

Règles Neige et Vent NV 65

par **Jacques MAYÈRE**
Ingénieur INSA
Responsable de l'activité Charpente métallique du Bureau Veritas

1. Effets de la neige	C 3 305 – 2
1.1 Charges de neige en fonction des régions	— 2
1.2 Charges de neige en fonction de l'altitude.....	— 4
1.3 Charges de neige en fonction de la forme du toit	— 4
1.4 Effets combinés de la neige et du vent.....	— 6
2. Effets du vent.....	— 6
2.1 Définitions	— 6
2.2 Pressions dynamiques dues au vent	— 7
3. Effets du vent sur les constructions prismatiques à base quadrangulaire	— 12
3.1 Constructions reposant sur le sol.....	— 12
3.2 Constructions éloignées du sol	— 16
4. Effets du vent sur les constructions prismatiques à base polygonale régulière ou circulaire.....	— 16
5. Effets du vent sur les panneaux pleins et toitures isolées	— 18
5.1 Panneaux pleins.....	— 18
5.2 Toitures isolées	— 18
6. Effets du vent sur les constructions ajourées et constructions à treillis	— 20
6.1 Éléments plans.....	— 20
6.2 Ensembles prismatiques.....	— 21
7. Actions perpendiculaires à la direction du vent.....	— 22
8. Calcul de la période propre du mode de vibration d'une construction	— 23

La mise en place progressive de la réglementation européenne aussi bien au niveau des Eurocodes structuraux qu'à celui des Eurocodes actions perturbe fortement l'environnement normatif français par les « philosophies » d'approches nouvelles sur lesquelles elle est basée.

Il se pose aussi le problème de la compatibilité entre les textes de la réglementation européenne et ceux actuellement en vigueur en France.

En France, les règles définissant les effets de la neige et du vent sur les constructions sont d'actualité depuis 1965 (règles NV 65).

Bien que ces règles aient déjà subi des mises à jour, en particulier au niveau du zonage pour les actions de la neige, il s'avérait nécessaire d'exploiter les nombreuses mesures et observations météorologiques faites depuis cette date et de mettre à jour ce règlement en conséquence. Les règles NV 65 sont toujours d'application pour les constructions dont le matériau constitutif ne dispose pas de règles de dimensionnement aux états limites.

Les textes actuellement disponibles en France pour la détermination des actions de la neige et du vent sur les constructions sont les suivants :

Règles NV 65 (référence Afnor DTU P 06-002) accompagnées de :

- modificatif n° 2 de décembre 1999 relatif à la carte des zones de vent ;
- modificatif n° 3 d'avril 2000 relatif aux charges de neige.

Règles N 84 de septembre 1996 accompagnées de :

- modificatif n° 1 d'avril 2000 (référence Afnor DTU P 06-006).

XP ENV 1991-2.3 d'octobre 1997

Eurocode 1 : Bases de calcul et actions sur les structures et document d'application nationale.

Partie 2.3. – Actions sur les structures. Charges de neige.

ENV 1991-2.4

Eurocode 1 : Bases de calcul et actions sur les structures.

Partie 2.4. – Actions sur les structures. Action du vent (document d'application nationale DAN en cours d'élaboration).

Les règles NV 65 fixent les valeurs des charges de la neige et du vent et permettent d'évaluer les efforts correspondant agissant sur la structure d'une construction.

Rédigées en 1965, elles ont fait l'objet d'annexes, de révisions, d'addenda en 1967, 1970, 1975, 1976, 1985 (carte neige), 1996 (carte neige), 1999 (carte vent) et 2000 (accumulation de la neige).

Les modifications n° 2 et 3 des règles NV 65 sont une approche d'harmonisation de ces différents textes aussi bien au niveau du zonage du territoire français et des DOM-TOM pour les actions de la neige et du vent qu'à celui de la prise en compte des phénomènes d'accumulation de la neige sur les toitures.

Rappelons enfin que les Eurocodes, documents d'application nationale DAN, ne sont applicables que s'il y est fait explicitement référence :

- au cahier des clauses administratives particulières pour les marchés publics ;
- aux documents particuliers du marché tels que définis dans la norme NF P 03-001 pour les marchés privés.

1. Effets de la neige

En 1985, les **nouvelles règles N 84** (référence Afnor DTU P 06-006), portant sur l'**action de la neige sur les constructions**, sont apparues. Elles ont été rendues d'application obligatoire, en remplacement de la partie neige des règles NV 65 **pour les constructions en béton relevant des règles de calcul BAEL et BPEL** (règlements aux états limites).

Pour les autres matériaux comme l'acier, l'aluminium et le bois, la **partie neige des règles NV 65 est toujours d'application** mais avec la **carte neige des règles N 84**, les valeurs de charge par zone étant adaptées.

En effet, si les règles N 84 définissent les charges au sol (S_o) les règles NV 65 définissent les charges sur toiture, ces deux valeurs étant liées par le coefficient de forme μ ($\mu = 0,8$ pour une toiture plate).

1.1 Charges de neige en fonction des régions

Dans le cadre de l'application des règles NV 65, il faut prendre en compte, depuis 1996, trois niveaux de charge de neige :

- charge **normale** ;
- charge **extrême** ;
- charge **accidentelle**.

Depuis 1996, le territoire français comprend **6 zones** (figure 1 et tableaux 1 et 2) ; les valeurs des charges (tableau 3) varient en fonction de ce zonage.

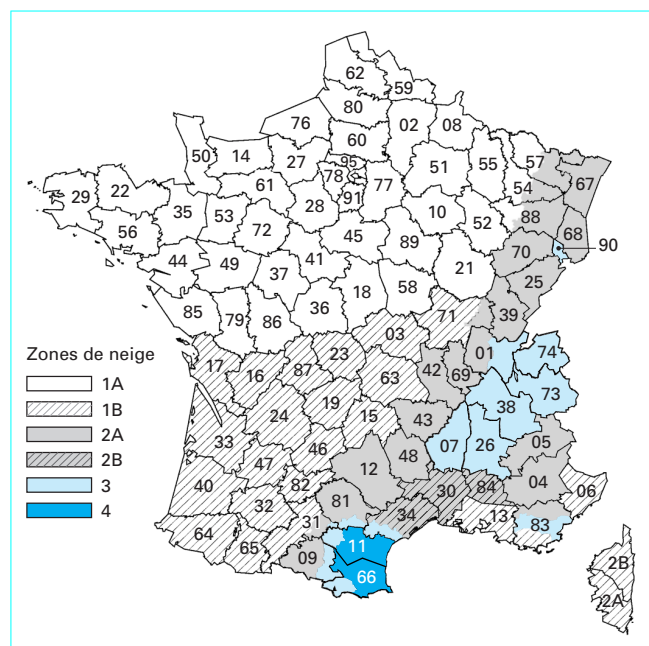


Figure 1 – Effets de la neige. Définition du zonage de la France

Tableau 1 – Charges de neige : définition des zones par départements

Zone	Départements
1A	Aisne, Ardennes, Aube, Calvados, Cher, Côte-d'Or, Côtes-d'Armor, Eure, Eure-et-Loir, Finistère, Ille-et-Vilaine, Indre, Indre-et-Loire, Loir-et-Cher, Loire-Atlantique, Loiret, Maine-et-Loire, Manche, Marne, Haute-Marne, Mayenne, Meurthe et Moselle(*), Meuse, Morbihan, Moselle(*), Nièvre, Nord, Oise, Orne, Pas-de-Calais, Paris, Sarthe, Seine-Maritime, Yvelines, Deux-Sèvres, Somme, Vendée, Vienne, Vosges(*), Yonne, Essonne, Hauts-de-Seine, Seine-et-Marne, Seine-Saint-Denis, Val-de-Marne, Val-d'Oise.
1B	Allier, Alpes-Maritimes, Bouches-du-Rhône, Cantal, Charente, Charente-Maritime, Corrèze, Haute-Corse, Corse-du-Sud, Creuse, Dordogne, Haute-Garonne(*), Gers, Gironde, Landes, Lot, Lot-et-Garonne, Puy-de-Dôme, Pyrénées-Atlantiques, Hautes-Pyrénées, Saône-et-Loire(*), Tarn-et-Garonne, Var(*), Haute-Vienne.
2A	Ain(*), Alpes-de-Haute-Provence, Hautes-Alpes, Ariège(*), Aveyron, Doubs, Haute-Garonne(*), Jura, Loire, Haute-Loire, Lozère, Meurthe-et-Moselle(*), Moselle(*), Bas-Rhin, Haut-Rhin, Rhône, Haute-Saône, Saône-et-Loire(*), Tarn(*), Var(*), Vosges(*)
2B	Gard, Hérault(*), Vaucluse.
3	Ain(*), Ardèche, Ariège(*), Aude(*), Drôme, Haute-Garonne(*), Hérault(*), Isère, Pyrénées-Orientales(*), Savoie, Haute-Savoie, Tarn(*), Var(*), Territoire-de-Belfort.
4	Aude(*), Pyrénées-Orientales(*)
(*) Pour une partie du département (voir tableau 2).	

Tableau 2 – Départements appartenant à plusieurs zones : découpage selon les cantons

Département	Zone(s)	Cantons
Ain	2A	Bâgé-le-Chatel, Bourg-en-Bresse (tous cantons), Chalamont, Châtillon-sur-Chalaronne, Coligny, Meximieux, Miribel, Montluel, Montrevel-en-Bresse, Péronnas, Pont-d'Ain, Pont-de-Vaux, Ponte-de-Veyle, Reyrieux, Saint-Trivier-de-Courtes, Saint-Trivier-sur-Moignans, Thoissey, Trévieux, Villars-les-Dombes, Viriat
	3	Tous les autres cantons
Ariège	3	Ax-les-Thermes, Cabannes (Les), Lavelanet, Mirepoix, Querigut
	2A	Tous les autres cantons
Aude	3	Belpech, Castelnaudary (tous cantons), Fangeaux, Salles-sur-l'Hers
	4	Tous les autres cantons
Haute-Garonne	2A	Caraman, Cintegabelle, Lanta, Montgiscard, Nailloux, Villefranche-de-Lauragais
	3	Revel
	1B	Tous les autres cantons
Hérault	3	Béziers (tous cantons), Capetang, Olonzac, Saint-Chinian, Saint-Pons-de-Thomières
	2B	Tous les autres cantons
Meurthe-et-Moselle	2A	Arracourt, Baccarat, Badanviller, Bayon, Blâmont, Cirey-sur-Vezouze, Gerbéviller, Harroué, Lunéville (tous cantons)
	1A	Tous les autres cantons
Moselle	2A	Alberstroff, Behren-lès-Forbach, Bitche, Château-Salins, Dieuze, Fénétrange, Forbach, Freymong-Merlebach, Grostenquin, Lorquin, Phalsbourg, Réchicourt-le-Château, Rohrbach-lès-Bitche, Saint-Avold (tous cantons), Sarralbe, Sarrebourg, Sarreguemines, Sarreguemines-Campagne, Stiring-Wendel, Vic-sur-Selle, Valmuster
	1A	Tous les autres cantons
Pyrénées-Orientales	3	Mont-Louis, Olette, Sallégouse
	4	Tous les autres cantons
Saône-et-Loire	2A	Beaurepaire-en-Bresse, Cuiseaux, Cuisery, Louhans, Montpont-en-Bresse, Montret, Pierre-de-Bresse, Saint-Germain-du-Bois, Tournus
	1B	Tous les autres cantons
Tarn	3	Dourgne, Labruguière, Mazamet (tous cantons), Saint-Amant-Soul
	2A	Tous les autres cantons
Var	2A	Aups, Callas, Camps-sur-Artuby, Draguignan, Fayence, Rians, Salernes, Tavernes
	3	Barjols, Bresse-sur-Issole, Brignoles, Cotignac, Fréjus, Grimaud, Lagues, Luc (Le), Saint-Maximin-la-Sainte-Baume, Saint-Raphaël, Saint-Tropez
	1B	Tous les autres cantons
Vosges	1A	Bulgnéville, Châtenois, Coussey, Lamarche, Mirecourt, Neufchâteau, Vittel
	2A	Tous les autres cantons

Tableau 3 – Charges dues à la neige jusqu'à 200 m d'altitude suivant les zones (valeurs au sens des NV 65)

Niveau de charge	Zones					
	1A	1B	2A	2B	3	4
Charge normale..... p_{no} (daN/m ²)	35	35	45	45	55	80
Charge extrême..... p'_{no} (daN/m ²)	60	60	75	75	90	130
Charge accidentelle..... p''_{no} (daN/m ²)		80	80	108	108	144

L'alinéa « Pour Perpignan... majoration de 45 % » situé sous le tableau 1 des règles NV n'a pas à être appliqué compte tenu des nouvelles zones.

