâtiments dont la hauteur moyenne est supérieure à 15 m ; forêts	1,0	15

Dans l'annexe nationale un ensemble de photos aériennes illustre les catégories de terrain (ces photos sont reproduites dans un document accompagnant le cours) En prenant compte les valeurs du tableau 4.1(NA) et les équations 4.4 il est possible de calculer le coefficient de rugosité sous le forme des abaques (figure 4.15 NA)

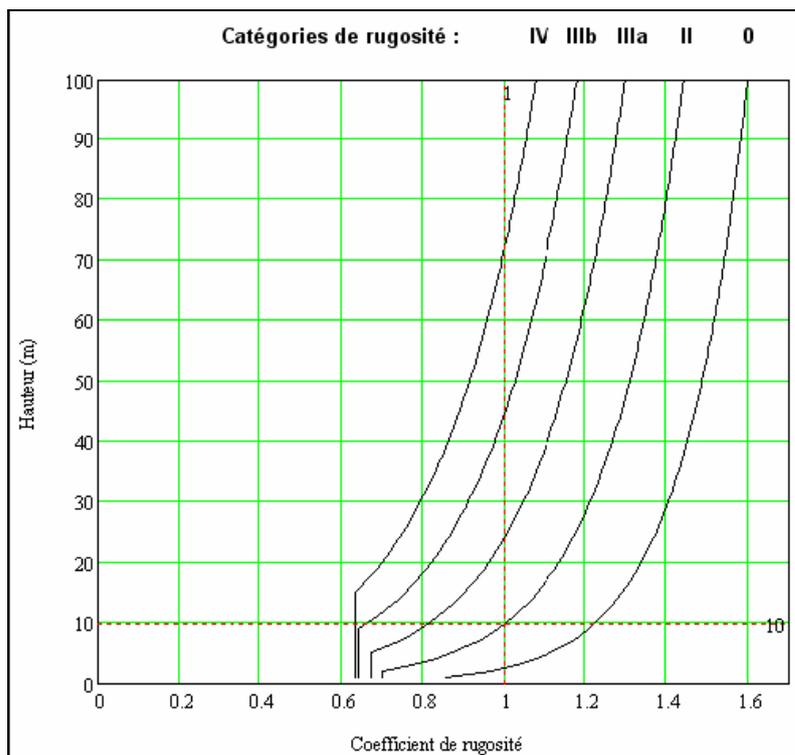
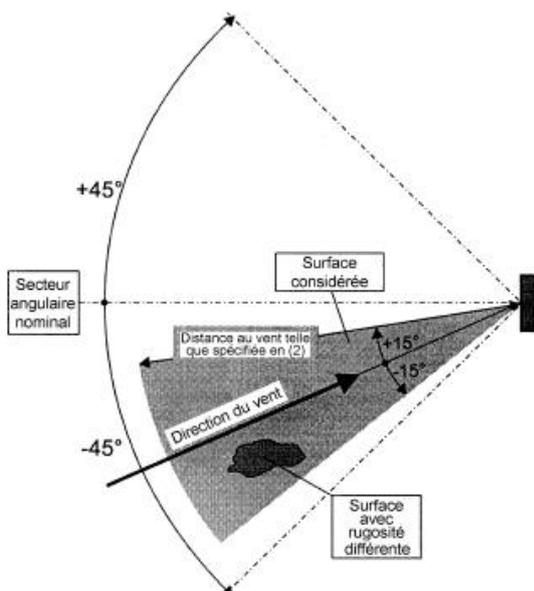


Figure 4.15(NA) — Coefficient de rugosité

La rugosité du terrain à utiliser pour une direction du vent donnée dépend de la rugosité du sol et de la distance sur laquelle s'étend cette rugosité, supposée uniforme, dans un secteur angulaire avoisinant la direction du vent. Les zones de faible surface (inférieure à 10 % de la zone considérée) présentant une rugosité différente peuvent être ignorées (voir figure 4.1 de la norme)



D'après Figure 4.1 de la norme — Évaluation de la rugosité du terrain

L'annexe nationale précise que la distance au vent, ou rayon **R** du secteur angulaire dans lequel la rugosité du terrain est à qualifier, dépend de la hauteur **h** de la construction. Elle est donnée par :

$$R = 23h^{1.2} \quad \text{avec} \quad R \geq 300$$

2.2.3. Coefficient d'orographie

Cas 1 : lorsque l'orographie constituée d'obstacles de hauteurs et de formes variées (le cas le plus fréquemment rencontré) le coefficient d'orographie c_o est calculé selon la procédure 1

Cas 2 : lorsque l'orographie constituée d'obstacles bien individualisés et importants (ex. une colline isolée, une falaise) le coefficient d'orographie c_o est calculé selon la procédure 2

Extrait de l'annexe nationale :

Procédure 1

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

$$A_m = \frac{2 \cdot A_C + A_{N1} + A_{N2} + A_{E1} + A_{E2} + A_{S1} + A_{S2} + A_{O1} + A_{O2}}{10} \quad (4.12-NA)$$

où

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 ΔA_C est définie par :

$$\Delta A_C = A_C - A_m \quad (4.13-NA)$$

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

$$\begin{aligned} c_o(z) &= 1 + 0,004 \cdot \Delta A_C \cdot \exp[-0,014 (z - 10)] && \text{pour } z \geq 10 \text{ m} \\ c_o(z) &= c_o(10) && \text{pour } z < 10 \text{ m} \end{aligned} \quad (4.14-NA)$$

où

z est la hauteur locale au-dessus du sol, exprimée en mètres.

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 numérique ou sur maquette en soufflerie.

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 hauteur de H et la longueur L_u sont définies à la Figure 4.16(NA).

La longueur L_u est mesurée dans le plan vertical contenant la direction du vent.

NOTE : Pour l'application de la présente procédure, il est considéré suffisant d'examiner les seules directions de vent nominales considérées pour le calcul des actions du vent sur la construction. Il n'est ainsi pas nécessaire de rechercher, dans le secteur angulaire associé à chaque direction de vent nominale, la direction qui conduirait au coefficient d'orographie maximum.

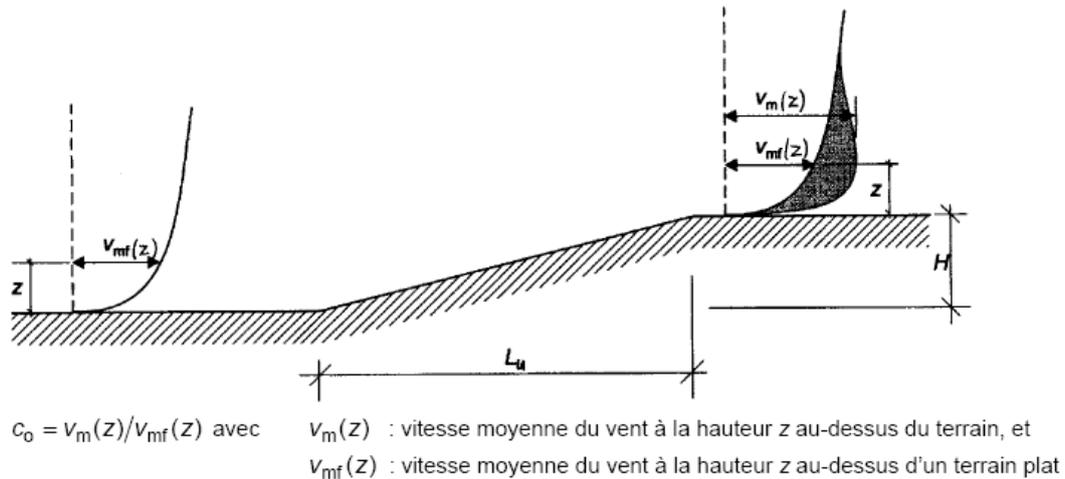


Figure 4.16(NA) — Illustration de l'augmentation des vitesses du vent due à l'orographie

(b) L'augmentation la plus importante des vitesses du vent se produit à proximité du sommet du versant ; voir figure 4.16(NA). La pente n'a pas d'effet significatif sur l'écart type de la turbulence définie en 4.4 (1).

NOTE L'intensité de la turbulence diminue du fait de l'augmentation de la vitesse du vent et de la constance de l'écart type.

(c) Le coefficient d'orographie $c_o(z) = v_m(z)/v_{mf}(z)$ rend 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). Au voisinage du sommet, à une distance du sommet $|X| < k_{red} L$, il est défini comme suit :

$$c_o = 1 \quad \text{pour } \Phi < 0,05$$

$$c_o = 1 + S_{max} \left(1 - \frac{|X|}{k_{red} L} \right) \cdot e^{-\alpha z/L} \quad \text{pour } \Phi \geq 0,05 \quad (4.15-NA)$$

où :

S_{max} est un coefficient donné dans le tableau 4.7(NA) en fonction de la forme de l'obstacle et du rapport H/L

Φ est la pente du versant au vent, en suivant la direction du vent ($\Phi = H/L_u$)

L_u est la longueur du versant au vent, en suivant la direction du vent (voir figure 4.16(NA))

H est la hauteur de l'obstacle (voir figure 4.16(NA))

L est une longueur caractérisant le versant au vent et prenant la valeur :

$$L = L_u/2 \quad \text{pour } \Phi < 0,25$$

$$L = 2H \quad \text{pour } \Phi > 0,25$$

(4.16-NA)

X est la distance horizontale entre le lieu de construction considéré et le sommet de l'obstacle (voir figures 4.17(NA) et 4.18(NA))

z est la distance verticale mesurée à partir du niveau du sol au lieu considéré

α et k_{red} sont des coefficients définis dans le tableau 4.7(NA)

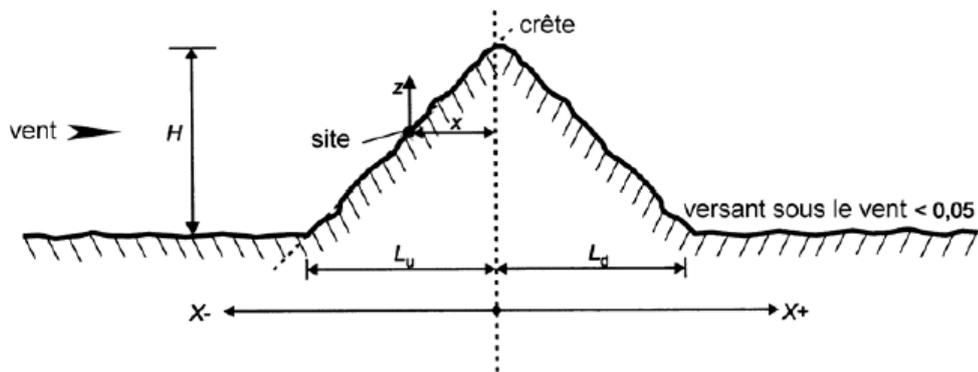


Figure 4.17(NA) — Collines isolées ou en chaîne : définitions

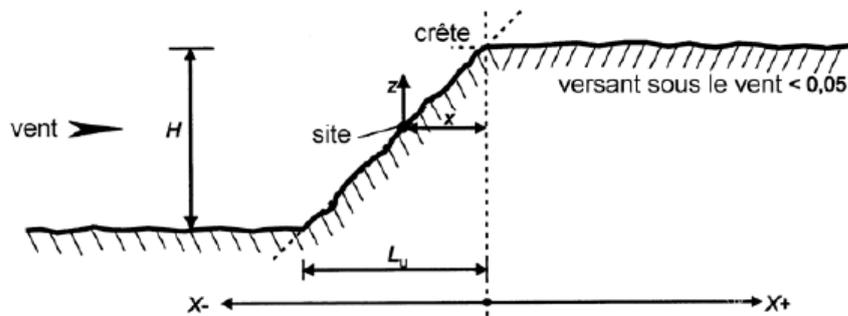


Figure 4.18(NA) — Falaises et escarpements : définitions

Tableau 4.7(NA) — Paramètres relatifs au calcul du coefficient orographique

Forme de l'obstacle	S_{max}	α	k_{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

NOTE Les collines en chaîne et les falaises ou escarpements sont supposées avoir une grande longueur perpendiculairement au vent, égale à au moins 10 fois la hauteur H de l'obstacle orographique. Au contraire, les collines isolées ont une longueur limitée par comparaison à leur hauteur, de sorte que le vent peut les contourner latéralement, et pas seulement verticalement ; dans ce cas, la survitesse est moindre au franchissement de la crête. Du fait de la formule de définition de la longueur L , le rapport H/L ne peut dépasser la valeur 0,5.