La charge accidentelle a été introduite pour tenir compte des fortes chutes de neige à basse altitude de 1990.

La valeur de la charge accidentelle est indépendante de l'altitude de la construction. Elle est à prendre en compte si elle est plus défavorable que la valeur de la charge extrême corrigée en fonction de l'altitude. Elle remplace alors la charge extrême.

Cas de Saint-Pierre-et-Miquelon

En l'absence d'analyse statistique propre à ce département, le règlement N 84 se réfère au Code canadien, ce qui conduit, au sens des NV 65, à prendre en compte pour ce département une charge normale de neige de 210 daN/m² et une charge extrême de 340 daN/m².

À noter que la charge de neige est toujours à considérer par référence à la surface projetée de la toiture sur laquelle elle agit.

1.2 Charges de neige en fonction de l'altitude

Les charges normales et extrêmes de neige doivent être majorées en fonction de l'altitude de la construction. Jusqu'à 200 m d'altitude, les charges verticales sont données dans le tableau 3.

Au-delà de 200 m d'altitude et jusqu'à 2 000 m, les charges normales et extrêmes doivent être majorées comme indiqué dans le tableau 4.

En montagne, des charges plus importantes peuvent être prescrites, en fonction des conditions locales, par la maîtrise d'œuvre. Au-delà de 2 000 m, le cahier des charges doit obligatoirement préciser les charges à prendre en compte.

Tableau 4 – Majorations des charges dues à la neige pour une altitude A supérieure à 200 m

Altitude (m)	Charges (1)	
	normales p_n (daN/m ²)	extrêmes p'_n (daN/m ²)
200 < A < 500	$p_{no} + \frac{A-200}{10}$	$p'_{no} + \frac{A-200}{6}$
500 < A < 1 500	$p_{no} + 30 + \frac{A-500}{4}$	$p'_{no} + 50 + \frac{A-500}{2,4}$
1 500 < A < 2 000	$p_{no} + 280 + \frac{A-1500}{2,5}$	$p'_{no} + 467 + \frac{A-1500}{1,5}$

(1) p_{no} et p'_{no} sont définis dans le tableau 3.

1.3 Charges de neige en fonction de la forme du toit

Influence de la pente de la toiture

Les valeurs des charges de neige définies aux tableaux 3 et 4 sont à appliquer à la surface projetée de la toiture tant que sa pente ne dépasse pas 25°. **Au-delà de 25°, les valeurs doivent être réduites de 2 % par degré d'inclinaison supplémentaire** lorsque rien ne s'oppose au glissement de la neige.

Accumulations de la neige. Cas courants

Le modificatif n° 3 des règles NV 65 (avril 2000) concerne l'accumulation de neige rendue possible dans certaines zones de toiture soit par la présence d'obstacles soit par la forme du toit.

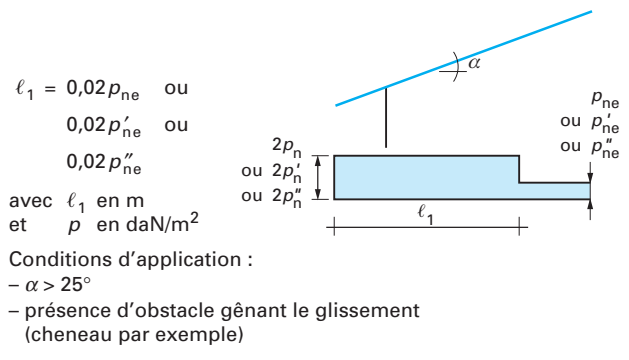
Un nouvel article 3.3. a été ajouté au texte initial pour traiter ce problème. L'annexe 1 des précédentes éditions des règles NV 65 est donc annulée.

Notations

p_n, p_{ne}, p_{n1}	: concernent les charges normales.
p'_n, p'_{ne}, p'_{n1}	: concernent les charges extrêmes.
$p''_n, p''_{ne}, p''_{n1}$	: concernent les charges accidentelles.
p_n, p'_n, p''_n	: sont les charges définies aux tableaux 3 et 4.
p_{ne}, p'_{ne} et p''_{ne}	: sont les charges réduites en fonction de la pente.
p_{n1}, p'_{n1} et p''_{n1}	: sont les charges définies sur les figures 2 à 8).

$$\ell_1 = 0,02 p_{ne} \text{ ou } 0,02 p'_{ne} \text{ ou } 0,02 p''_{ne}$$

avec ℓ_1 en m
et p en daN/m²

**Figure 2 – Bords de toiture (altitude < 500 m)**

$$\ell_1 = 0,01 p_{ne} \text{ ou}$$

$$0,01 p'_{ne} \text{ ou}$$

$$0,01 p''_{ne}$$

$$\ell_2 = \ell_1/2$$

avec ℓ_1 et ℓ_2 en m
et p en daN/m²

Conditions d'application :

– toiture ne comportant pas de dispositif de retenue

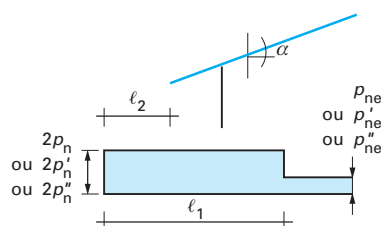


Figure 3 – Bords de toiture (altitude > 500 m)

■ Cas de charges normales et extrêmes

- Si $\alpha \leq 15^\circ$:

$$p_{n1} = p_{n2} = p_n \text{ et } p'_{n1} = p'_{n2} = p'_n \text{ (répartition uniforme)}$$

- Si $15^\circ < \alpha \leq 25^\circ$:

$$p_{n1} = p_n \left[1 + \frac{(\alpha - 15)}{10} \right] \text{ et } p_{n2} = p_n \left[1 - 0,5 \frac{(\alpha - 15)}{10} \right]$$

$$p'_{n1} = p'_n \left[1 + \frac{(\alpha - 15)}{10} \right] \text{ et } p'_{n2} = p'_n \left[1 - 0,5 \frac{(\alpha - 15)}{10} \right]$$

- Si $25^\circ < \alpha \leq 50^\circ$:

$$p_{n1} = 2p_n \text{ et } p_{n2} = p_n \left[0,5 - 0,5 \frac{(\alpha - 25)}{50} \right]$$

$$p'_{n1} = 2p'_n \text{ et } p'_{n2} = p'_n \left[0,5 - 0,5 \frac{(\alpha - 25)}{50} \right]$$

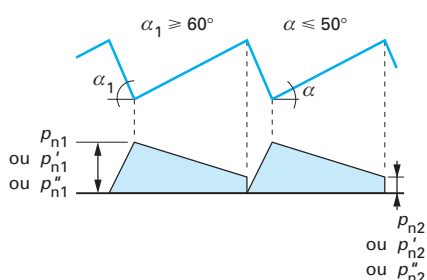
■ Cas de charges accidentelles

- si $\alpha \leq 25^\circ$:

$$p''_{n1} = p''_{n2} = p''_n \text{ (répartition uniforme)}$$

- si $25^\circ < \alpha \leq 50^\circ$:

$$p''_{n1} = p''_n \left[1 + \frac{(\alpha - 25)}{50} \right] \text{ et } p''_{n2} = p''_n \left[1 - 0,5 \frac{(\alpha - 25)}{50} \right]$$



Si $\alpha > 50^\circ$, une étude particulière est à faire.

Figure 4 – Toitures multiples à redans (sheds)

■ Cas des obstacles locaux

$$p_{n1} = \min (200 h ; 2,5 p_n)$$

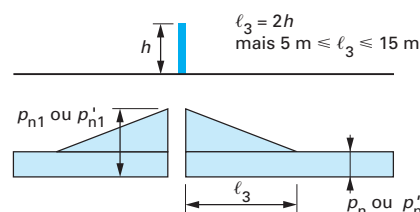
$$p'_{n1} = \min (330 h ; 2,5 p'_n)$$

■ Cas des acrotères

$$p_{n1} = \min (200 h ; 2,0 p_n)$$

$$p'_{n1} = \min (330 h ; 2,0 p'_n)$$

avec h en m et les charges en daN/m²



Conditions d'application : $\alpha < 15^\circ$; $p_{n1} \geq p_n$; $p'_{n1} \geq p'_n$

La toiture doit être calculée :

- sous surcharge uniforme p_n , p'_n et p''_n
- sous surcharge non uniforme suivant schéma ci-dessus

Figure 5 – Saillies et obstacles locaux

■ Cas de charges normales et extrêmes

- Si $\alpha \leq 15^\circ$

$$p_{n1} = p_{n2} = p_n \text{ et } p'_{n1} = p'_{n2} = p'_n \text{ (répartition uniforme)}$$

- Si $15^\circ < \alpha \leq 25^\circ$

$$p_{n1} = p_n \left[1 + \frac{(\alpha - 15)}{10} \right] \text{ et } p_{n2} = p_n \left[1 - 0,5 \frac{(\alpha - 15)}{10} \right]$$

$$p'_{n1} = p'_n \left[1 + \frac{(\alpha - 15)}{10} \right] \text{ et } p'_{n2} = p'_n \left[1 - 0,5 \frac{(\alpha - 15)}{10} \right]$$

- Si $25^\circ < \alpha \leq 75^\circ$

$$p_{n1} = 2p_n \text{ et } p_{n2} = p_n \left[0,5 - 0,5 \frac{(\alpha - 25)}{50} \right]$$

$$p'_{n1} = 2p'_n \text{ et } p'_{n2} = p'_n \left[0,5 - 0,5 \frac{(\alpha - 25)}{50} \right]$$

■ Cas de charges accidentelles

- Si $\alpha \leq 25^\circ$

$$p''_{n1} = p''_{n2} = p''_n \text{ (répartition uniforme)}$$

- Si $25^\circ < \alpha \leq 75^\circ$

$$p''_{n1} = p''_n \left[1 + \frac{(\alpha - 25)}{50} \right] \text{ et } p''_{n2} = p''_n \left[1 - \frac{(\alpha - 25)}{50} \right]$$

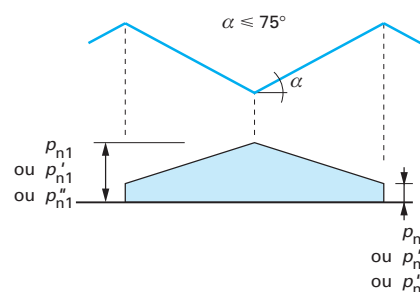
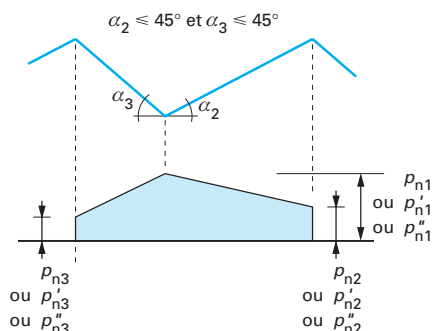


Figure 6 – Nœuds des toits multiples à versants symétriques



Les charges p_{n1} , p'_{n1} , p''_{n1} prennent les valeurs définies pour les versants symétriques pour la valeur de $\alpha = \frac{\alpha_2 + \alpha_3}{2}$.

Les charges p_{n2} , p'_{n2} , p''_{n2} prennent les valeurs définies pour les versants symétriques pour la valeur de α_2 .

Les charges p_{n3} , p'_{n3} , p''_{n3} prennent les valeurs définies pour les versants symétriques pour la valeur de α_3 .

Figure 7 – Nœuds des toits multiples à versants dissymétriques

1.4 Effets combinés de la neige et du vent

■ Répartition uniforme de la neige sur la toiture :

- on prend en totalité la charge due au vent ;
- la charge de neige est réduite de moitié.