NOTE : La pente du terrain au vent est à apprécier sur une distance comprise entre 0 et 10 fois la hauteur H de l'obstacle orographique. En particulier, une construction implantée sur un terrain plat (pente localement nulle) mais sous le vent d'une falaise, reste soumise à l'effet de survitesse dû à l'obstacle orographique, tant que la distance entre la falaise et la construction reste comprise entre 0 et $8H$, où H est la hauteur de la falaise (cf. (4.12-NA) et (4.13-NA)).

2.2.4. Constructions avoisinantes de grandes dimensions et de hauteur bien plus élevée

L'annexe nationale stipule la nécessité de prendre en compte la présence dans le voisinage d'un bâtiment des constructions de grande hauteur (H supérieure à 30 m) et excédant sensiblement celles des autres constructions qui l'entourent (Figure 4.19 (NA))

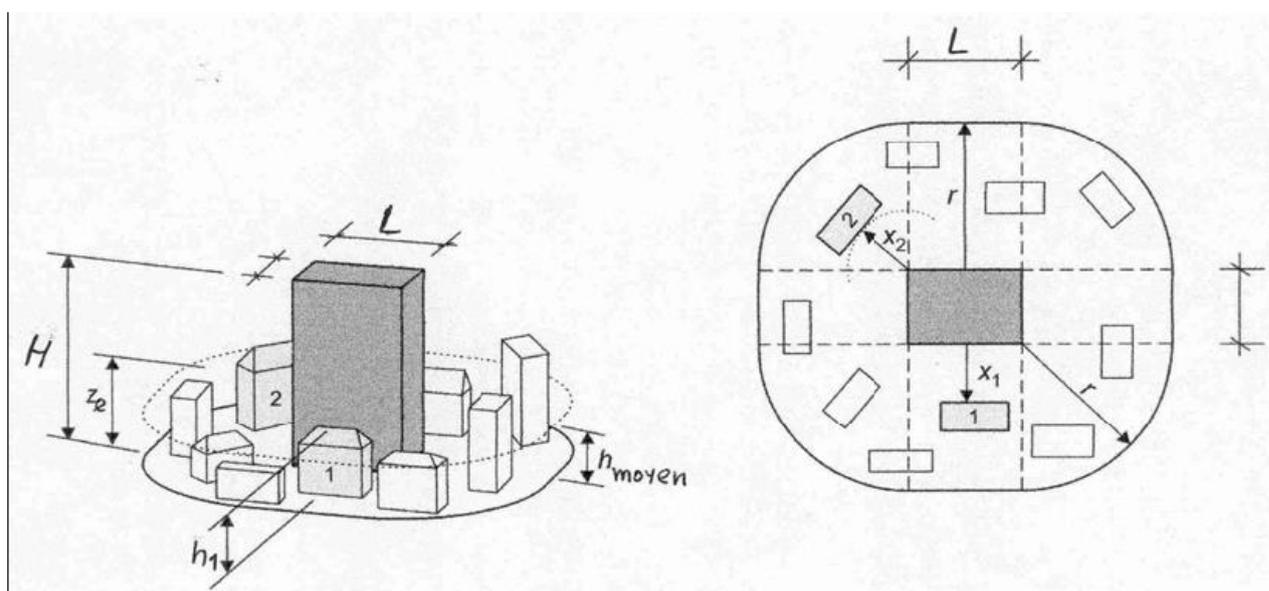


Figure 4.19(NA) — Influence d'une construction de grande hauteur, sur deux constructions voisines différentes (1 et 2)

Les effets aggravants doivent être considérés pour les bâtiment avoisinantes de hauteur inférieure à $H/2$ et situées à une distance x (distance minimale entre une façade de la construction étudiée et une façade ou un angle du bâtiment dominant) inférieure à 2 fois la valeur r prise comme le minimum entre la hauteur H du bâtiment dominant et 2 fois sa plus grande dimension en plan L :

$$r=H \text{ avec } r \leq 2L$$

Un bâtiment est alors 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 . Les effets aggravants de la présence d'un bâtiment dominant sont pris en compte en considérant comme hauteur de référence de l'action de vent une hauteur z_e telle que :

$$z_e = \begin{cases} \frac{r}{2} & x < r \\ \frac{1}{2} \left[r - \left(1 - \frac{2h}{r} \right) (x - r) \right] & \frac{r}{2} < x < 2r \end{cases}$$

2.3 Turbulence du vent

La composante fluctuante du vent est caractérisée par l'intensité de turbulence $I_v(z)$ qu'à une hauteur z est définie comme l'écart type de la turbulence divisé par la vitesse moyenne du vent. L'intensité de turbulence est calculé par :

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_1}{c_0(z) \cdot \ln(z/z_0)} \quad \text{pour} \quad z_{\min} \leq z \leq z_{\min}$$

(Eq. 4.7 de la norme)

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

Les symboles z_0 , z_{\min} et c_0 sont définis précédemment tandis que pour le coefficient k_1 l'annexe nationale demande de distinguer deux cas en fonction du terrain et de l'orographie :

- dans le cas d'orographie constituée d'obstacles de hauteurs et de formes variées (cas 1), le coefficient de turbulence k_1 est défini par l'expression (4.20-NA):

$$k_1 = c_0(z) \left[1 - 2 \cdot 10^{-4} (\log_{10}(z_0) + 3)^6 \right]$$

- en site plat et dans le cas d'orographie constituée d'obstacles bien individualisés et importants (cas 2 discuté dans le paragraphe de l'orographie), le coefficient de turbulence k_1 est défini par l'expression (4.19-NA):

$$k_1 = 1 - 2 \cdot 10^{-4} (\log_{10}(z_0) + 3)^6$$

2.4 Pression dynamique

La **pression dynamique de référence** est calculée par l'expression

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \quad \text{(Eq. 4.10 de la norme)}$$

La masse volumique de l'air ρ doit être prise égale à 1,225 kg/m³ et v_b est la vitesse de référence (en m/seconde)

La **pression dynamique de pointe** est calculée par l'expression suivante :

$$q_p(z) = \left[1 + 7 \cdot I_v(z) \right] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = c_e(z) \cdot q_b \quad \text{(Eq. 4.8 de la norme)}$$

Le coefficient $c_e(z) = \left[1 + 7 I_v(z) \right] \frac{v_b^2}{v_m^2(z)} = \frac{q_p(z)}{q_b}$ est connu comme étant le coefficient d'exposition (au vent). Ce facteur, pour un coefficient d'orographie 1 peut être lu des abaques de la figue 4.2(NA) :

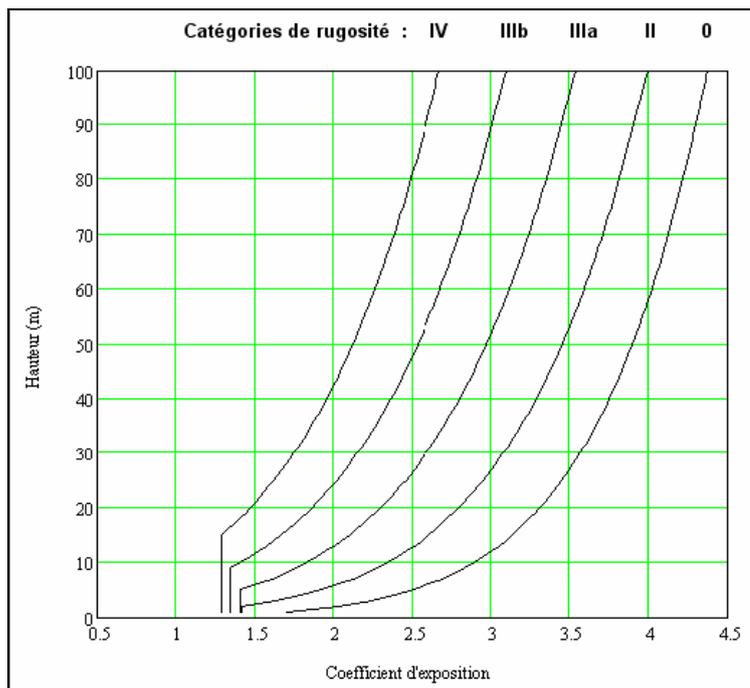


Figure 4.2(NA) — Représentation du coefficient d'exposition $c_e(z)$ pour $c_o = 1,0$

3 Pression aérodynamique sur les surfaces et forces sur les éléments de structures

On distingue la pression interne et externe sur une surface. Ces deux quantités se calculent de façon similaire en multipliant la pression de pointe à un point de référence (à définir) avec un coefficient (à définir lui aussi):

- pression interne $w_i = q_p(z_i)c_{pi}$ pression externe : $w_e = q_p(z_e)c_{pe}$

Dans ces expressions z_i et z_e sont les points de référence respectivement pour la pression interne et externe tandis que c_{pi} et c_{pe} sont les coefficients de la pression interne et externe respectivement.

La pression nette exercée sur un mur, un toit ou un élément est égale à la différence entre les pressions s'exerçant sur les surfaces opposées en tenant bien compte de leurs signes. Une pression, exercée en direction de la surface est considérée comme positive, tandis qu'une succion, qui s'éloigne de la surface est considérée comme négative (voir exemples sur la figure ci-dessous)

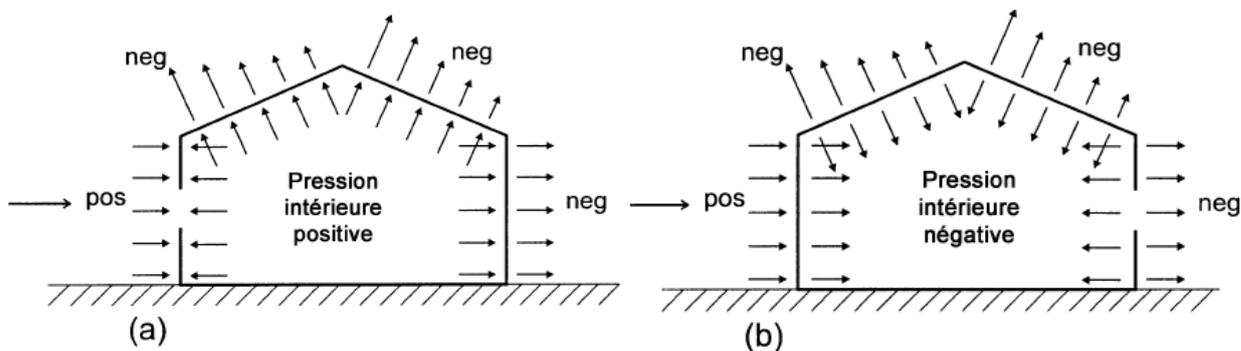


Figure 5.1 — Pression exercée sur les surfaces

Il convient de déterminer les forces exercées par le vent sur l'ensemble de la construction ou un composant :

— en calculant les forces à l'aide des coefficients de force ;

ou

— en calculant les forces à partir des pressions de surface.