■ Répartition non uniforme de la neige sous l'action du vent :

- la charge normale ou extrême du vent est prise en totalité ;
- la charge de neige réduite de moitié est appliquée totalement ou partiellement de la manière la plus défavorable. Dans ce cas, les parties les moins chargées doivent supporter la charge normale réduite de moitié moins 35 daN/m² ou la charge extrême réduite de moitié moins 60 daN/m² sans descendre en dessous de 0.

■ Dispositions de la toiture rendant impossible l'enlèvement de la neige par le vent (sheds, terrasses avec acrotères...).

Dans ce cas, il faut cumuler :

- valeur extrême de la charge de neige et valeur normale de la charge de vent ;
- valeur normale de la charge de neige et valeur extrême de la charge de vent.

2. Effets du vent

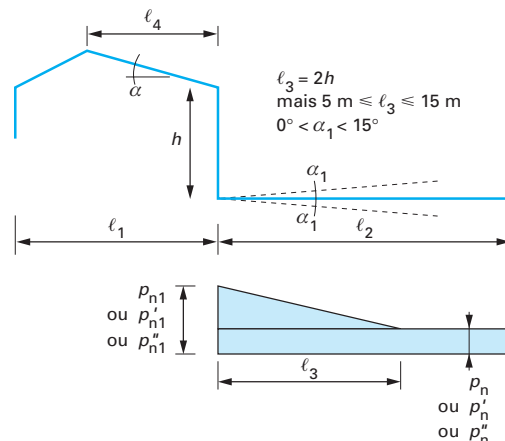
2.1 Définitions

■ Direction du vent

La direction d'ensemble moyenne du vent est supposée horizontale.

■ La toiture supérieure est calculée pour les charges : p_{ne} , p'_{ne} , p''_{ne}

■ La toiture inférieure est calculée pour les charges : p_n , p'_n , p''_n



■ La toiture inférieure doit, de plus, être vérifiée pour une répartition non uniforme des charges :

● Si $\alpha \leq 25^\circ$

$$p_{n1} = \min(200 h ; 3,5 p_n)$$

$$p'_{n1} = \min(330 h ; 3,5 p'_n)$$

$p''_{n1} \rightarrow$ sans objet

● Si $\alpha > 25^\circ$

p_{n1} = la plus grande des 2 valeurs :

$$\begin{cases} \left[1 + 0,04(\alpha - 25) \frac{\ell_4}{\ell_3} \right] p_n \\ \left[1 - 0,02(\alpha - 25) \right] \frac{\ell_4}{\ell_3} p_n + \min(200 h ; 3,5 p_n) \end{cases}$$

p'_{n1} = la plus grande des 2 valeurs :

$$\begin{cases} \left[1 + 0,04(\alpha - 25) \frac{\ell_4}{\ell_3} \right] p'_n \\ \left[1 - 0,02(\alpha - 25) \right] \frac{\ell_4}{\ell_3} p'_n + \min(330 h ; 3,5 p'_n) \end{cases}$$

$$p''_{n1} = \left[1 + 0,04(\alpha - 25) \frac{\ell_4}{\ell_3} \right] p''_n$$

avec h en mètres, α en degrés, charges en daN/m².

Figure 8 – Toitures à plusieurs niveaux

■ Exposition des surfaces

En supposant que l'on remplace les filets d'air par un faisceau de rayons lumineux de même direction, les surfaces **éclairées** sont dites « **au vent** » et les surfaces **non éclairées** sont dites « **sous le vent** ».

■ Maître-couple

Dans le même esprit de substitution du vent par un rayon lumineux, l'ombre portée sur un plan perpendiculaire à la direction des rayons (ou du vent) est appelée le maître-couple de la construction.

■ Action exercée par le vent sur l'une des faces d'une paroi

L'action est toujours perpendiculaire à la face de la paroi.

Elle est fonction :

- de la vitesse du vent ;
- de la forme et de la catégorie de la construction à laquelle elle appartient ;
- de l'emplacement de la paroi dans la construction et de son orientation par rapport à la direction du vent.

■ Pression dynamique et coefficient de pression

L'action unitaire exercée par le vent sur une des faces de la paroi est donnée par l'expression :

$$p = c q$$

avec q pression dynamique fonction de la vitesse du vent,

c coefficient de pression fonction des critères définis dans l'alinéa précédent.

Le **coefficient de pression** c est régi par la convention de signe suivante :

- $c > 0$ si l'action normale à la face est dirigée vers elle (pression ou surpression),
- $c < 0$ si l'action normale à la face est dirigée en sens contraire (suction ou dépression).

■ Action résultante unitaire et totale sur une paroi

La résultante unitaire p_r sur une paroi est la combinaison algébrique des actions élémentaires unitaires sur chacune des faces de la paroi :

$$p_r = (c_1 - c_2) q_r$$

c_1 et c_2 étant les coefficients de pression de chaque face de la paroi frappée par le vent, affectés du signe conforme à la convention définie précédemment.

L'action résultante totale sur une paroi de surface S est :

$$p = p_r S.$$

■ Action d'ensemble sur une construction

Pour une direction de vent donnée, l'action d'ensemble sur une construction est la résultante géométrique R de toutes les actions p s'exerçant sur toutes les parois de la construction.

Elle se décompose, en :

- une action horizontale, $\mathcal{T}$, appelée traînée, provoquant un effet de renversement et d'entraînement ;
- une action verticale, $\mathcal{U}$, appelée portance, provoquant un effet de soulèvement et éventuellement de renversement.

2.2 Pressions dynamiques dues au vent

2.2.1 Pression dynamique de base

La pression dynamique q (en daN/m^2) est donnée en fonction de la vitesse V (en m/s) du vent par la formule de Bernoulli :

$$q = \frac{V^2}{16,3}$$

Le règlement NV 65 envisage pour la justification de la résistance et de la stabilité d'une construction une pression dynamique normale et une pression dynamique extrême.

La **vitesse normale** (correspondant à la pression dynamique normale) est la vitesse de pointe instantanée (pointe de rafale) qui n'est atteinte ou dépassée que 3 jours sur 1000.

La **vitesse extrême** (correspondant à la pression dynamique extrême) est la plus grande vitesse instantanée à laquelle la construction peut être soumise durant sa vie.

Le rapport entre la pression extrême et la pression normale est de 1,75.

Par convention, comme pour les relevés météorologiques, les pressions dynamiques de base normales et extrêmes sont celles qui s'exercent à une hauteur de 10 m au-dessus du sol pour un site normal sur un élément dont la plus grande dimension est égale à 0,50 m.

Le modificatif n° 2 de décembre 1999 relatif à la carte des zones de vent (figure 9 et tableaux 5 et 6) définit maintenant **5 zones pour le territoire métropolitain et les DOM-TOM** ; selon ces zones, pratiquement, on adopte, jusqu'à 1 000 m d'altitude, les valeurs des tableaux 7 et 8 pour les pressions et vitesses de vent.

Remarque :

La partie 2.4 de l'Eurocode 1/DAN en cours d'établissement inclut, pour la France, une « carte vent » (zonage) basée sur des relevés météorologiques plus récents et plus complets que ceux connus à l'époque de l'établissement des règles NV 65.

Les bases de l'Eurocode 1 partie 2.4 sont différentes de celles des NV 65 et font appel au vent « cinquantennal » (de période de retour égale à 50 ans) et à la rugosité du terrain.

Les vitesses de référence sont les moyennes sur 10 min pour un vent soufflant à 10 m du sol sur un terrain de rugosité 2 (rase campagne).

Les pressions de référence issues de ces vitesses sont ensuite pondérées par un coefficient d'exposition fonction de la hauteur de la paroi exposée et de la rugosité du terrain sur lequel est implantée la construction.

Le nouveau zonage introduit dans les NV 65 est une harmonisation par rapport à l'Eurocode 1 partie 2.4.

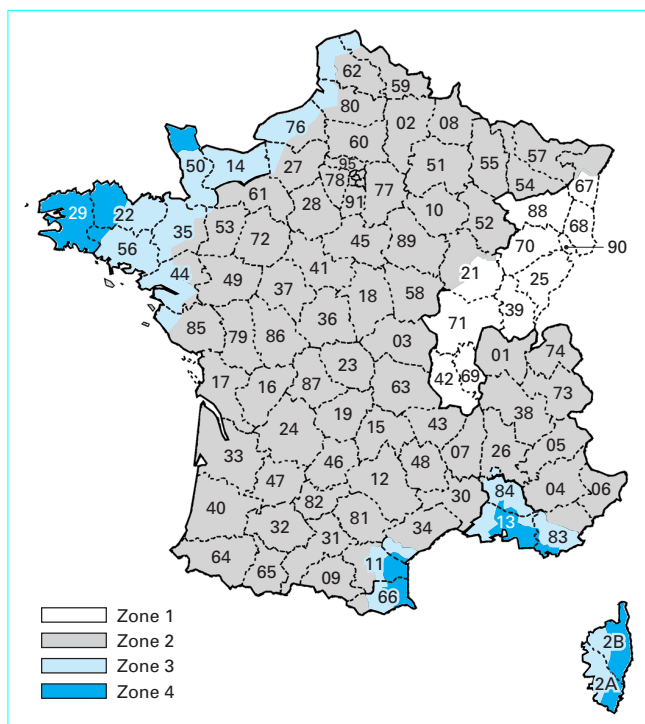


Figure 9 – France métropolitaine : carte des zones de vent

Tableau 5 – Effets du vent : définition des zones par départements

Zone	Départements
1	Côte-d'Or (*), Doubs, Jura, Loire, Bas-Rhin (*), Haut-Rhin, Rhône, Haute-Saône, Saône-et-Loire, Vosges, Territoire-de-Belfort Guyane
2	Ain, Aisne, Allier, Alpes-de-Haute-Provence, Hautes-Alpes, Alpes-Maritimes, Ardèche, Ardennes, Ariège, Aube, Aude (*), Aveyron, Cantal, Charente, Charente-Maritime, Cher, Corrèze, Côte-d'Or (*), Creuse, Dordogne, Drôme, Eure (*), Eure-et-Loir, Gard, Haute-Garonne, Gers, Gironde, Hérault (*), Ille-et-Vilaine (*), Indre, Indre-et-Loire, Isère, Landes, Loir-et-Cher, Haute-Loire, Loire-Atlantique (*), Loiret, Lot, Lot-et-Garonne, Lozère, Maine-et-Loire, Marne, Haute-Marne, Mayenne, Meurthe-et-Moselle, Meuse, Moselle, Nièvre, Nord (*), Oise, Orne, Pas-de-Calais (*), Puy-de-Dôme, Pyrénées-Atlantiques, Hautes-Pyrénées, Pyrénées-Orientales (*), Bas-Rhin (*), Sarthe, Savoie, Haute-Savoie, Seine-Maritime (*), Deux-Sèvres, Somme (*), Tarn, Tarn-et-Garonne, Var (*), Vaucluse (*), Vendée (*), Vienne, Haute-Vienne, Yonne Région Ile-de-France : Ville de Paris, Seine-et-Marne, Yvelines, Essonne, Hauts-de-Seine, Seine-Saint-Denis, Val-de-Marne, Val-d'Oise
3	Aude (*), Bouches-du-Rhône (*), Calvados, Corse-du-Sud (*), Haute-Corse (*), Côtes-d'Armor (*), Eure (*), Hérault (*), Ille-et-Vilaine (*), Loire-Atlantique (*), Manche (*), Morbihan (*), Nord (*), Pas-de-Calais (*), Pyrénées-Orientales (*), Seine-Maritime (*), Somme (*), Var (*), Vaucluse (*), Vendée (*)
4	Aude (*), Bouches-du-Rhône (*), Corse-du-Sud (*), Haute-Corse (*), Côtes-d'Armor (*), Finistère, Manche (*), Morbihan (*), Pyrénées-Orientales (*), Var (*), Vaucluse (*) Saint-Pierre-et-Miquelon
5	Guadeloupe, Martinique, Réunion, Mayotte

(*) Pour une partie du département (voir tableau 6).