La force exercée par le vent F_w agissant sur une construction ou un élément de construction peut être déterminée directement en utilisant l'expression suivante :

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad \text{(Eq. 5.3 de la norme)}$$

ou par sommation vectorielle :

$$F_w = c_s c_d \cdot \sum_{\text{éléments}} c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad \text{(Eq. 5.4 de la norme)}$$

Dans ces équations $c_s c_d$ est le coefficient de structure c_f est le coefficient de force applicable à la construction ou à l'élément de construction et A_{ref} est l'aire de référence de la construction ou de l'élément de construction.

La deuxième façon de calculer la force sur une construction ou un élément de construction consiste à faire la somme vectorielle des forces $F_{w,e}$, $F_{w,i}$ et F_{fr} calculées à partir des pressions extérieure et intérieure en utilisant (éq. 5.5 et 5.6) et des forces de frottement résultant du frottement du vent parallèlement aux surfaces extérieures :

$$F_{w,e} = c_s c_d \cdot \sum_{\text{surfaces}} w_e \cdot A_{ref} \quad \text{(Eq. 5.5 de la norme)}$$

$F_{w,i} = \sum_{\text{surfaces}} w_i \cdot A_{ref}$	(Eq. 5.6 de la norme)
$F_{fr} = c_{fr} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$	(Eq. 5.7 de la norme)

3.1 Coefficient structural $c_s c_d$

Bien que ce coefficient peut être décomposé en deux coefficients c_s et c_d dont l'un représente le coefficient de la structure et l'autre le coefficient dynamique, chacun calculé selon des règles bien définies, l'annexe nationale indique que **pour la plus part du temps** cette décomposition n'est pas nécessaire et **la procédure suivante de sélection du coefficient $c_s c_d$ peut être suivie** :

- a)** pour les bâtiments dont la hauteur est inférieure à 15 m, la valeur de $c_s c_d$ peut être considérée comme égale à 1 ;
- b)** pour les éléments de façade et de toiture dont la fréquence propre est supérieure à 5 Hz, la valeur de $c_s c_d$ peut être considérée comme égale à 1 ;
- c)** pour les bâtiments en charpente comportant des cloisons, d'une hauteur inférieure à 100 m, et dont ladite hauteur est inférieure à 4 fois la largeur mesurée dans la direction du vent, la valeur de $c_s c_d$ peut être considérée comme égale à 1 ;
- d)** pour les cheminées à sections transversales circulaires dont la hauteur est inférieure à 60 m et inférieure à 6,5 fois le diamètre, la valeur de $c_s c_d$ peut être considérée comme égale à 1 ;
- e)** dans les cas a), b), c) et d) ci-dessus, les valeurs de $c_s c_d$ peuvent également être calculées
- f)** pour les ouvrages de génie civil (autres que les ponts, ainsi que les cheminées et les bâtiments ne relevant pas des limites données en c) et d) ci-dessus, il est recommandé de calculer $c_s c_d$ comme produit de deux coefficients à partir des équations 6.2 et 6.3 :

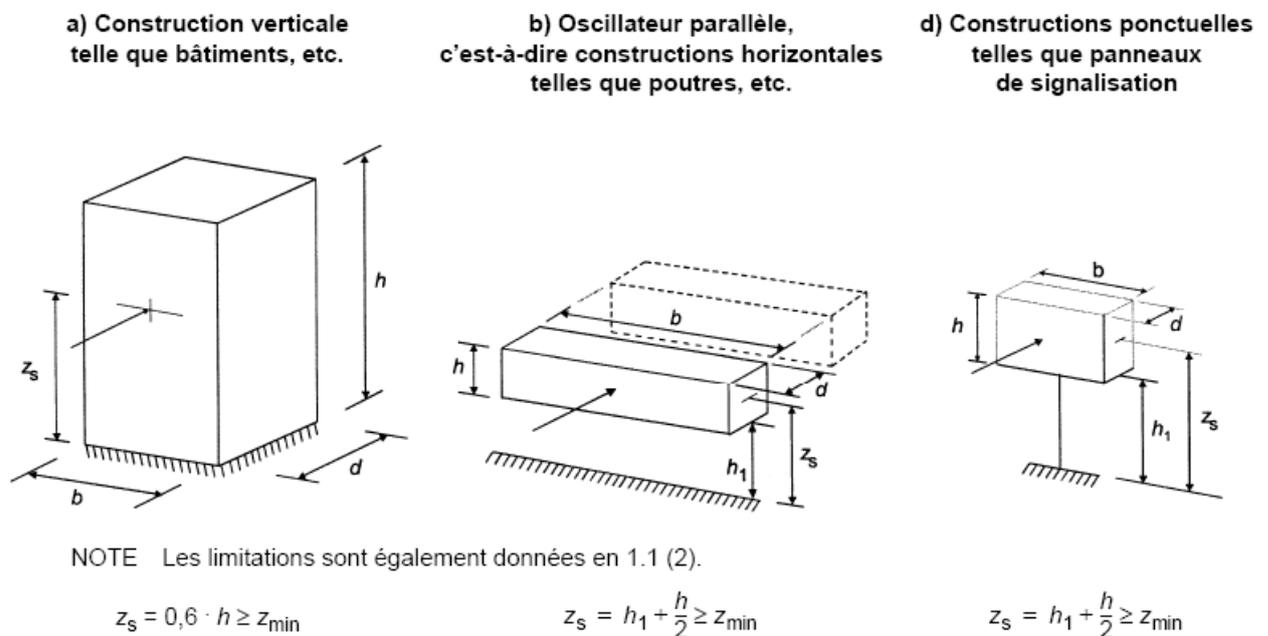
$$c_s = \frac{1 + 7 \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_s)} \quad (\text{Eq. 6.2 de la norme})$$

$$c_d = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2}} \quad (\text{Eq. 6.3 de la norme})$$

Avec :

- z_s est la hauteur de référence, voir figure ci dessous. Pour les constructions pour lesquelles cette figure ne s'applique pas, z_s peut être prise égale à h , la hauteur de la construction ;
- k_p est le facteur de pointe défini comme le rapport de la valeur maximale de la partie variable de la réponse à son écart type ;
- I_v est l'intensité de turbulence définie ;
- B^2 est le coefficient de réponse quasi-statique traduisant l'imparfaite corrélation de la pression sur la surface de la construction ;
- R^2 est le coefficient de réponse résonante traduisant la résonance du mode de vibration engendrée par la turbulence.

Les coefficients B et R relèvent de calculs dynamiques. On se met dans la côté de sureté si on prend $B=1$. La procédure de calcul de ces coefficients est expliquée dans le §6.3 de la norme en laissant la possibilité à chaque pays de définir les coefficients qui y interviennent. L'annexe nationale française demande que ces calculs soient faits selon l'annexe B de la norme



**Figure 6.1 — Formes générales des constructions couvertes par la méthode de calcul.
Les dimensions de la construction et la hauteur de référence
utilisée sont également représentées**

Excitation par la turbulence de sillage

Cette excitation doit être prise en compte pour les bâtiments élancés ($h/d > 4$) et les cheminées ($h/d > 6,5$) disposées en paires ou en groupes. Elle peut être négligée si au moins l'une des conditions est satisfaite :

- la distance entre deux bâtiments ou cheminées est supérieure à 25 fois la dimension, mesurée perpendiculairement au vent, du bâtiment ou de la cheminée situé en amont ;
- la fréquence propre du bâtiment ou de la cheminée en aval est supérieure à 1 Hz.

3.2 Coefficients de pression et de force

La norme consacre le §7 à la définition et au calcul des différents coefficients de pressions qui interviennent dans le calcul des pressions et des forces dues au vent. En plus des coefficients de pression externe et interne (c_{pe} et c_{pi}) définis précédemment on définit aussi le coefficient de force et de pression nette.

Le choix des coefficients à utiliser dépend du type de la structure ou de l'élément de la structure qu'on étudie.

- Pour les bâtiments et les cylindres à base circulaire on définit les pressions extérieures et intérieures.,
- Pour les toitures isolées et les murs isolés on définit le coefficient de pression nette
- Pour les panneaux de signalisation, les éléments structuraux, les sphères, les treillis, les drapeaux on définit le coefficient de force du vent.
- Pour certain structures on tient compte aussi d'un coefficient de frottement (voir plus loin)

3.2.1 Coefficients de pression externe pour les bâtiments

On distingue les coefficients $c_{pe,1}$ et $c_{pe,10}$ applicable respectivement aux petites surfaces A inférieure à 1m^2 (coefficient local) et aux murs portant à 10m^2 (coefficient global). Pour une surface intermédiaire A on utilise une interpolation logarithmique, i.e :

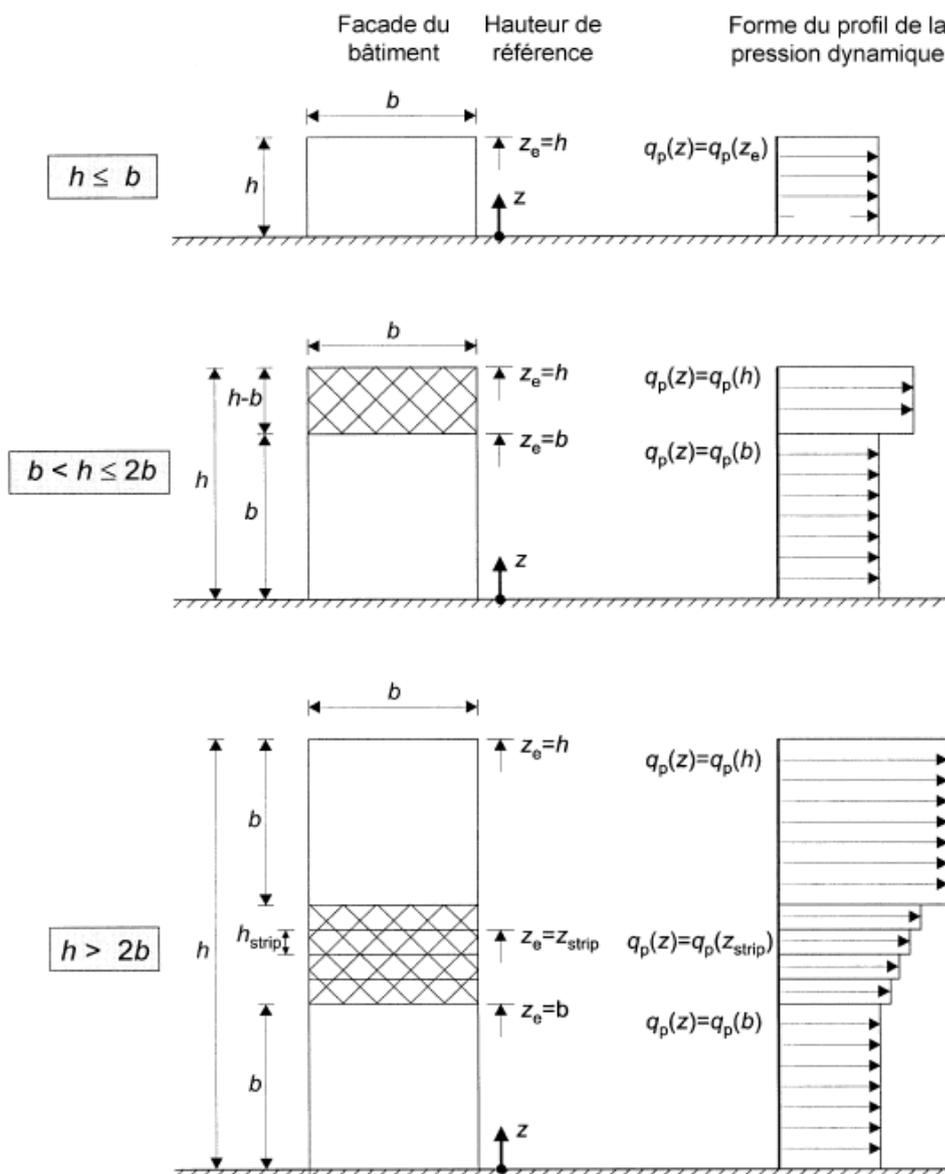
$$c_{pe} = c_{pe,1} - (c_{pe,1} - c_{pe,10}) \log_{10} A .$$

Il convient d'utiliser les valeurs $c_{pe,10}$ et $c_{pe,1}$ indiquées dans différents tableaux pour les directions orthogonales du vent, à savoir 0° , 90° et 180° qui sont les directions les plus défavorables.

3.2.1.a Coefficients de pression externe pour les murs verticaux des bâtiments à plan rectangulaire

On définit à la fois l'hauteur d'application z_e et le coefficient de pression. Les hauteurs de référence, z_e , pour les murs des bâtiments à plan rectangulaire dépendent du facteur de forme h/b (h étant les hauteurs supérieures des différentes parties des murs). On distingue 3 cas :

- 1) $h < b$ le bâtiment peut être considéré comme un seul élément,
- 2) $b < h < 2b$ on considère alors deux parties : la partie inférieure de hauteur b et la partie supérieure de hauteur $h-b$
- 3) $h > 2b$ on considère alors trois parties : une partie inférieure et une supérieure, chacune de hauteur b et une partie intermédiaire de hauteur $h-2b$ qui est alors découpée en plusieurs bandes de hauteur h_{strip} .



(D'après) Figure 7.4 de la norme — Hauteur de référence, z_e , dépendant de h et b pour un bâtiment

On définit pour un tel bâtiment les zones A,B,C ,D et E en fonction de dimensions et de l'orientation du bâtiment une valeur du coefficient de pression externe.

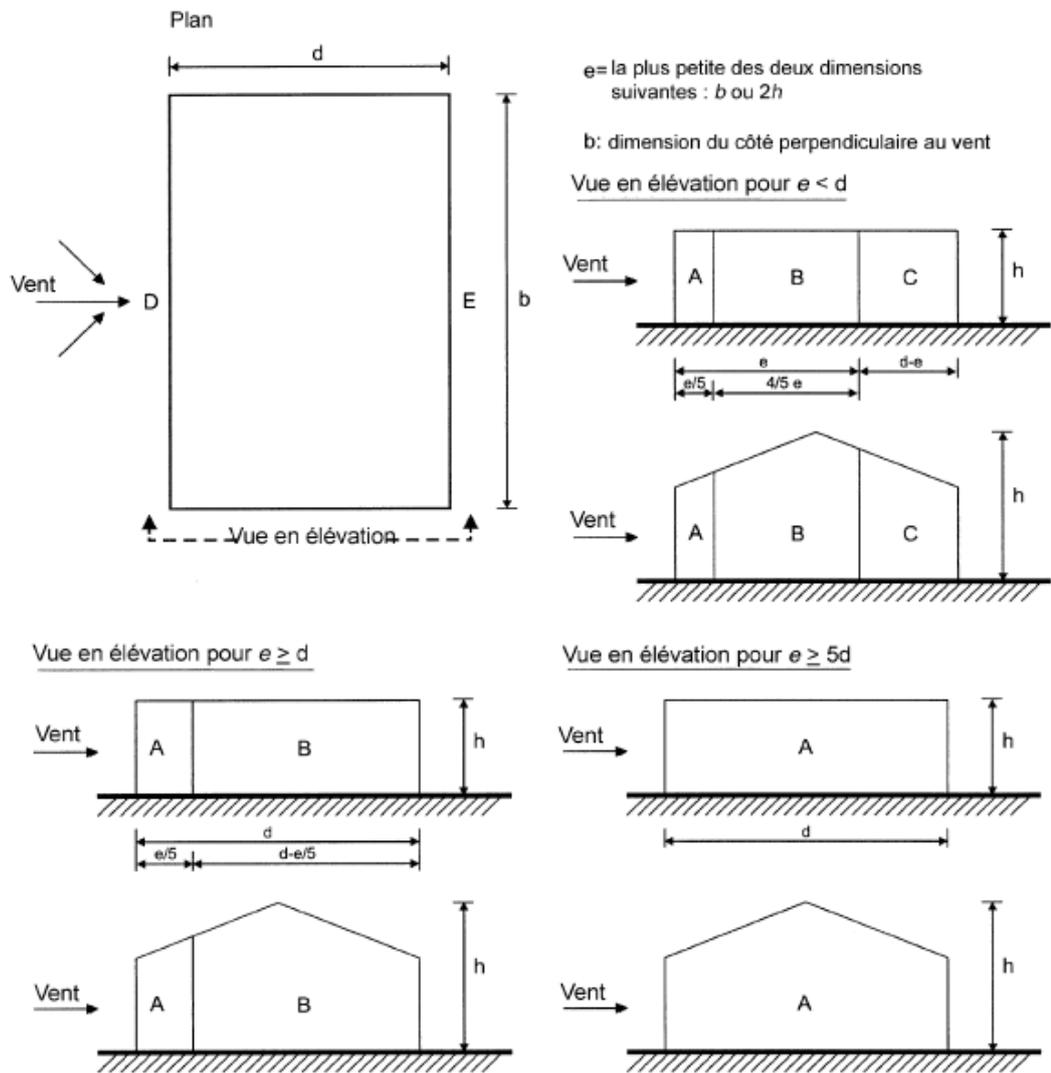
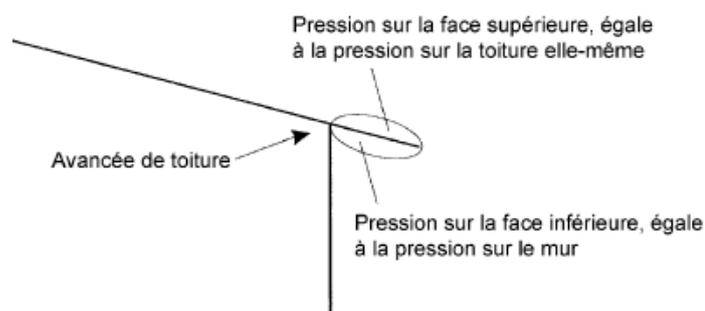


Figure 7.5 — Légende relative aux murs verticaux

Les valeurs des coefficients de pression externes pour différentes zones en fonction du rapport h/d (pour d'autres valeurs de ce rapport la norme suggère d'utiliser une interpolation linéaire) sont donné dans le tableau 7.1 de la norme (reproduit ci-dessous)

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	



D'après le figure 7.3 de la norme : Pressions applicables aux avancées de toiture

Pour les avancées de toit, la pression exercée sur la face inférieure de l'avant-toit est égale à la pression applicable à la zone du mur vertical directement relié à l'avancée de toit, tandis que la pression exercée sur la face supérieure de l'avant-toit est égale à la pression de la zone, définie pour la toiture elle-même (figure 7.3 de la norme)

3.2.1.b Coefficients de pression externe pour les toitures-terrasses

Voici la hauteur de référence et les coefficients pour chaque zone (pour les toitures-terrasses avec acrotères est égale à $h + h_p$)