Tableau 6 – Départements appartenant à plusieurs zones : découpage selon les cantons ()**

Département	Zone(s)	Cantons
Aude	4	Coursan, Durban-Corbières, Ginestas, Lézignan-Corbières, Narbonne (tous cantons), Sigean
	3	Capendu, Lagrasse, Mouthoumet, Peyriac-Minervois, Tuchan
	2	Autres cantons
Bouches-du-Rhône	3	Arles (tous cantons), Châteaurenard, Peyrolles-en-Provence, Saintes-Maries-de-la-Mer, Saint-Rémy-de-Provence, Tarascon
	4	Autres cantons
Corse-du-Sud	4	Bonifacio, Figari, Levie, Porto-Vecchio
	3	Autres cantons
Haute-Corse	3	Belgodère, Calenzana, Calvi, Castifao-Morosaglia, Corte, L'Île-Rousse, Niolu-Omessa, Venaco
	4	Autres cantons
Côte-d'Or	2	Aignay-le-Duc, Baigneux-les-Juifs, Châtillon-sur-Seine, Laignes, Montbard, Montigny-sur-Aube, Précy-sous-Thil, Recey-sur-Ource, Saulieu, Semur-en-Auxois, Venarey-les-Laumes, Vitteaux
	1	Autres cantons
Côtes-d'Armor	4	Bégard, Belle-Isle-en-Terre, Bourbriac, Callac, Gouarec, Guingamp, Lannion, Lanvollon, Lézardrieux, Maël-Carhaix, Paimpol, Perros-Guirec, Plestin-les-Grèves, Plouagat, Plouaret, Plouha, Pontrieux, La Roche-Derrien, Rostrenen, Saint-Nicolas-du-Pélem, Tréguier
	3	Autres cantons
Eure	3	Beuzeville, Corneilles, Pont-Audemer, Quillebeuf-sur-Seine, Saint-Georges-du-Vivier, Thiberville
	2	Autres cantons
Hérault	3	Béziers (tous cantons), Capetang, Olonzac, Saint-Chinian, Saint-Pons-de-Thomières
	2	Autres cantons
Ille-et-Vilaine	2	Argentré-du-Plessis, Bain-de-Bretagne, Châteaubourg, Grand-Fougeray, La Guerche-de-Bretagne, Janzé, Retiers, Le Sel-de-Bretagne, Vitré (tous cantons)
	3	Autres cantons
Loire-Atlantique	2	Aigrefeuille-sur-Maine, Ancenis, Châteaubriant, Clisson, Derval, Ligné, Moisdon-la-Rivière, Nort-sur-Erdre, Nozay, Riaillé, Rougé, Saint-Julien-de-Vouvantes, Saint-Mars-la-Jaille, Vallet, Varades
	3	Autres cantons
Manche	4	Barneville-Carteret, Beaumont-Hague, Bricquebec, Cherbourg (tous cantons), Equeurdreville-Hainneville, Montebourg, Octeville, Les Pieux, Quettehou, Sainte-Mère-Eglise, Saint-Pierre-Eglise, Saint-Sauveur-le-Vicomte, Tournelville, Valognes
	3	Autres cantons

(**) selon le découpage administratif de la France au 1^{er} janvier 1999 - INSEE - Code officiel géographique 1999, 13^{ème} édition.

Tableau 6 – Départements appartenant à plusieurs zones : découpage selon les cantons () (suite)**

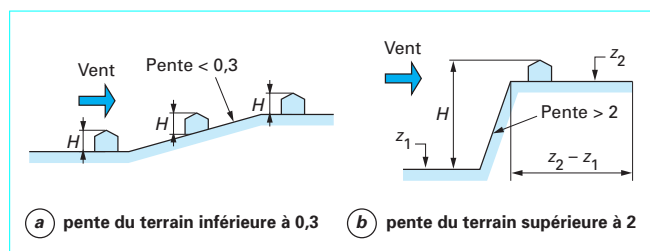
Morbihan	4	Le Faouët, Gourin, Guéméné-sur-Scorff
	3	Autres cantons
Nord	3	Bergues, Bourbourg, Coudekerque-Branche, Dunkerque (tous cantons), Grande-Synthe, Gravelines, Hondshoote, Wormhout
	2	Autres cantons
Pas-de-Calais	3	Ardres, Audruicq, Berck, Boulogne-sur-Mer (tous cantons), Calais (tous cantons), Campagne-lès-Hesdin, Desvres, Etaples, Guînes, Hucqueliers, Marquise, Montreuil, Outreau, Le Portel, Samer
	2	Autres cantons
Pyrénées-Orientales	2	Mont-Louis, Olette, Saillagouse
	3	Arles-sur-Tech, Céret, Prades, Prats-de-Mollo-la-Preste, Saint-Paul-de-Fenouillet, Sournia, Vinça
	4	Autres cantons
Bas-Rhin	2	Bischwiller, Bouxwiller, Drulingen, Haguenau, Lauterbourg, Marmoutier, Niederbronn-les-Bains, La Petite-Pierre, Sarre-Union, Saverne, Seltz, Soultz-sous-Forêts, Wissembourg, Woerth
	1	Autres cantons
Seine-Maritime	3	Bacqueville-en-Caux, Bellencombre, Blangy-sur-Bresle, Bolbec, Cany-Barville, Caudebec-en-Caux, Criquetot-l'Esneval, Dieppe (tous cantons), Doudeville, Envermeu, Eu, Fauville-en-Caux, Fécamp, Fontaine-le-Dun, Goderville, Gonfreville-l'Orcher, Le Havre (tous cantons), Lillebonne, Londinières, Longueville-sur-Scie, Montivilliers, Offranville, Ourville-en-Caux, Pavilly, Saint-Romain-de-Colbosc, Saint-Valery-en-Caux, Tôtes, Valmont, Yerville, Yvetot
	2	Autres cantons
Somme	3	Abbeville (tous cantons), Ailly-le-Haut-Clocher, Ault, Crécy-en Ponthieu, Friville-Escarbotin, Gamaches, Hallencourt, Moyenneville, Nuvion, Rue, Saint-Valery-sur-Somme
	2	Autres cantons
Var	2	Aups, Callas, Comps-sur-Artuby, Draguignan, Fayence, Fréjus, Le Muy, Saint-Raphaël, Salernes, Tavernes
	3	Barjols, Besse-sur-Issole, Brignoles, Collobrières, Cotignac, Cuers, Grimaud, Lorgues, Le Luc, Rians, La Roquebrussanne, Saint-Tropez
	4	Autres cantons
Vaucluse	2	Bollène, Valréas
	4	Bonnieux, Cadenet, Cavaillon, L'Isle-sur-la-Sorgue, Pernes-les-Fontaines
	3	Autres cantons
Vendée	3	Beauvoir-sur-Mer, Challans, L'Île-d'Yeu, Noirmoutier-en-l'Île, Palluau, Saint-Gilles-Croix-de-Vie, Saint-Jean-de-Monts
	2	Autres cantons

(**) selon le découpage administratif de la France au 1^{er} janvier 1999 - INSEE - Code officiel géographique 1999, 13^{ème} édition.**Tableau 7 – Pressions dynamiques du vent pour une altitude inférieure à 1 000 m**

	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5
Pression dynamique de base normale(daN/m ²)	50	60	75	90	120
Pression dynamique de base extrême(daN/m ²)	87,5	105,0	131,0	157,5	210,0

Tableau 8 – Vitesses instantanées du vent pour une altitude inférieure à 1 000 m

	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5
Valeur normale :					
— en m/s	28,6	31,3	35,0	38,3	44,2
— en km/h	103,0	112,7	126,0	137,9	159,2
Valeur extrême :					
— en m/s	37,8	41,4	46,3	50,7	58,5
— en km/h	136,1	149,1	166,6	182,5	210,6

Figure 10 – Définition de H pour un terrain en pente

L'introduction dans les NV 65 du vent cinquantennal et de la rugosité du terrain ayant été jugée trop complexe vis-à-vis du texte initial, il a été décidé de maintenir, sur le territoire métropolitain la même fourchette de pression dynamique de base des NV 65 (50 à 90 daN/m²). La nouvelle carte partage donc le territoire en 4 zones basées sur la carte des vitesses de référence Eurocode au lieu des 3 régions précédentes avec un souci de limiter, dans cette fourchette, les variations de pression supérieure à 20 % par rapport à celles des régions précédentes. L'ancienne région 2 (pression normale 70 daN/m²) a donc été éclatée en zones 2 et 3 de pressions normales 60 et 75 daN/m².

2.2.2 Effet de la hauteur au-dessus du sol

Les valeurs des pressions de base données dans le tableau 7 sont valables à 10 m au-dessus du sol et sont dénommées q_{10} .

À une hauteur H au-dessus du sol la pression devient q_H , définie, pour H compris entre 0 et 500 m, par :

$$q_H = k_H q_{10} = q_{10} \left[2,5 \frac{H+18}{h+60} \right]$$

avec q_H et q_{10} en daN/m² et H en m.

La hauteur H est prise depuis le pied de la construction si celle-ci est placée sur un terrain dont la pente est inférieure à 0,3 (figure 10a).

Si la construction est placée sur un plan (niveau z_2) raccordé à une plaine (niveau z_1) par un talus de pente supérieure à 2 (figure 10b) on prend, dans une zone qui, à partir de la crête, a une largeur $z_2 - z_1$, la hauteur H à partir du niveau z_1 (règles R III – 1,24 et annexe 2).

2.2.3 Effet de site

La nature du site d'implantation en comparaison avec celui des relevés météo peut conduire à une diminution ou une augmentation de la vitesse du vent et donc des pressions correspondantes.

Les règles NV 65 considèrent trois types de site :

- site **protégé** : par exemple, fond de cuvette bordée de collines sur tout son pourtour ou site urbain dense ;
- site **normal** : par exemple, plaine de grande étendue avec des dénivellations peu importantes, de pente inférieure à 10 % ;
- site **exposé** : par exemple, littoral en général sur une profondeur de 6 km, sommet des falaises, îles ou presqu'îles étroites, vallées étroites.

En fonction du site, les pressions de base normales et extrêmes doivent être pondérées par un **coefficient de site** k_s (tableau 9).

Tableau 9 – Coefficient de site k_s à appliquer aux pressions de base du tableau 5

	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5
Site protégé	0,80	0,80	0,80	0,80	(1)
Site normal	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Site exposé	1,35	1,30	1,25	1,20	1,20

(1) La notion de site protégé n'est pas prise en compte dans cette zone.

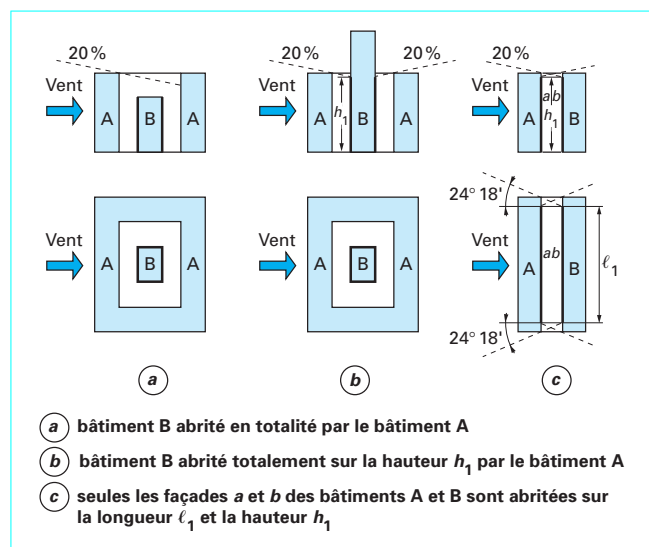


Figure 11 – Effets de masque

2.2.4 Effet de masque

Il y a effet de masque lorsque la construction envisagée est masquée et protégée par d'autres constructions de grande probabilité de durée (comme sur la figure 11 par exemple). Dans ce cas, les pressions dynamiques de base peuvent être réduites de 25 % tout en respectant les valeurs limites données au paragraphe 2.2.6.

La réduction pour effet de masque doit être prise en compte avec prudence, le masquage d'une construction par une autre pouvant, au contraire, conduire à une augmentation de la vitesse du vent par effet de sillage.