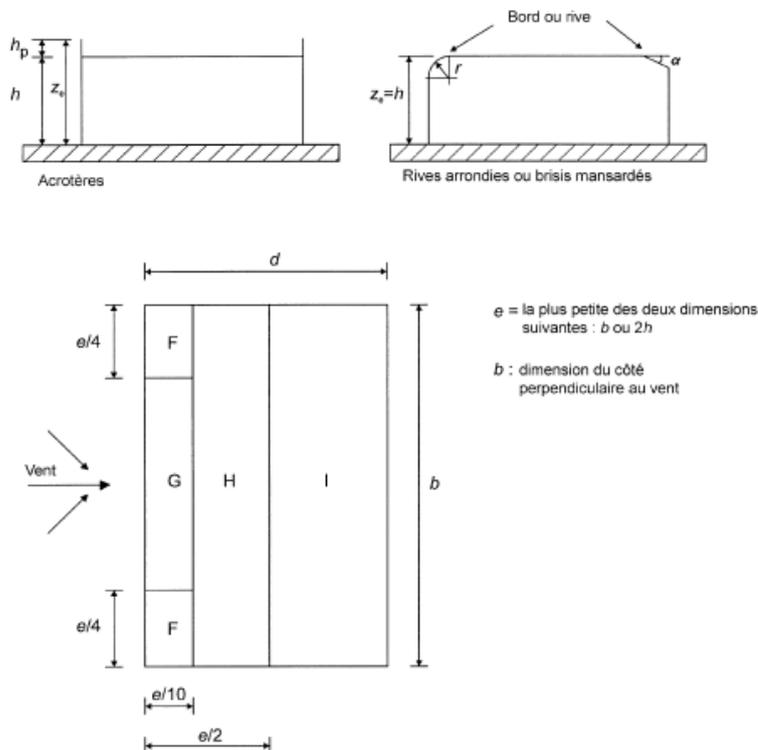


Figure 7.6 — Légende applicable aux toitures-terrasses

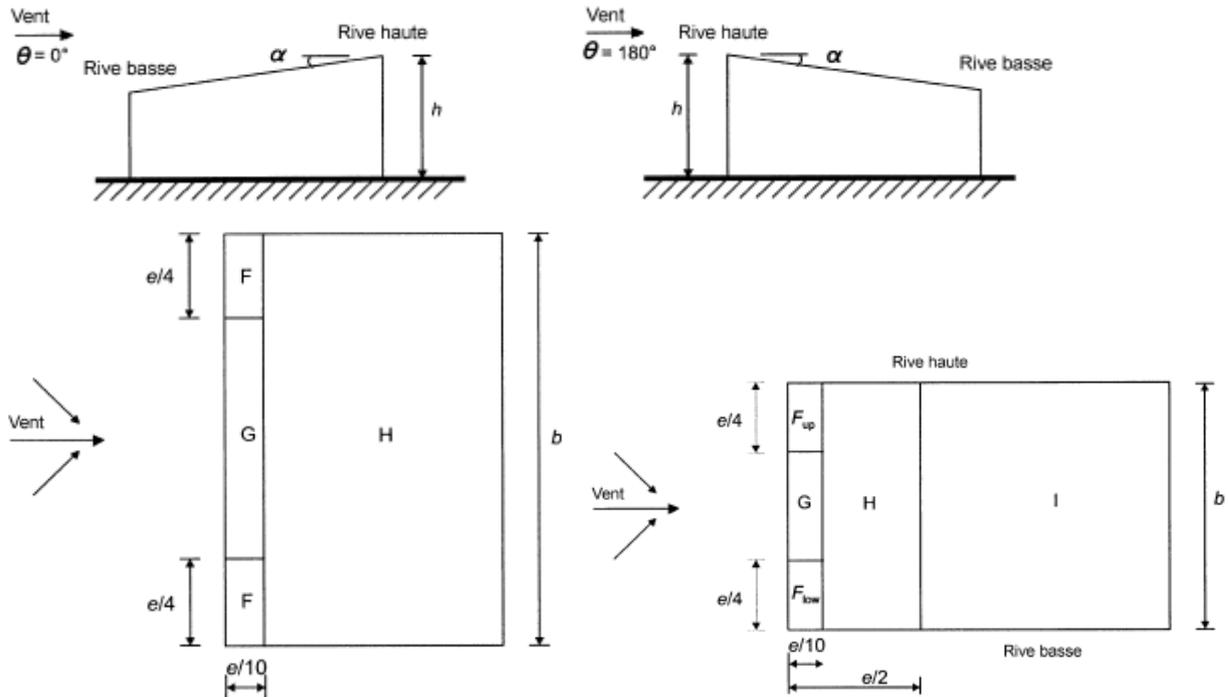
Le tableau ci-dessus coïncide avec le tableau 7.2 de la norme et donne les coefficients de pression externe pour chaque zone indiquée sur la figure 7.6.

Type de toiture		Zone							
		F		G		H		I	
		<i>cpe,10</i>	<i>cpe,1</i>	<i>cpe,10</i>	<i>cpe,1</i>	<i>cpe,10</i>	<i>cpe,1</i>	<i>cpe,10</i>	<i>cpe,1</i>
rives à arêtes vives		-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
avec acrotères	$h_p/h = 0,025$	-1,6	-2,2	-1,1	-1,8	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
	$h_p/h = 0,05$	-1,4	-2,0	-0,9	-1,6	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
	$h_p/h = 0,10$	-1,2	-1,8	-0,8	-1,4	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
rives arrondies	$r/h = 0,05$	-1,0	v1,5	-1,2	-1,8	-0,4		+0,2	-0,2
	$r/h = 0,10$	-0,7	-1,2	-0,8	-1,4	-0,3		+0,2	-0,2
	$r/h = 0,20$	-0,5	-0,8	-0,5	-0,8	-0,3		+0,2	-0,2
brisis	$\alpha = 30^\circ$	-1,0	-1,5	-1,0	-1,5	-0,3		+0,2	

mansardés							- 0,2
	$\alpha = 45^\circ$	- 1,2	- 1,8	- 1,3	- 1,9	- 0,4	+ 0,2
							- 0,2
	$\alpha = 60^\circ$	- 1,3	- 1,9	- 1,3	- 1,9	- 0,5	+ 0,2
							- 0,2

3.2.1.c Coefficients de pression externe pour les toitures à un seul versant

Pour ce cas l'hauteur de référence est $z_e=h$. En notant par $e=\min\{b ; 2h\}$ où b est la dimension du côté perpendiculaire au vent, la norme définit les zones comme sur la figure ci-dessous construite à partir de la **figure 7.7** de la norme.



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

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

D'après la Figure 7.7 de la norme — Zonage du coefficient c_{pe} aux toitures à un seul versant

Les valeurs du coefficient sont indiquées dans les tableaux 7.3a et 7.3b

Tableau 7.3a — Coefficients de pression extérieure applicables aux toitures à un seul versant

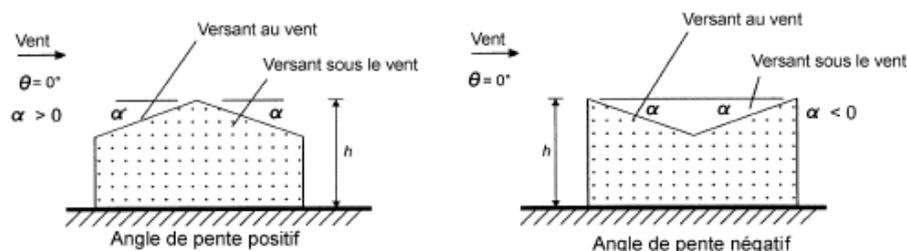
Angle de pente α	Zone pour la direction du vent $\theta = 0^\circ$						Zone pour la direction du vent $\theta = 180^\circ$					
	F		G		H		F		G		H	
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
5°	-1,7	-2,5	-1,2	-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	

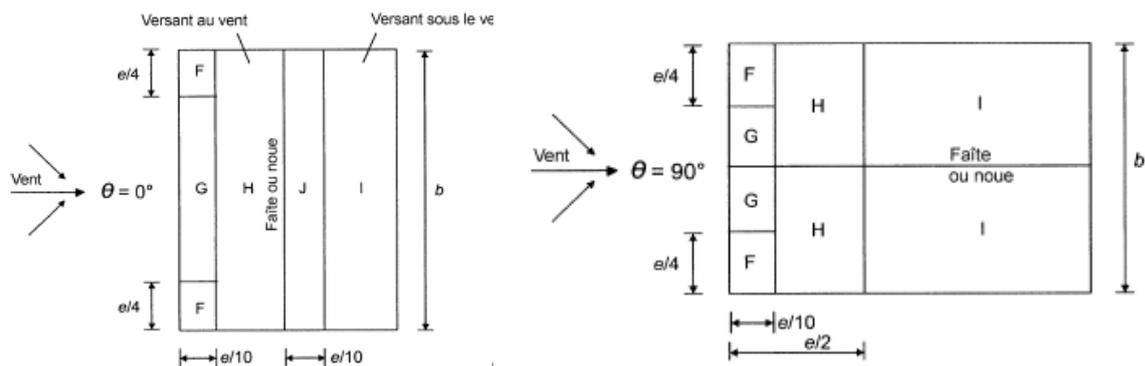
Tableau 7.3b — Coefficients de pression extérieure applicables aux toitures à un seul versant

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

3.2.1.d Coefficients de pression externe pour les toitures à deux versants

Les mêmes notations que dans le 3.2.1.c sont utilisées. Les zones et leurs coefficients sont donnés sur la figure 7.8 et dans les tableaux 7.4.a et 7.4.b.



(b) Direction du vent $\theta = 0^\circ$ (c) Direction du vent $\theta = 90^\circ$

Angle de pente α	Zone pour la direction du vent $\theta = 0^\circ$						Tableau 7.4.a			
	F		G		H		I		J	
	<i>cpe,10</i>	<i>cpe,1</i>	<i>cpe,10</i>	<i>cpe,1</i>	<i>cpe,10</i>	<i>cpe,1</i>	<i>cpe,10</i>	<i>cpe,1</i>	<i>cpe,10</i>	<i>cpe,1</i>
-45°	-0,6		-0,6		-0,8		-0,7		-1,0	-1,5
-30°	-1,1	-2,0	-0,8	-1,5	-0,8		-0,6		-0,8	-1,4
-15°	-2,5	-2,8	-1,3	-2,0	-0,9	-1,2	-0,5		-0,7	-1,2
-5°	-2,3	-2,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,2	+0,2			+0,2
							-0,6			-0,6
5°	-1,7	-2,5	-1,2	-2,0	-0,6	-1,2	-0,6			+0,2
	+0,0		+0,0		+0,0		-0,6			-0,6
15°	-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°	-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°	-0,0		-0,0		-0,0		-0,2			-0,3
	+0,7		+0,7		+0,6		+0,0			+0,0
60°	+0,7		+0,7		+0,7		-0,2			-0,3
75°	+0,8		+0,8		+0,8		-0,2			-0,3

NOTE 1 Avec $\theta = 0^\circ$, la pression varie rapidement entre des valeurs positives et négatives sur le versant au vent, pour un angle de pente α allant de -5° à $+45^\circ$; c'est pourquoi des valeurs positives et négatives sont indiquées pour ces pentes. Pour ces toitures, il convient de prendre en considération quatre cas de figure avec lesquels les plus grandes ou les plus petites valeurs de toutes les zones F, G et H sont combinées aux plus grandes ou aux plus petites valeurs des zones I et J. Un mélange de valeurs positives et négatives sur un même versant, n'est pas admis.

NOTE 2 Pour les angles de pente intermédiaires de même signe, une interpolation linéaire peut être utilisée entre valeurs de même signe. (Ne pas effectuer d'interpolation entre $\alpha = +5^\circ$ et $\alpha = -5^\circ$, mais utiliser les données relatives aux toitures-terrasses. Les valeurs égales à 0,0 sont données à cette fin d'interpolation.

Angle de pente α	Zone pour la direction du vent $\theta = 90^\circ$						Tableau 7.4.b	
	F		G		H		I	
	<i>cpe,10</i>	<i>cpe,1</i>	<i>cpe,10</i>	<i>cpe,1</i>	<i>cpe,10</i>	<i>cpe,1</i>	<i>cpe,10</i>	<i>cpe,1</i>
-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

3.2.1.e Coefficients de pression externe pour les toitures à quatre versants

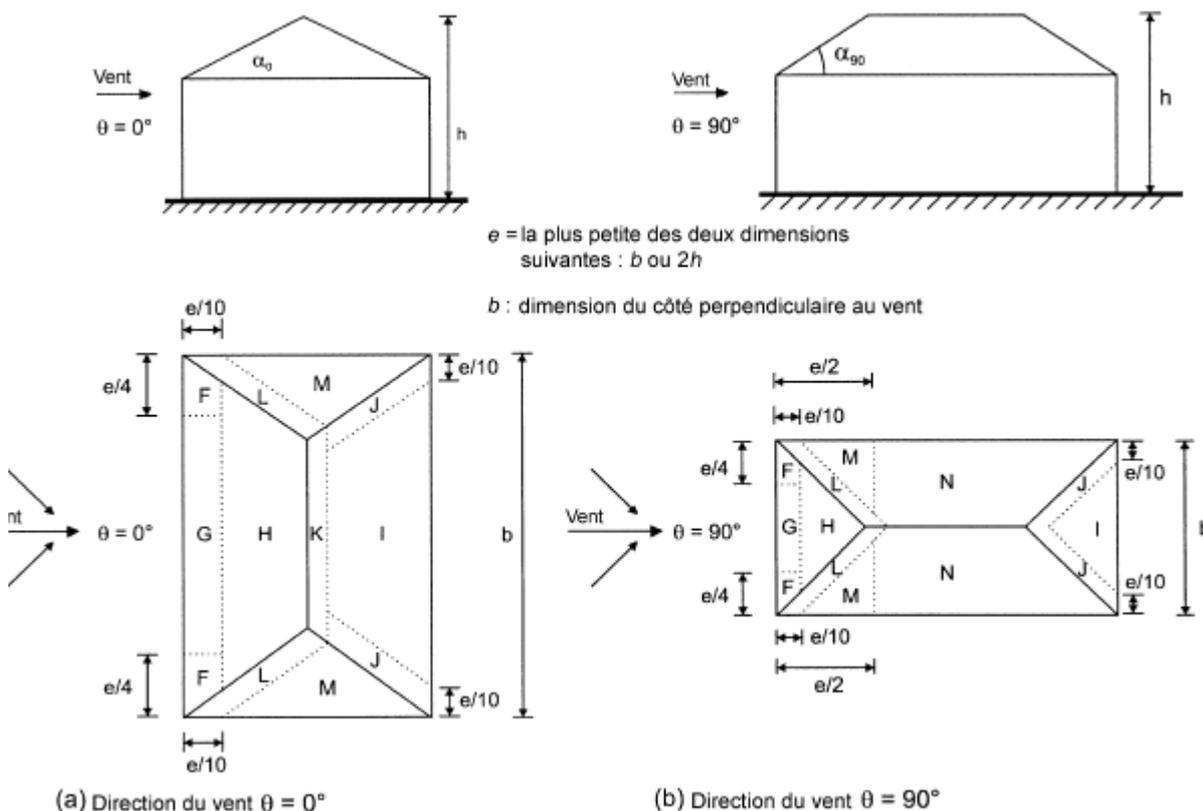
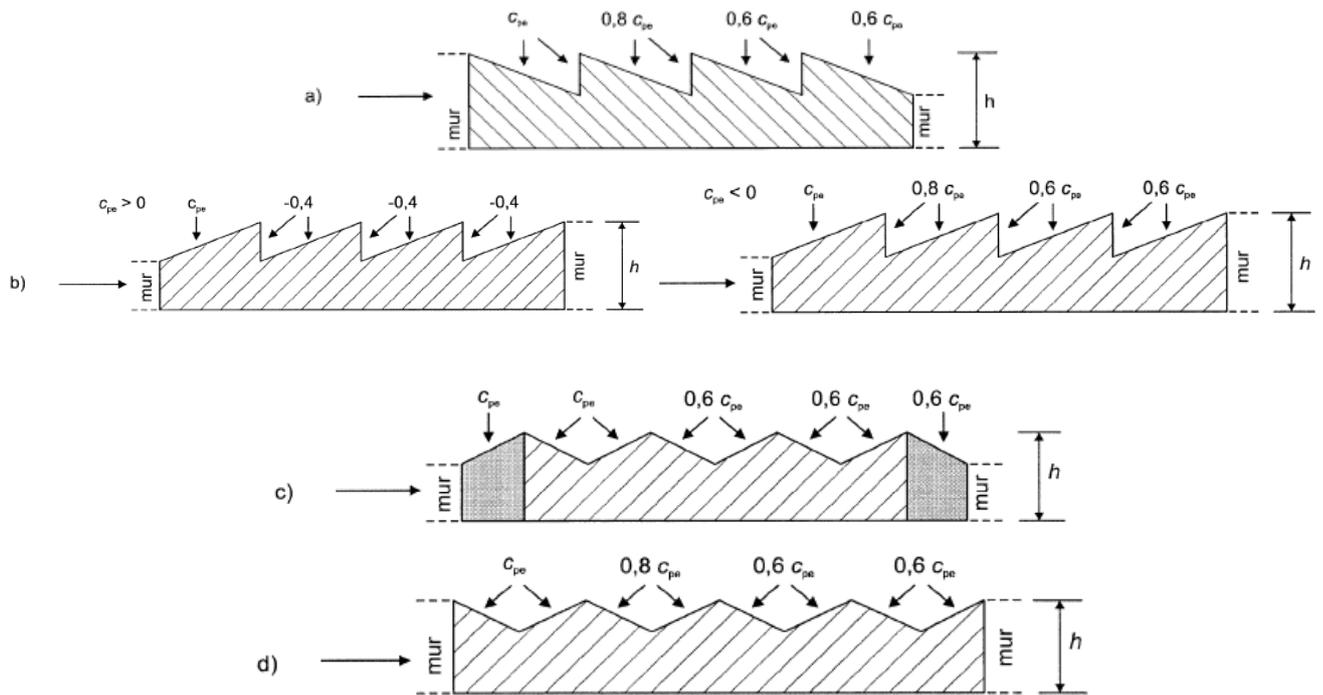


Tableau 7.5 — Coefficients de pression extérieure applicables aux toitures à quatre versants des bâtiments

Angle de pente α_0 pour $\theta = 0^\circ$ α_{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		
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	
5°	-1,7	-2,5	-1,2	-2,0	-0,6	-1,2													
	+ 0,0		+ 0,0		+ 0,0		- 0,3		- 0,6		- 0,6		- 1,2	- 2,0	- 0,6	- 1,2		- 0,4	
15°	-0,9	-2,0	-0,8	-1,5		-0,3													
	+ 0,2		+ 0,2		+ 0,2		- 0,5		- 1,0		- 1,5		- 1,2	- 2,0	- 1,4	- 2,0	- 0,6	- 1,2	- 0,3
30°	-0,5	-1,5	-0,5	-1,5		-0,2													
	+ 0,5		+ 0,7		+ 0,4		- 0,4		- 0,7		- 1,2		- 0,5	- 1,4	- 2,0	- 0,8	- 1,2		- 0,2
45°	-0,0		-0,0			-0,0													
	+ 0,7		+ 0,7		+ 0,6		- 0,3		- 0,6		- 0,3		- 1,3	- 2,0	- 0,8	- 1,2			- 0,2
60°	+ 0,7		+ 0,7			+ 0,7													
	+ 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													
	+ 0,8		+ 0,8		+ 0,8		- 0,3		- 0,6		- 0,3		- 1,2	- 2,0	- 0,4				- 0,2

3.2.1.f Coefficients de pression externe pour les toitures multiples (shed)

Les coefficients de pression dans ce cas sont calculés par modification des coefficients pour les toitures à un et deux versants en se basant sur la figure ci dessus



Pour le cas b) dans la figure il convient de considérer deux cas selon le signe du coefficient de pression c_{pe} applicable à la première toiture.

Dans la configuration c, la première valeur c_{pe} est la valeur c_{pe} de la toiture à un seul versant, la deuxième valeur et toutes les valeurs suivantes c_{pe} sont les valeurs c_{pe} de la toiture à deux versants à noue

3.2.2 Coefficients de pression interne pour les bâtiments

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

Dans le cas d'un bâtiment ayant une face dominante, il convient de considérer la pression intérieure comme une fraction de la pression extérieure au niveau des ouvertures de la face dominante. (Une face d'un bâtiment est considérée comme dominante lorsque l'aire des ouvertures dans ladite face est au moins égale à deux fois l'aire des ouvertures et des fuites d'air dans les autres faces du bâtiment). Dans ces cas le coefficient interne est calculé par:

$$c_{pi} = 0,75 \cdot c_{pe} \quad (\text{Eq.7.1 de la norme})$$

ou

$$c_{pi} = 0,90 \cdot c_{pe} \quad (\text{Eq.7.2 de la norme})$$

L'équation 7.1 est utilisée lorsque les ouvertures dans la face dominante sont 2 à 3 fois plus grandes que celles des autres faces tandis que 7.2 lorsque elles sont plus que 3 fois plus grandes.

- Pour les bâtiments sans face dominante, il convient de déterminer le coefficient de pression intérieure c_{pi} en utilisant le graphique ci-dessous (Figure 7.13 de la norme), en fonction du rapport de la hauteur à la profondeur du bâtiment, h/d , et du rapport d'ouverture μ pour chaque direction du vent h , qu'il y a lieu de déterminer à partir de l'expression suivante :

$$\mu = \frac{\sum \text{aire des ouvertures où } c_{pe} \text{ est négatif ou égal à } 0}{\sum \text{aire de toutes les ouvertures}} \quad (\text{Eq.7.3 de la norme})$$

Lorsqu'il se révèle impossible, ou lorsqu'il n'est pas considéré justifié d'évaluer μ pour un cas particulier, il convient alors de donner à c_{pi} la valeur la plus sévère de + 0,2 et - 0,3.

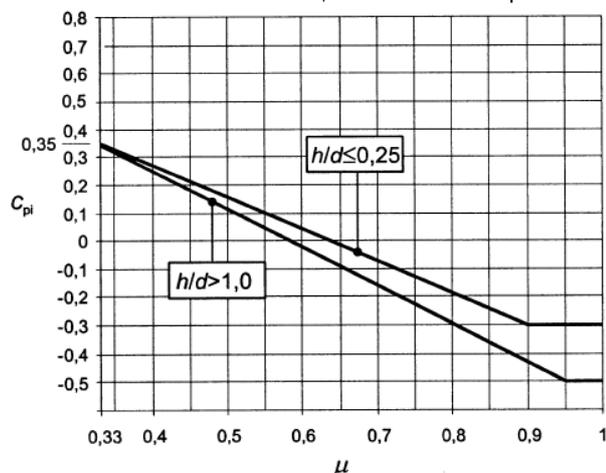


Figure 7.13 — Coefficients de pression intérieure applicables pour des ouvertures uniformément réparties

La hauteur de référence z_i pour les pressions intérieures est égale à la hauteur de référence z_e pour les pressions extérieures exercées sur les faces qui contribuent, par leurs ouvertures, à la création de la pression intérieure. Lorsqu'il existe plusieurs ouvertures, il est recommandé d'utiliser la plus grande valeur de z_e pour déterminer z_i .

Le coefficient de la pression interne appliqué aux silos et aux cheminées est de $c_{pi} = -0,6$, tandis que pour les réservoirs ventilés par ouvertures de petites dimensions $c_{pi} = -0,4$.

Lorsque, 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 face, il convient de les calculer comme des éléments (murs ou toits) isolés.

3.3 Toitures isolées

Une toiture isolée est définie comme la toiture d'une construction ne comportant pas de murs permanents, telles que stations-service, hangars agricoles ouverts, etc.

Pour ces objets on définit le coefficient de force globale (représentant la force résultante) et le coefficient de pression nette (la différence entre la pression externe et interne) représentant la pression locale maximale pour toutes directions du vent. Il est recommandé d'utiliser ce dernier pour le calcul des éléments de toiture et des fixations.

On définit le degré d'obstruction d'une toiture isolée ϕ , comme étant le rapport de l'aire des obstructions éventuelles (mais vraisemblables) sous la toiture, divisée par l'aire de la section transversale sous la voûte, les deux aires étant mesurées perpendiculairement à la direction du vent.

Les coefficients de force globale, c_f , et les coefficients de pression nette $C_{p,net}$, indiqués dans les tableaux 7.6 à 7.8 pour $\phi = 0$ et $\phi = 1$ tiennent compte de l'effet combiné du vent agissant à la fois sur les surfaces supérieure et inférieure des toitures isolées quelles que soient les directions du vent. Les valeurs intermédiaires peuvent être déterminées par interpolation linéaire.

Pour une toiture isolée à un seul versant (figure ci-dessous) le centre de pression est à $d/4$ à partir du bord exposé au vent (d = dimension dans la direction du vent).

Les zones à considérer dans le cas d'une toiture isolée sont indiquées sur la figure ci-dessous et les coefficients dans le tableau 7.6

Pour les éléments situés, dans la direction du vent, au-delà de la position de l'obstruction maximale il convient de garder le même coefficient que pour la direction 0°.