2.2.5 Effet de dimension

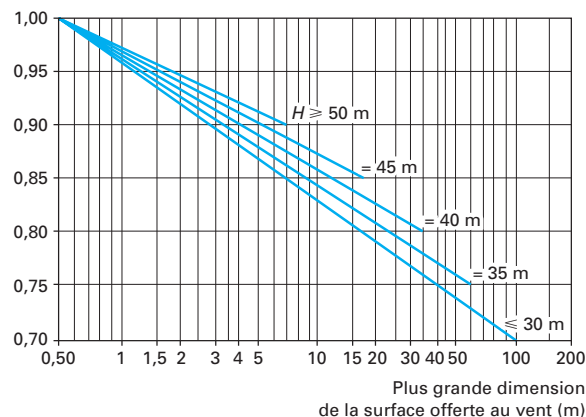
La vitesse du vent n'est pas uniforme dans l'espace. Les relevés météo sont faits sur des surfaces frappées par le vent dont la plus grande dimension ne dépasse pas 0,50 m. Si la surface frappée est beaucoup plus grande, la résultante moyenne des efforts pourra donc être réduite en pondérant les pressions dynamiques de base par un coefficient de réduction $\delta \leq 1$. Il est donné à la figure 12, en fonction de la plus grande dimension de la surface frappée par le vent.

Pour les éléments structuraux continus, la plus grande dimension à considérer est celle de la travée la plus grande. De plus, si cet élément continu a un rôle important dans la résistance ou la stabilité de la construction, des chargements dissymétriques doivent être envisagés en appliquant, de la façon la plus défavorable, des coefficients de 0,90 δ et 1,10 δ aux chargements des travées.

2.2.6 Réduction maximale des pressions dynamiques de base et valeurs limites des pressions dynamiques corrigées

La totalité de la réduction « effet de masque » plus « effet de dimension » ne doit en aucun cas dépasser 33 %.

Quels que soient, pour une construction donnée, la hauteur H au-dessus du sol, le site, le masque et l'effet de dimension, les valeurs de la pression dynamique corrigée seront bornées à celles données au tableau 10 pour les zones 1 à 4. Les valeurs maximales ne sont pas données en zone 5 (vents cycloniques).

Coefficient de réduction
des pressions dynamiques δ 

On notera que ce coefficient est limité à 0,90 pour des immeubles d'une hauteur de 50 m ou plus, quelle qu'en soit la longueur. Le coefficient de réduction garde une valeur constante (0,70) jusqu'à 30 m de hauteur, pour des bâtiments ayant plus de 100 m de longueur.

Figure 12 – Coefficient de réduction δ des pressions dynamiques pour les grandes surfaces

Tableau 10 – Valeurs limites des pressions dynamiques corrigées pour les zones 1 à 4

	Valeurs maximales (daN/m ²)	Valeurs minimales (daN/m ²)
Pression dynamique normale corrigée	170	30
Pression dynamique extrême corrigée	297,5	52,5

2.2.7 Amplification dynamique

Dans la direction du vent, il existe une interaction dynamique entre les forces engendrées par les rafales de vent et la structure elle-même.

La connaissance du mode fondamental d'oscillation de la structure dans la direction de vent étudiée est primordiale pour la prise en compte de ce phénomène. Plus la structure sera flexible (grande période d'oscillation) et plus les amplifications des déformations, et donc des efforts dans la structure, seront importantes.

Pour tenir compte de cet effet, il faut pondérer les pressions dynamiques de base par un **coefficient « d'amplification dynamique » β** .

■ Pour les **charges normales** de vent :

$$\beta_{\text{norm}} = \theta (1 + \xi \tau)$$

avec ξ **coefficient de réponse** fonction de la période T du mode fondamental d'oscillation de la structure donné sur les diagrammes de la figure 13,

τ **coefficient de pulsation** déterminé à chaque niveau de la structure en fonction de sa hauteur H au-dessus du sol et donné par l'échelle fonctionnelle de la figure 14,

θ **coefficient global** dépendant du type de construction et prenant les valeurs :

- $\theta = 1$: pour les constructions prismatiques décrites au paragraphe 4 à l'exception des constructions à usage de bureaux ou d'habitation et pour les constructions ajourées à treillis.

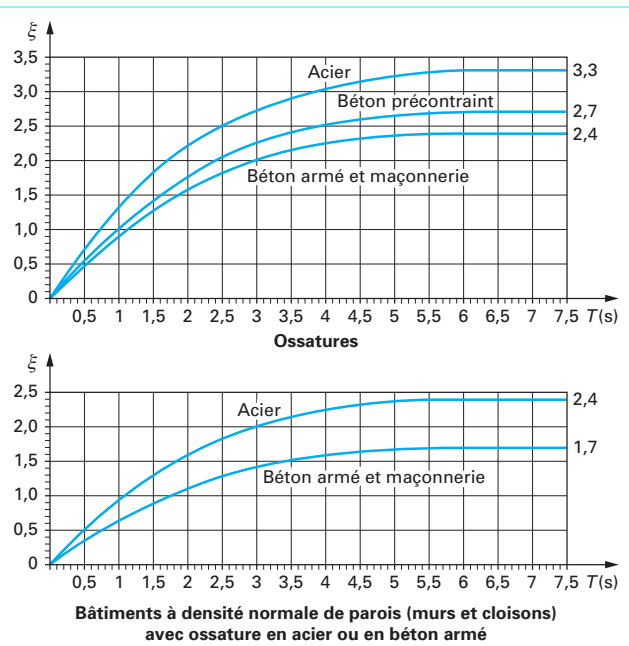


Figure 13 – Coefficient de réponse

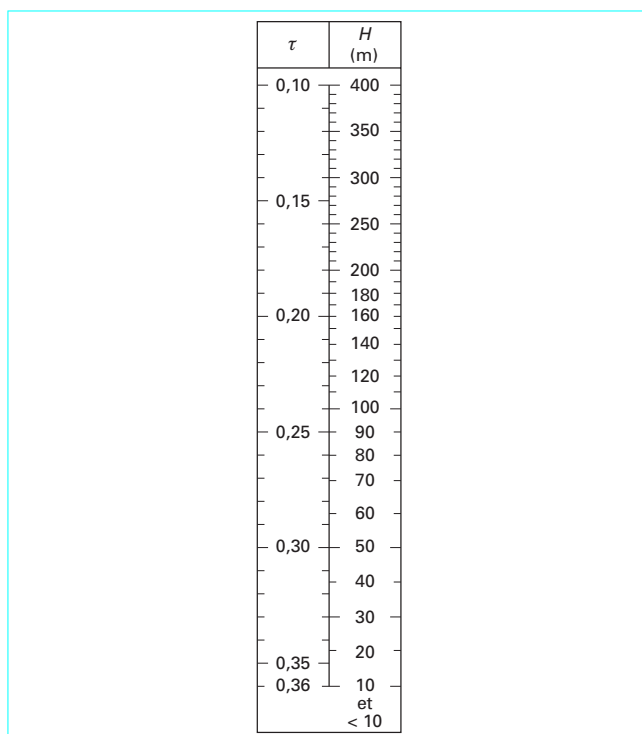


Figure 14 – Coefficient de pulsation

- Pour les autres constructions et en fonction de leur cote H_s au sommet :
 - $\theta = 0,7$ pour $H_s \leq 30$ m
 - $\theta = 0,7 + 0,01 (H_s - 30)$ pour $30 \text{ m} < H_s < 60$ m
 - $\theta = 1$ pour $H_s \geq 60$ m

■ Pour les **charges extrêmes** de vent :

$$\beta_{\text{ext}} = \beta_{\text{norm}} \left(0,5 + \frac{\theta}{2} \right) \text{ avec } \beta \geq 1$$

Le coefficient d'amplification dynamique n'est à retenir que pour le calcul des actions d'ensemble sur la construction.

2.2.8 Effet résultant

La pression dynamique, compte tenu de tous les effets précédemment décrits, est la suivante, à la hauteur H :

$$q = q_{10} k_H k_s \delta \beta$$

3. Effets du vent sur les constructions prismatiques à base quadrangulaire

Les pressions dynamiques à prendre en compte sont celles définies dans le paragraphe 2.

Le vent est supposé souffler perpendiculairement aux parois verticales de la construction.

Les actions du vent sont fonction d'un coefficient γ_0 dépendant de la forme de la construction. Le coefficient γ_0 se lit sur le diagramme de la figure 15 en fonction des rapports de dimensions λ de la construction.

3.1 Constructions reposant sur le sol

3.1.1 Caractéristiques

- La forme générale en plan est un rectangle.
- La forme de la couverture peut être une terrasse à un, deux ou plusieurs versants, en voûte.
- La toiture peut être unique ou multiple.
- Les parois verticales peuvent être fermées, ouvertes ou semi-ouvertes sous réserve que l'une au moins d'entre elles soit fermée.

Le coefficient γ_0 pour les constructions reposant sur le sol se lit sur la figure 15.

3.1.2 Pression résultante sur les parois de la construction

Pour chaque paroi de la construction, la pression de calcul est donnée par :

$$q_{\text{calcul}} = q (c_e - c_i)$$

avec q pression résultante (voir § 2.2.8),

c_e coefficient de pression extérieure,

c_i coefficient de pression intérieure.

Les coefficients c_e et c_i sont affectés du signe + s'ils représentent des pressions et du signe - s'ils représentent des dépressions.

La différence $c_e - c_i$ est algébrique. L'action résultante sur la paroi est une pression si elle est positive et une dépression si elle est négative.

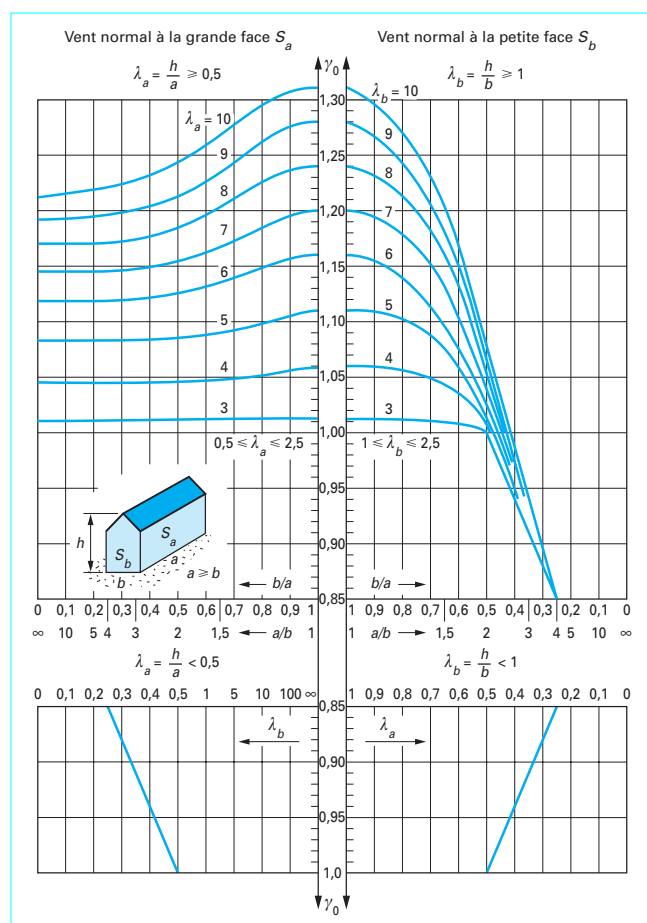


Figure 15 – Coefficient γ_0 pour les constructions prismatiques à base quadrangulaire reposant sur le sol

3.1.3 Actions extérieures

3.1.3.1 Coefficient de pression extérieure c_e

Le vent ne traverse pas la construction.

■ Parois verticales

— parois **au vent** :

$$c_e = +0,8 \text{ (quel que soit } \gamma_0 \text{)}$$

— parois **sous le vent** et **parallèles** au vent :

$$c_e = -(1,3 \gamma_0 - 0,8)$$

■ Versants plans de toitures uniques (un ou deux versants).

Nota : dans toutes les formules qui suivent, f représente la « **flèche** » de la toiture ou de la voûte.

● Pour le vent **perpendiculaire** aux génératrices de la toiture :

— si $f \leq \frac{h}{2}$: c_e est lu sur le diagramme de la figure 16 en fonction de γ_0 et de l'angle de pente de versant α ;

— si $\frac{4}{5}h \leq f \leq h$: c_e est lu sur le diagramme de la figure 17 en fonction de l'angle α de pente de toiture et est indépendant de γ_0 ;

— si $\frac{h}{2} < f < \frac{4}{5}h$: le coefficient c_e est déterminé par interpolation linéaire en fonction du rapport $\frac{f}{h}$ entre les valeurs lues sur les diagrammes des figures 16 et 17.

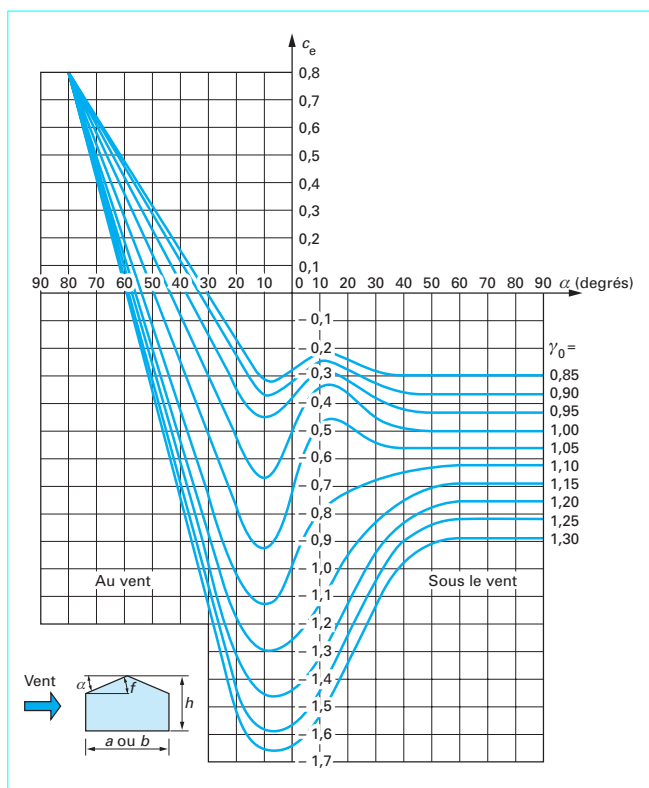


Figure 16 – Versants plans. Coefficient c_e pour $f \leq \frac{h}{2}$

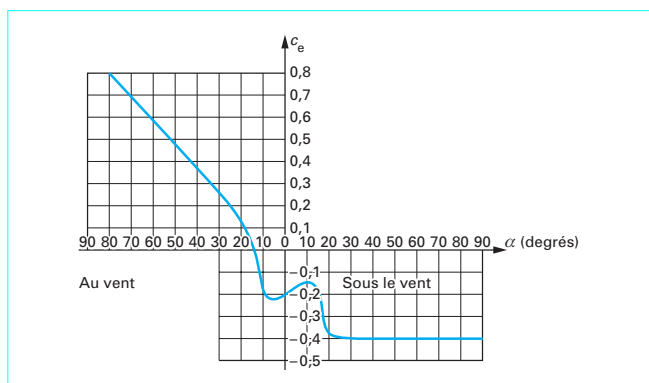


Figure 17 – Versants plans. Coefficient c_e pour $\frac{4}{5}h \leq f \leq h$.
Vent parallèle aux génératrices

- Pour le vent **parallèle** aux génératrices de la toiture :

- si $f \leq \frac{h}{2}$: c_e est lu sur le diagramme de la figure 16 pour $\alpha = 0$;
- si $\frac{4}{5}h \leq f \leq h$: c_e est lu sur le diagramme de la figure 18 en fonction de l'angle de pente α et est indépendant de γ_0 ;
- si $\frac{h}{2} < f < \frac{4}{5}h$: le coefficient c_e est déterminé par interpolation linéaire en fonction du rapport $\frac{f}{h}$ entre les deux cas précédents.

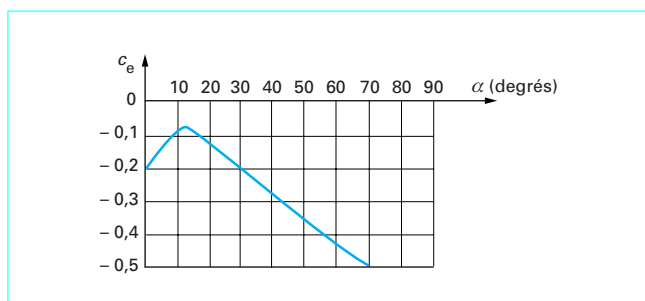


Figure 18 – Versants plans. Coefficients c_e pour $\frac{4}{5}h \leq f \leq h$.

Vent parallèle aux génératrices

■ Voûtes de toitures uniques

La directrice des voûtes est circulaire, parabolique ou en chaînette.

- Pour le vent **perpendiculaire** aux génératrices de la toiture :

- si $f \leq \frac{2}{3}h$ et $\frac{a \text{ ou } b}{10} \leq f \leq \frac{a \text{ ou } b}{2}$: le coefficient c_e , en chaque point de la voûte, est lu sur le diagramme de la figure 19 en fonction de γ_0 et de l'angle d'inclinaison α de la tangente en chaque point sur la direction du vent ;

- si $f \leq \frac{2}{3}h$ et $f < \frac{a \text{ ou } b}{10}$ le coefficient c_e est déterminé par interpolation linéaire entre les coefficients de la voûte de flèche f égale à $\frac{a \text{ ou } b}{10}$ lus sur le diagramme de la figure 19 et ceux de la toiture terrasse d'une construction de même base et de même hauteur de façade lus sur le diagramme de la figure 16.

- Pour le vent **parallèle** aux génératrices de la toiture :

- si $f \leq \frac{2}{3}h$ et $\frac{a \text{ ou } b}{10} \leq f \leq \frac{a \text{ ou } b}{2}$: c_e est lu sur le diagramme de la figure 16 pour $\alpha = 0$ en fonction de γ_0 .

■ Toitures multiples à versants plans

- Pour le vent **perpendiculaire** aux génératrices de la toiture :

- on adopte pour le 1^{er} versant au vent et le dernier versant sous le vent les coefficients correspondant à ceux d'une toiture unique ;
- pour les versants intermédiaires (au vent et sous le vent) on adopte les valeurs précédentes réduites de 25 %.

- Pour le vent **parallèle** aux génératrices de la toiture : on adopte les valeurs de c_e lues sur le diagramme de la figure 16 pour $\alpha = 0$ en fonction γ_0 .

3.1.3.2 Actions extérieures locales

Certaines zones d'une construction peuvent être soumises à des pressions de vent bien supérieures à celles caractérisées par les coefficients c_e précédents du fait de l'augmentation locale de la vitesse des veines d'air. Ce sont notamment les zones proches des arêtes verticales et les bords de toiture.

Ces actions locales ne sont à retenir que pour le calcul des éléments directement soumis au vent tels les éléments de bardage et de couverture.

Elles ne sont pas à prendre en compte pour le dimensionnement des ossatures support et pour le calcul de la stabilité des constructions.

La figure 20 résume les différentes surpressions et leurs champs d'action dans ces zones particulières.

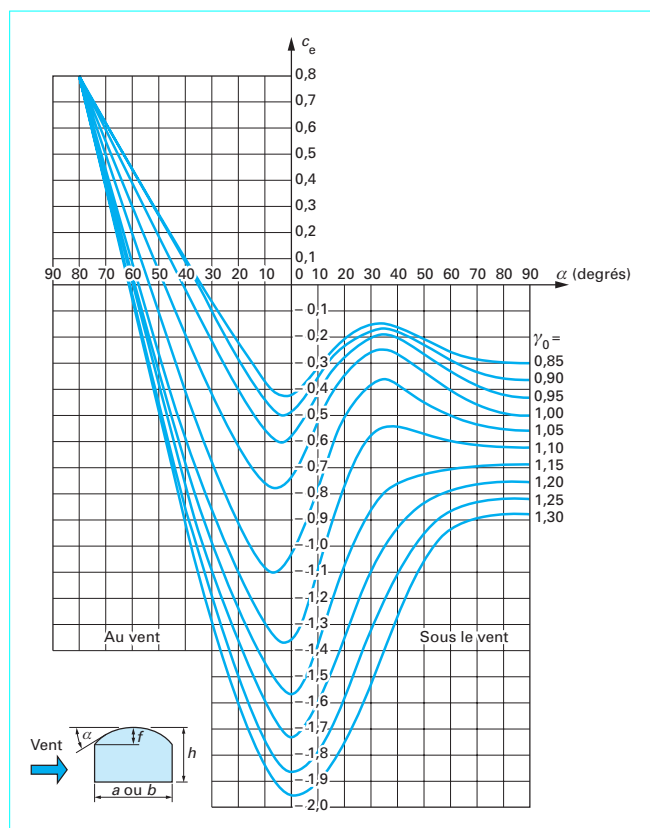


Figure 19 – Toitures en voûte. Coefficient c_e pour $f \leq \frac{2}{3}h$ et

$$\frac{a \text{ ou } b}{10} \leq f \leq \frac{a \text{ ou } b}{2}$$

3.1.4 Actions intérieures

Les parois des bâtiments courants ne sont pas parfaitement étanches. Les volumes intérieurs sont alors soumis à des pressions ou des dépressions intérieures caractérisées par le coefficient de pression intérieure c_i ($c_i > 0$ pour une surpression, $c_i < 0$ pour une dépression).

La valeur du coefficient c_i est fonction :

- du coefficient γ_0 de la construction ;
- de la perméabilité μ des parois.

Pour une paroi donnée, la **perméabilité** μ est définie comme le rapport entre la somme des surfaces ouvertes de la paroi et la surface totale de la paroi. Le coefficient μ est exprimé en %.

Définitions :

- $\mu \leq 5 \%$ la paroi est dite **fermée**
- $\mu \geq 35 \%$ la paroi est dite **ouverte**
- $5 \% < \mu < 35 \%$ la paroi est dite **semi-ouverte**

■ Constructions fermées

Toutes les parois de la construction ont une perméabilité $\mu \leq 5 \%$.

On applique simultanément à toutes les faces intérieures :

- soit un coefficient de surpression $c_i = +0,6$ ($1,8 - 1,3 \gamma_0$) ;
- soit un coefficient de dépression $c_i = -0,6$ ($1,3 \gamma_0 - 0,8$).

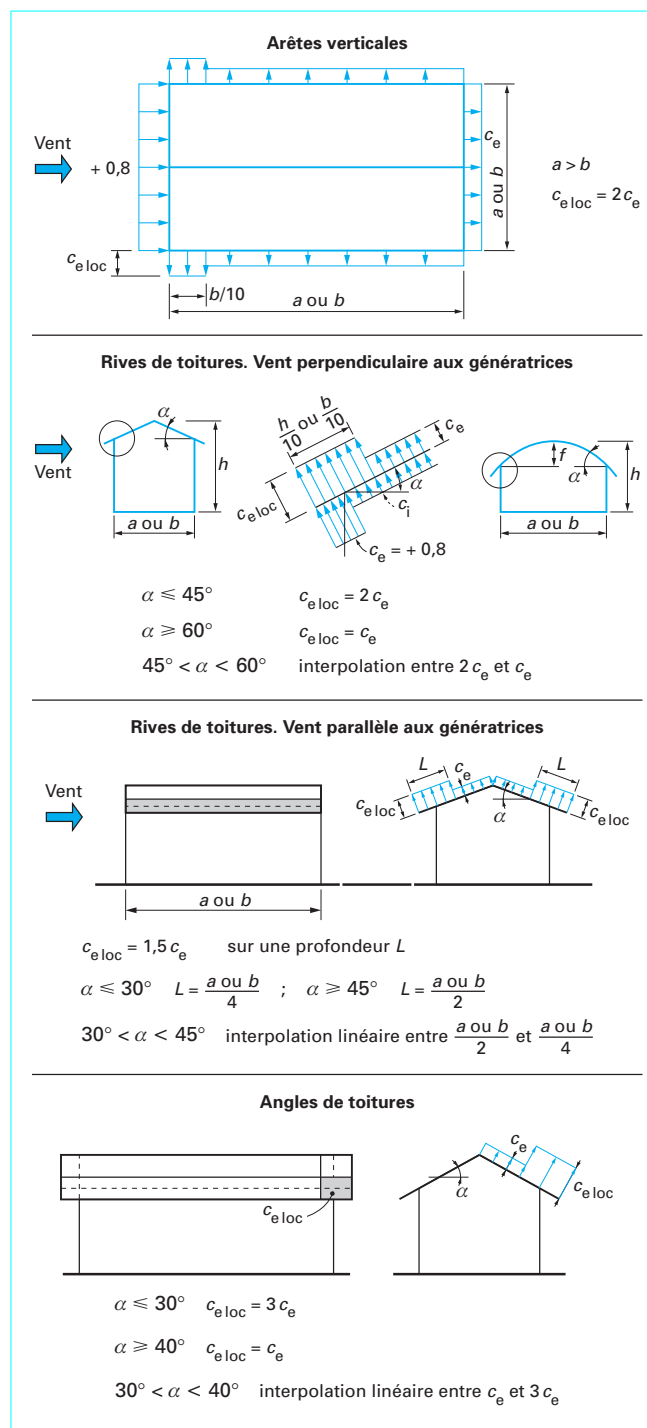


Figure 20 – Actions locales

■ Constructions ouvertes

La construction peut comporter plusieurs parois ouvertes de perméabilité $\mu \geq 35 \%$.