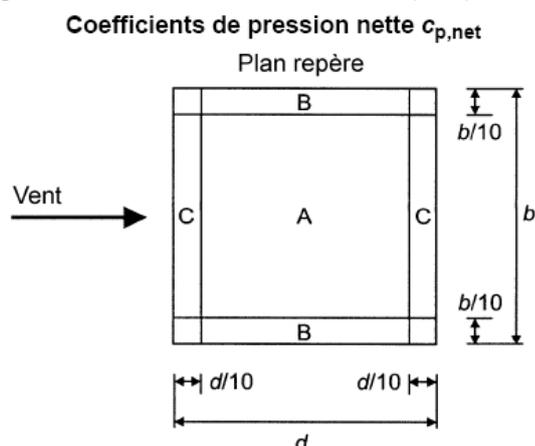
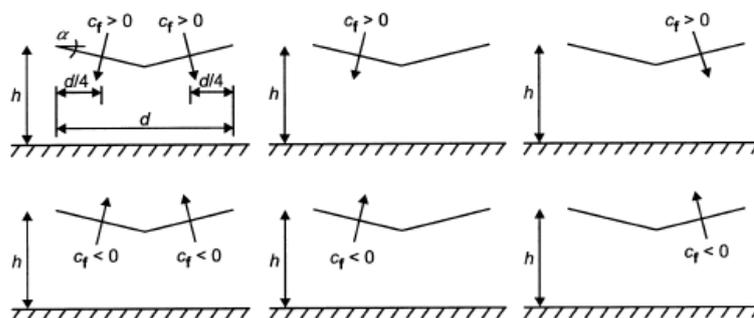
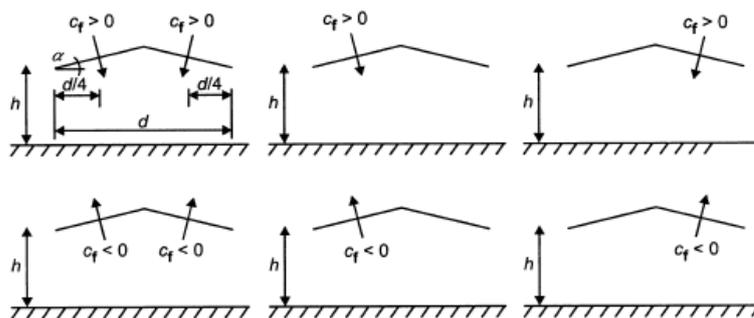


Tableau 7.6 — Valeurs de $c_{p,net}$ et c_f pour les toitures isolées à un seul versant

Angle de toiture α	Obstruction u	Coefficients de force globaux c_f	Zone A	Zone B	Zone C
0°	Maximum, quel que soit ϕ	+ 0,2	+ 0,5	+ 1,8	+ 1,1
	Minimum $\phi = 0$	- 0,5	- 0,6	- 1,3	- 1,4
	Minimum $\phi = 1$	- 1,3	- 1,5	- 1,8	- 2,2
5°	Maximum, quel que soit ϕ	+ 0,4	+ 0,8	+ 2,1	+ 1,3
	Minimum $\phi = 0$	- 0,7	- 1,1	- 1,7	- 1,8
	Minimum $\phi = 1$	- 1,4	- 1,6	- 2,2	- 2,5
10°	Maximum, quel que soit ϕ	+ 0,5	+ 1,2	+ 2,4	+ 1,6
	Minimum $\phi = 0$	- 0,9	- 1,5	- 2,0	- 2,1
	Minimum $\phi = 1$	- 1,4	- 2,1	- 2,6	- 2,7
15°	Maximum, quel que soit ϕ	+ 0,7	+ 1,4	+ 2,7	+ 1,8
	Minimum $\phi = 0$	- 1,1	- 1,8	- 2,4	- 2,5
	Minimum $\phi = 1$	- 1,4	- 1,6	- 2,9	- 3,0
20°	Maximum, quel que soit ϕ	+ 0,8	+ 1,7	+ 2,9	+ 2,1
	Minimum $\phi = 0$	- 1,3	- 2,2	- 2,8	- 2,9
	Minimum $\phi = 1$	- 1,4	- 1,6	- 2,9	- 3,0
25°	Maximum, quel que soit ϕ	+ 1,0	+ 2,0	+ 3,1	+ 2,3
	Minimum $\phi = 0$	- 1,6	- 2,6	- 3,2	- 3,2
	Minimum $\phi = 1$	- 1,4	- 1,5	- 2,5	- 2,8
30°	Maximum, quel que soit ϕ	+ 1,2	+ 2,2	+ 3,2	+ 2,4
	Minimum $\phi = 0$	- 1,8	- 3,0	- 3,8	- 3,6
	Minimum $\phi = 1$	- 1,4	- 1,5	- 2,2	- 2,7

NOTE Le signe + indique une action nette du vent descendante et le signe - une action nette ascendante.

Pour une toiture isolée à deux versants (Tableau 7.7), il convient de placer le centre de pression au centre de chaque versant (voir la figure de zonage ci-dessous). Il est par ailleurs recommandé qu'une toiture isolée à deux versants puisse résister à un chargement maximal ou minimal sur un de ses versants, l'autre versant ne recevant pas de charge ;



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

Plan repère

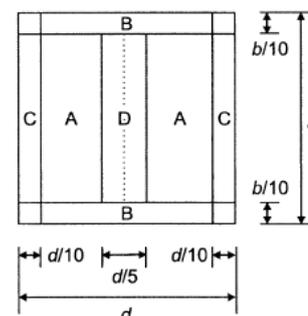


Tableau 7.7 — Valeurs de $c_{p,net}$ et c_f pour les toitures isolées à deux versants

Angle de toiture α [°]	Obstruction u	Coefficient de force globale c_f	Tableau			
			Zone A	Zone B	Zone C	Zone D
- 20	Maximum, quel que soit u	+ 0,7	+ 0,8	+ 1,6	+ 0,6	+ 1,7 -
	Minimum u = 0	- 0,7	- 0,9	- 1,3	- 1,6	0,6
	Minimum u = 1	- 1,3	- 1,5	- 2,4	- 2,4	- 0,6
- 15	Maximum, quel que soit u	+ 0,5	+ 0,6	+ 1,5	+ 0,7	+ 1,4 -
	Minimum u = 0	- 0,6	- 0,8	- 1,3	- 1,6	0,6
	Minimum u = 1	- 1,4	- 1,6	- 2,7	- 2,6	- 0,6
- 10	Maximum, quel que soit u	+ 0,4	+ 0,6	+ 1,4	+ 0,8	+ 1,1 -
	Minimum u = 0	- 0,6	- 0,8	- 1,3	- 1,5	0,6
	Minimum u = 1	- 1,4	- 1,6	- 2,7	- 2,6	- 0,6
- 5	Maximum, quel que soit u	+ 0,3	+ 0,5	+ 1,5	+ 0,8	+ 0,8 -
	Minimum u = 0	- 0,5	- 0,7	- 1,3	- 1,6	0,6
	Minimum u = 1	- 1,3	- 1,5	- 2,4	- 2,4	- 0,6
+ 5	Maximum, quel que soit u	+ 0,3	+ 0,6	+ 1,8	+ 1,3	+ 0,4 -
	Minimum u = 0	- 0,6	- 0,6	- 1,4	- 1,4	1,1
	Minimum u = 1	- 1,3	- 1,3	- 2,0	- 1,8	- 1,5
+ 10	Maximum, quel que soit u	+ 0,4	+ 0,7	+ 1,8	+ 1,4	+ 0,4 -
	Minimum u = 0	- 0,7	- 0,7	- 1,5	- 1,4	1,4
	Minimum u = 1	- 1,3	- 1,3	- 2,0	- 1,8	- 1,8
+ 15	Maximum, quel que soit u	+ 0,4	+ 0,9	+ 1,9	+ 1,4	+ 0,4 -
	Minimum u = 0	- 0,8	- 0,9	- 1,7	- 1,4	1,8
	Minimum u = 1	- 1,3	- 1,3	- 2,2	- 1,6	- 2,1
+ 20	Maximum, quel que soit u	+ 0,6	+ 1,1	+ 1,9	+ 1,5	+ 0,4 -
	Minimum u = 0	- 0,9	- 1,2	- 1,8	- 1,4	2,0
	Minimum u = 1	- 1,3	- 1,4	- 2,2	- 1,6	- 2,1
+ 25	Maximum, quel que soit u	+ 0,7	+ 1,2	+ 1,9	+ 1,6	+ 0,5 -
	Minimum u = 0	- 1,0	- 1,4	- 1,9	- 1,4	2,0
	Minimum u = 1	- 1,3	- 1,4	- 2,0	- 1,5	- 2,0
+ 30	Maximum, quel que soit u	+ 0,9	+ 1,3	+ 1,9	+ 1,6	+ 0,7 -
	Minimum u = 0	- 1,0	- 1,4	- 1,9	- 1,4	2,0
	Minimum u = 1	- 1,3	- 1,4	- 1,8	- 1,4	- 2,0

NOTE Le signe + indique une action nette du vent descendante et le signe - une action nette du vent ascendante.

Dans le cas d'une toiture isolée multiple, comportant plusieurs travées, le chargement de chaque travée peut être calculé en appliquant les coefficients de réduction ϕ_{mc} indiqués dans le tableau ci-dessous aux valeurs $c_{p,net}$ données dans le Tableau 7.7.

Baie	Emplacement	Coefficients ϕ_{mc}	
		sur coefficients de force et de pression maximum	pour toutes valeurs de f
		(force et pression descendantes)	sur coefficients de force et de pression minimum (force et pression ascendantes)
1	Travée d'extrémité	1,0	0,8
2	Deuxième travée	0,9	0,7
3	Troisième travée et travées suivantes	0,7	0,7

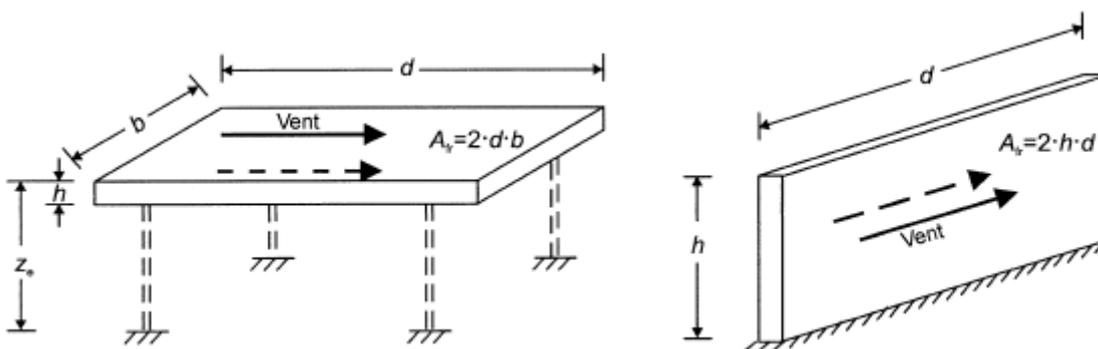
3.4. Coefficients de frottement

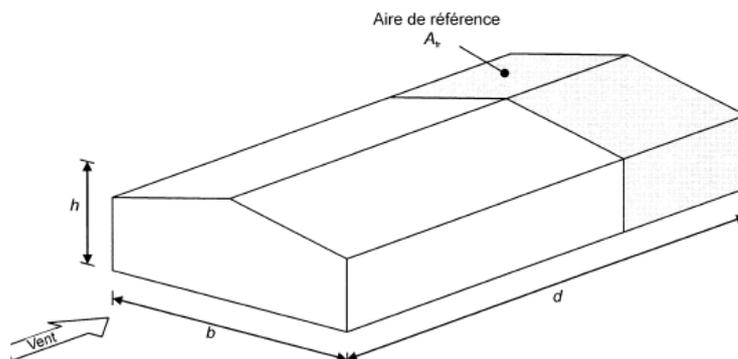
Il est recommandé d'utiliser les coefficients de frottement c_{fr} , pour les murs et les toitures, donnés dans le tableau ci dessous.