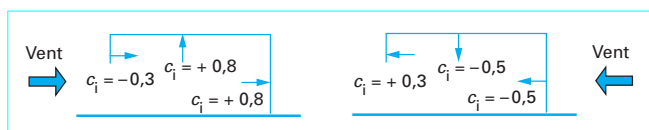


Figure 21 – Construction comportant une paroi ouverte. Coefficient de pression intérieure c_i pour $\gamma_0 = 1$ (exemple)

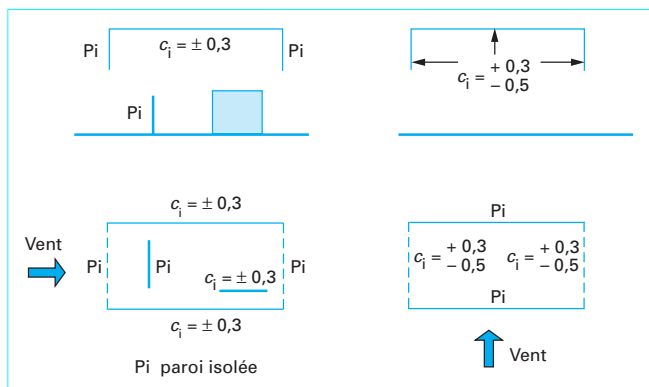


Figure 22 – Construction comportant deux parois opposées ouvertes. Coefficient de pression intérieure c_i pour $\gamma_0 = 1$ (exemple)

● Constructions ouvertes comportant **une paroi ouverte** (figure 21).

On applique :

— cas de la paroi ouverte **au vent** :

- sur les parois de perméabilité $\mu \leq 5\%$, une surpression $c_i = +0,8$ indépendante de γ_0 ,
- sur les parois de perméabilité $\mu \geq 35\%$, une dépression $c_i = -0,6 (1,3 \gamma_0 - 0,8)$;

— cas de la paroi ouverte **sous le vent** :

- sur les parois de perméabilité $\mu \leq 5\%$, une dépression $c_i = -(1,3 \gamma_0 - 0,8)$,
- sur les parois de perméabilité $\mu \geq 35\%$, une surpression $c_i = 0,6 (1,8 - 1,3 \gamma_0)$.

● Constructions comportant **deux parois opposées ouvertes** (figure 22).

Les parois ouvertes ont une perméabilité $\mu \geq 35\%$; les autres une perméabilité $\mu \leq 5\%$ y compris la toiture.

Parois de la construction ou parois intérieures situées **dans le courant d'air** : les actions du vent sont à déterminer comme si la paroi était isolée dans l'espace (voir § 5).

Parois de la construction ou parois intérieures situées **hors du courant d'air** :

- si le vent est normal aux parois ouvertes ($\mu \geq 35\%$) :
 - soit un coefficient de surpression $c_i = +0,6 (1,8 - 1,3 \gamma_0)$,
 - soit un coefficient de dépression $c_i = -0,6 (1,3 \gamma_0 - 0,8)$;
- si le vent est parallèle aux parois ouvertes ($\mu \geq 35\%$) :
 - soit un coefficient de surpression $c_i = +0,6 (1,8 - 1,3 \gamma_0)$,
 - soit un coefficient de dépression $c_i = -(1,3 \gamma_0 - 0,8)$.

■ Constructions comportant des parois semi-ouvertes

Les coefficients c_i sur les faces intérieures des différentes parois sont déterminés par simple ou double interpolation linéaire en fonction des perméabilités μ comprises entre 5 % et 35 % entre les coefficients calculés pour la construction considérée ouverte ou fermée.

Pour plus de détails se reporter à l'annexe 6 des règles NV 65 qui donne de nombreux exemples de calculs à ce sujet.

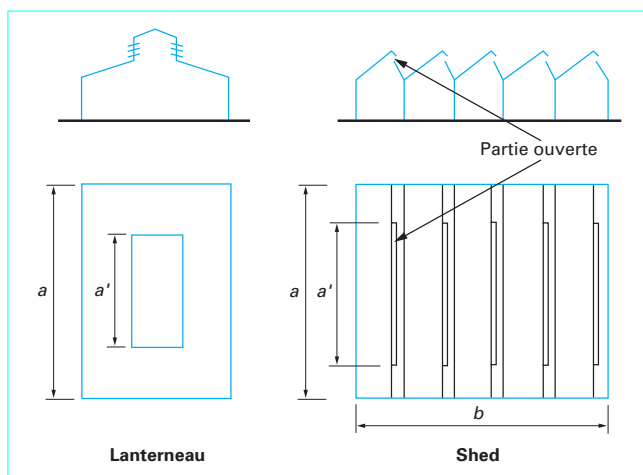


Figure 23 – Lanterneau et shed ouverts d'un seul côté

■ Constructions à parois verticales fermées avec lanterneau ou shed en toiture ouverts d'un seul côté (figure 23).

L'intérieur de la construction est soumis :

— soit à un coefficient de dépression :

$$c_i = -0,6 \left(1 + \frac{a'}{a} \right) (1,3 \gamma_0 - 0,8) ;$$

— soit à un coefficient de surpression :

$$c_i = 1,2 \frac{a'}{a} + 0,6 (1,8 - 1,3 \gamma_0) \left(1 - \frac{3}{2} \frac{a'}{a} \right).$$

3.1.5 Actions d'ensemble sur la construction

Sur l'ensemble de la construction, les actions globales du vent produisent un effet de renversement, dû à la composante horizontale des efforts de vent, et un effet de soulèvement.

À noter que les actions extérieures locales données dans le paragraphe 3.1.3.2 ainsi que les actions intérieures sur les parois de perméabilité $\mu > 5\%$ données dans le paragraphe 3.1.4 (parois ouvertes et semi-ouvertes) ne sont pas à prendre en compte pour le calcul des actions d'ensemble.

Les configurations suivantes sont à considérer.

■ Bloc unique à toiture unique (toiture à un ou deux versants ou en terrasse)

● Vent **normal** aux génératrices de la toiture : l'action d'ensemble est la composition géométrique des actions résultantes totales sur toutes les parois de la construction.

● Vent **parallèle** aux génératrices de la toiture : l'action d'ensemble est calculée comme précédemment, augmentée, éventuellement, d'une force d'entraînement due au frottement de l'air sur la couverture et agissant à partir d'une distance $a - 4h$ par rapport au pignon frappé par le vent (figure 24).

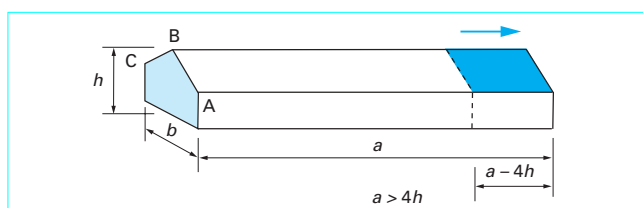


Figure 24 – Force d'entraînement. Surface de calcul

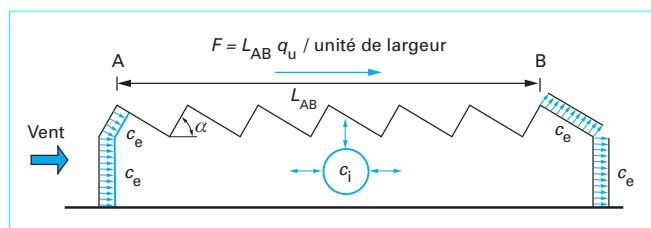


Figure 25 – Bloc unique à toiture multiple. Actions d'ensemble

La **force de frottement** dépend de la rugosité de la couverture.

La force par unité de surface doit être prise égale à :

0,010 q pour les surfaces planes ou à ondes parallèles à la direction du vent,

0,020 q pour les surfaces présentant des ondes ou des plis perpendiculaires à la direction du vent,

0,040 q pour des surfaces présentant des nervures perpendiculaires à la direction du vent,

où q est la pression dynamique du vent au niveau du faîtage.

■ Bloc unique à toiture multiple

● Vent normal aux génératrices

L'action d'ensemble est déterminée en prenant en compte :

— les résultantes des efforts sur les parois des façades au vent et sous le vent ainsi que celles du premier et dernier versant de toiture (figure 25) ;

— une force d'entraînement également répartie aux crêtes de la toiture et de force unitaire égale à :

$$q_u = (0,001 \alpha + 0,02) q \text{ pour les toitures à versants plans}$$

avec α angle de pente des versants au vent (degré),

q pression dynamique du vent au faîtage ;

$$0,03 q \leq q_u \leq 0,10 q.$$

$$q_u = 0,02 q \text{ pour les toitures en voûte.}$$

■ Blocs accolés et files accolées de blocs accolés à toiture unique ou multiple

La détermination des actions d'ensemble se fait en deux phases :

— construction considérée dans son ensemble, le calcul étant effectué en fonction de ce qui précède ;

— tous les blocs doivent être considérés comme fermés :

- les blocs d'extrémité doivent être considérés comme isolés et calculés comme tels,
- les blocs intermédiaires doivent être considérés comme isolés et calculés sous un effort horizontal égal à celui s'exerçant sur la façade au vent sous le coefficient de pression extérieur seul.

3.2 Constructions éloignées du sol

Les règles du paragraphe 3.1 sont applicables avec les adaptations suivantes.

■ Coefficient γ

Le coefficient γ_0 est remplacé par les coefficients γ_e ou γ_h en fonction de l'éloignement de la construction par rapport au sol (figure 26).

● Pour $\lambda_a \leq 1$ et $\lambda_b \geq 2,5$ ou $\lambda_a > 1$ et $\lambda_b > 1$:

• γ_h est lu sur le diagramme de la figure 15 mais avec λ_a et λ_b

$$\text{calculés avec } \frac{h}{2}$$

$$\gamma_e = \gamma_0 - \frac{e}{h} (\gamma_0 - \gamma_h)$$

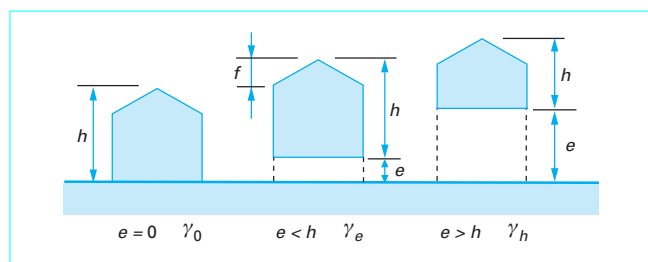
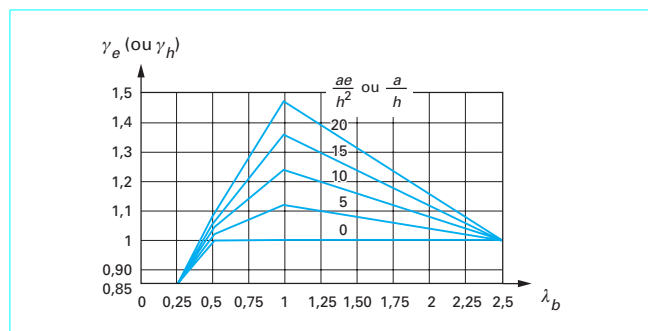


Figure 26 – Constructions éloignées du sol

Figure 27 – Constructions prismatiques à base quadrangulaire du sol $\lambda_a \leq 1$ et $\lambda_b < 2,5$. Vent normal à S_a .

avec γ_0 coefficient correspondant à la construction reposant sur le sol,

γ_h comme précédemment défini.