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, pliuures)	0,04

Les forces de frottement sont à appliquer aux surfaces extérieures parallèles au vent, situées au-delà d'une certaine distance des bords au vent ou des angles au vent de la toiture, distance égale à la plus petite valeur de $2b$ ou $4h$.

La hauteur de référence z_e qu'il convient d'utiliser est la hauteur au-dessus du sol de la construction ou la hauteur h du bâtiment.





3.5. Force du vent sur les éléments structuraux

On calcule la force d'action du vent sur les éléments structuraux en utilisant la formule suivante :

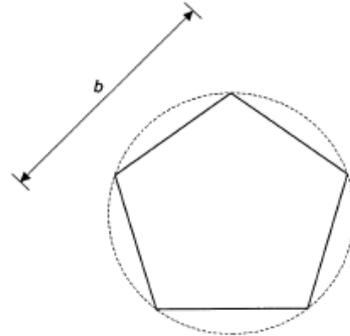
$$c_f = c_{f,0} \psi_\lambda$$

avec $c_{f,0}$ étant est le coefficient de force des éléments structuraux sans écoulement de contournement aux extrémités (donné dans le tableau ci-dessous) et ψ_λ est le coefficient d'extrémité défini plus loin pour une certain nombre de configurations.

(Tableau 7.11 du code) — Coefficient de force $c_{f,0}$ applicable aux sections polygonales régulières

Nombre de côtés	Sections	Conditions de surface et d'angle	Nombre de Reynolds Re	$c_{f,0}$
5	Pentagone	toutes surfaces et tous angles	tous nombres de Reynolds	1,80
6	Hexagone	toutes surfaces et tous angles	tous nombres de Reynolds	1,60
8	Octogone	surface lisse $r/b < 0,075 b$)	$Re \leq 2,4 \cdot 10^5$	1,45
			$Re \geq 3 \cdot 10^5$	1,30
		surface lisse $r/b \geq 0,075 b$)	$Re \leq 2 \cdot 10^5$	1,30
			$Re \geq 7 \cdot 10^5$	1,10
10	Décagone	toutes surfaces et tous angles	tous nombres de Reynolds	1,30
12	Dodécagone	surface lisse c) angles arrondis	$2 \cdot 10^5 < Re < 1,2 \cdot 10^6$	0,90
		toutes autres surfaces et tous autres angles	$Re < 4 \cdot 10^5$	1,30
			$Re > 4 \cdot 10^5$	1,10
16-18	Hexadécagone	surface lisse c) angles arrondis	$Re < 2 \cdot 10^5$	traiter comme un cylindre à base circulaire,
			$2 \cdot 10^5 \leq Re < 1,2 \cdot 10^6$	0,70

Rappelons que le nombre de Reynolds est défini comme $R_e = \frac{b \cdot v(z_e)}{\nu}$ avec b étant le diamètre hydraulique, et $\nu = 15 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ est la viscosité dynamique de l'air. L'aire de référence est calculée par la multiplication de b avec la dimension caractéristique de la structure dans la direction perpendiculaire avec b (figure).



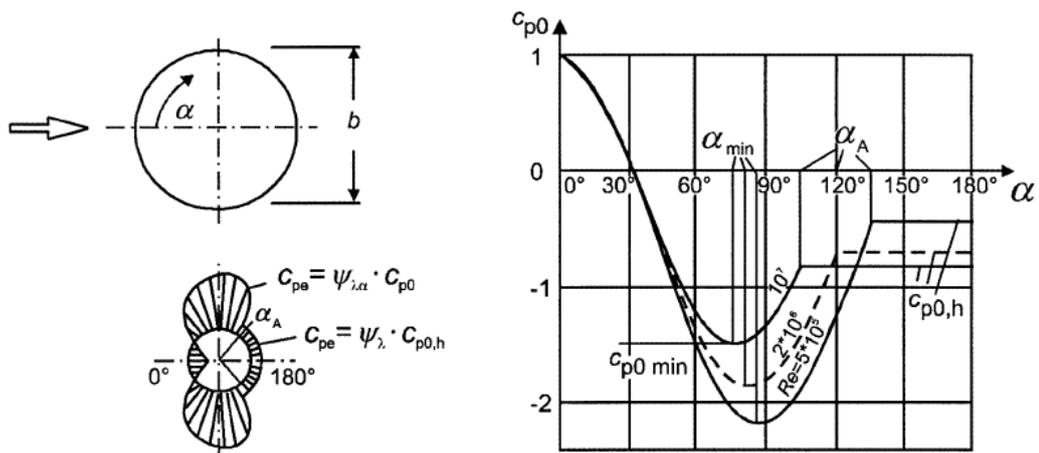
3.5.a Force du vent sur des cylindres à base circulaire

Dans ce cas le coefficient de la pression externe dépend de l'angle α tant et si bien qu'on calcul ce coefficient par la formule :

$c_{pe} = c_{p,0} \psi_{\lambda\alpha}$ avec $\psi_{\lambda\alpha}$ défini comme suivant

$$\psi_{\lambda\alpha} = \begin{cases} 1 & \text{pour } 0^\circ \leq \alpha \leq \alpha_{\min} \\ \psi_\lambda + (1 - \psi_\lambda) \cos\left(\frac{\pi}{2} \left(\frac{\alpha - \alpha_{\min}}{\alpha_A - \alpha_{\min}}\right)\right) & \text{pour } \alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_A \\ \psi_\lambda & \text{pour } \alpha_A \leq \alpha \leq \pi \end{cases}$$

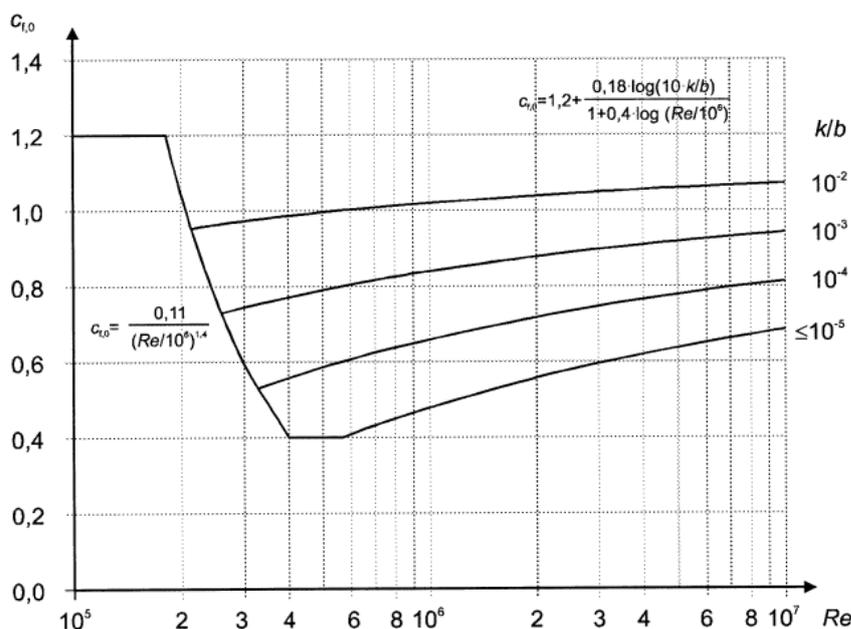
Avec α_A est le point de décollement de l'écoulement (voir figure)



Valeurs caractéristiques relatives à la répartition de la pression sur les cylindres à base circulaire pour différents nombres de Reynolds et sans effet d'extrémités (D'après le tableau 7.12)

Re	α_{\min}	$c_{p0,min}$	α_A	$cp_{0,h}$
$5 \cdot 10^5$	85	-2,2	135	-0,4
$2 \cdot 10^6$	80	-1,9	120	-0,7
107	75	-1,5	105	-0,8

Quant au coefficient de force sans écoulement de contournement aux extrémités ($c_{f,0}$) celui-ci est déduit du graphique suivant :



Cette figure peut également être utilisée pour un bâtiment avec un rapport $h/d > 5.0$. Le symbole k utilisé dans le graphique est la rugosité de surface donnée dans le tableau ci-dessous

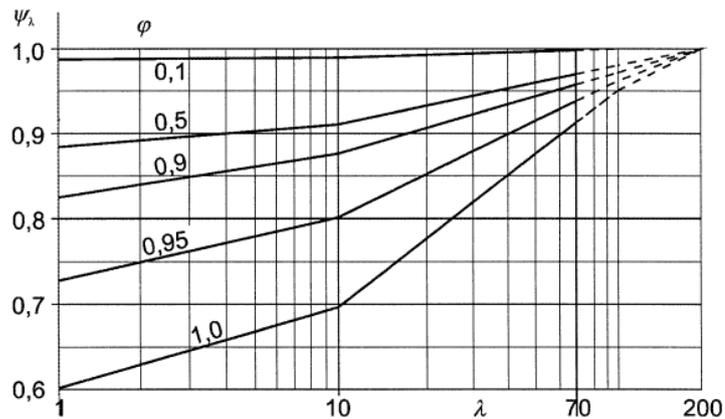
Type de surface	Rugosité équivalente k [mm]	Type de surface	Rugosité équivalente k [mm]
verre	0,0015	béton lisse	0,2
métal poli	0,002	bois raboté	0,5
peinture lisse	0,006	béton brut	1,0
peinture appliquée au pistolet	0,02	bois brut	2,0
acier (produits clairs)	0,05	rouille	2,0
fonte	0,2	maçonnerie de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

Des dispositions particulières sont à utiliser lorsque une distance z_g sépare le cylindre de la surface de terre telle que $z_g/b < 1.5$

Pour les cylindres verticaux disposés en file on multiplie le coefficient de force habituel par un coefficient amplificateur ($c_f = c_{f,0} \nu_\lambda \cdot \kappa$) avec des valeurs de κ qu'on trouvera ci-dessous:

a/b	κ
$a/b < 3,5$	1,15
$3,5 < a/b < 30$	$\kappa = \frac{210 - \frac{a}{b}}{180}$
$a/b > 30$	1,00

Pour conclure avec les forces sur les éléments structuraux il faudra donner le facteur d'extrémité ψ_λ . La norme le donne en forme d'un graphique en fonction du taux de remplissage ϕ ($\phi = A/A_c$: rapport des surfaces projetées de la structure avec l'air circonscrite) et l'élanement de la structure.



Élanement effective λ est précisé dans l'annexe nationale (reproduite le tableau ci-dessous) :

Tableau 7.16(NA) — Élanement effectif λ pour les constructions et éléments de constructi

N°	Position de la structure, vent perpendiculaire au plan de l'élément	Élanement effectif λ
1		$\lambda = \ell b$
2		$\lambda = 2\ell b$
3		$\lambda = \infty$ $(\psi_\lambda = 1)$