● Pour $\lambda_a \leq 1$ et $\lambda_b < 2,5$

— pour le **vent normal à la grande face S_a** , les coefficients γ_e et γ_h sont lus sur le diagramme de la figure 27 en fonction de :

$$\lambda_b \text{ et } \frac{ae}{h^2} \text{ pour } \gamma_e$$

$$\lambda_b \text{ et } \frac{a}{h} \text{ pour } \gamma_h$$

— pour le **vent normal à la petite face S_b** , les coefficients γ_e et γ_h sont égaux au coefficient γ_0 de la construction reposant sur le sol.

■ Coefficients de pression

● Actions extérieures

Sur les **faces verticales et la toiture**, les coefficients c_e sont déterminés comme pour la construction reposant sur le sol en remplaçant γ_0 par γ_e ou γ_h .

Sur la **face inférieure**, $c_e = -0,8$.

● Actions intérieures

Les coefficients c_i sont déterminés comme pour la construction reposant sur le sol en remplaçant γ_0 par γ_e ou γ_h .

4. Effets du vent sur les constructions prismatiques à base polygonale régulière ou circulaire

En principe, ce paragraphe concerne principalement les cheminées, les réfrigérants, les tours à usage industriel, les réservoirs horizontaux ou verticaux, les mâts de grande hauteur.

Le vent est supposé agir perpendiculairement à une face pour les prismes de trois ou quatre côtés et perpendiculairement au maître-couple maximal pour les autres constructions.

Pour ces constructions le rapport de dimension est :

$$\lambda = \frac{h \text{ ou } \ell}{d}$$

avec h hauteur totale de la construction,

ℓ longueur totale de la construction,

d largeur du maître-couple,

ou

$$\lambda = \frac{h^2 \text{ ou } \ell^2}{S_t}$$

si le maître-couple n'a pas une largeur constante (S_t surface du maître-couple).

Ces constructions ont été classées suivant les six catégories suivantes :

Catégorie I : prismes de trois ou quatre côtés.

Catégorie II : prismes de plus de quatre côtés et de dix côtés au plus avec ou sans nervures arrondies.

Catégorie III : prismes de plus de dix côtés et de vingt côtés au plus, avec ou sans nervures arrondies.

Catégorie IV : cylindre à base circulaire avec nervures minces ou épaisses à arêtes vives.

Catégorie V : prismes de vingt côtés et plus avec ou sans nervures arrondies et cylindres rugueux à base circulaire sans nervure.

Catégorie VI : cylindres lisses à base circulaire sans nervure et possédant un poli spéculaire et durable.

■ Coefficient global de trainée c_t

La **résultante totale des efforts**, dans la direction du vent, sur le corps de la construction (appelée **trainée**) sera calculée, si le maître-couple a été divisé en n surfaces élémentaires S_i par :

$$T = c_t q_{H=10} k_s \beta \sum_{i=1}^{i=n} k_{Hi} \delta_i S_i$$

où k_s , β , k_{Hi} , δ ont été définis dans le paragraphe 2.

L'effort de trainée dû à l'action du vent sur la toiture éventuelle de la construction est à ajouter.

Le coefficient global de trainée c_t est donné par :

$$c_t = \gamma c_{t0}$$

où c_{t0} est le coefficient global de trainée, fonction de la catégorie et donné pour un rapport de dimension de :

- $\lambda = 2,5$ pour les constructions à génératrices verticales reposant sur le sol,

- $\lambda = 5,0$ pour les constructions verticales éloignées du sol et les constructions à génératrices horizontales.

Les coefficients c_{t0} sont donnés au tableau 11.

Tableau 11 – Constructions à base polygonale régulière ou circulaire. Coefficient c_{t0}

Catégorie	Types de construction	Coefficients c_{t0}
I	Prismes de trois ou quatre côtés	1,30
II	Prismes de plus de quatre côtés et de dix côtés au plus avec ou sans nervures arrondies	
	— cinq côtés	1,05
	— six côtés.....	0,95
	— huit côtés	0,85
	— dix côtés	0,80
III	Prismes de plus de dix côtés et de vingt côtés au plus, avec ou sans nervures arrondies (1) (n étant le nombre de côtés).	
	• $d \geq 0,28$	1,05 – 0,025 n
	• $d < 0,28$ { $d\sqrt{q} \geq 1,5$	1,05 – 0,025 n
	{ $0,5 < d\sqrt{q} < 1,5$	0,80 – 0,02 $d\sqrt{q}$ – 0,25($n - 10$)
	{ $d\sqrt{q} \leq 0,5$	0,85 – 0,005 n
IV	Cylindres à base circulaire avec nervures minces ou épaisses à arêtes vives (saillies comprises entre 0,01 d et 0,10 d)	0,75
V	Prismes à vingt côtés et plus, avec ou sans nervures arrondies. Cylindres rugueux à base circulaire sans nervure (1).	
	• $d \geq 0,28$	0,55
	• $d < 0,28$ { $d\sqrt{q} \geq 1,5$	0,55
	{ $0,5 < d\sqrt{q} < 1,5$	0,85 – 0,20 $d\sqrt{q}$
	{ $d\sqrt{q} \leq 0,5$	0,75
VI	Cylindres lisses à base circulaire sans nervure et possédant un poli spéculaire et durable (1).	
	• $d \geq 0,28$	0,45
	• $d < 0,28$ { $d\sqrt{q} \geq 1,5$	0,45
	{ $0,5 < d\sqrt{q} < 1,5$	0,90 – 0,30 $d\sqrt{q}$
	{ $d\sqrt{q} \leq 0,5$	0,75

(1) Dans les inégalités, d est exprimé en mètres et q en décanewtons par mètre carré (daN/m²).

γ est un coefficient pris égal, suivant les cas, aux coefficients γ_0 , γ_h ou γ_e lus sur l'échelle de la figure 28 en fonction du rapport de dimension λ .

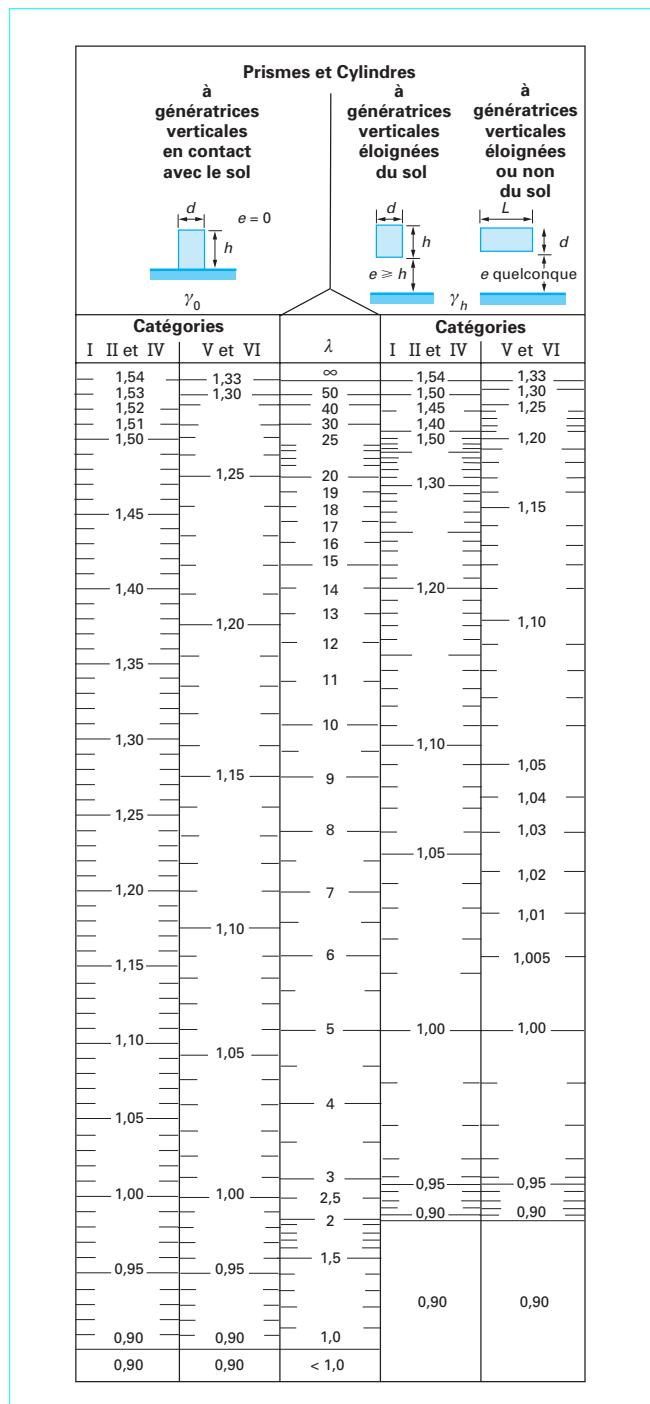


Figure 28 – Constructions prismatiques à base polygonale régulière ou circulaire. Coefficients γ_0 et γ_h

Le coefficient γ_e pour les constructions à génératrices verticales, éloignées du sol à une distance $e < h$ est donné par la formule :

$$\gamma_e = \gamma_0 - \frac{e}{h}(\gamma_0 - \gamma_h)$$

Nota : pour les prismes de la catégorie III, γ_0 ou γ_h est obtenu par interpolation linéaire en fonction du nombre n de côtés entre $n = 10$ (catégorie II) et $n = 20$ (catégorie V).

■ Coefficients de pression

On se reportera au chapitre 3 des règles NV 65 pour la détermination des coefficients c_e et c_i de ces constructions, un résumé des méthodes de calcul n'étant pas envisageable.

5. Effets du vent sur les panneaux pleins et toitures isolées

5.1 Panneaux pleins

Ce sont les plaques planes rectangulaires éloignées ou non du sol.

■ Vent normal ou oblique au panneau

L'effort de trainée est donné par l'expression :

$$\mathcal{T} = c_t (q_{H=10} k_s k_H \delta) h \ell$$

avec h hauteur du panneau,

ℓ dimension horizontale du panneau,

c_t coefficient global de trainée lu sur l'échelle de la figure 29 en fonction du rapport de dimension $\lambda = \frac{h}{\ell}$ du panneau,

$q_{H=10}$, k_s , k_H , δ sont définis dans le paragraphe 2.

Pour les panneaux éloignés du sol d'une distance $e < h$, c_t est obtenu par l'interpolation linéaire en fonction du rapport $\frac{e}{h}$ entre les valeurs de c_t pour $e = 0$ et $e = h$.

■ Vent parallèle au panneau

L'action d'ensemble est assimilée à une force d'entraînement résultant des forces de frottement appliquées à **chaque** face du panneau.

La force par unité de surface est égale à la pression dynamique q de calcul du panneau multipliée par un coefficient de 0,010 ou 0,020 ou 0,040 suivant l'état de surface des faces du panneau (voir § 3.1.5).

5.2 Toitures isolées

■ Domaine de validité

- toitures à un ou plusieurs versants symétriques ;
- ligne de faîtage et bords horizontaux ;
- le vent peut attaquer les bords sur toute la périphérie de la toiture ;
- hauteur e minimale au-dessus du sol :

$$e \geq (0,005 \alpha + 0,55) h_\alpha \quad \text{pour } \alpha \geq 40^\circ$$

$$e \geq 0,75 h_\alpha \quad \text{pour } \alpha < 40^\circ$$

avec h_α dimension du versant suivant sa pente,

α angle de pente du versant (en degrés).

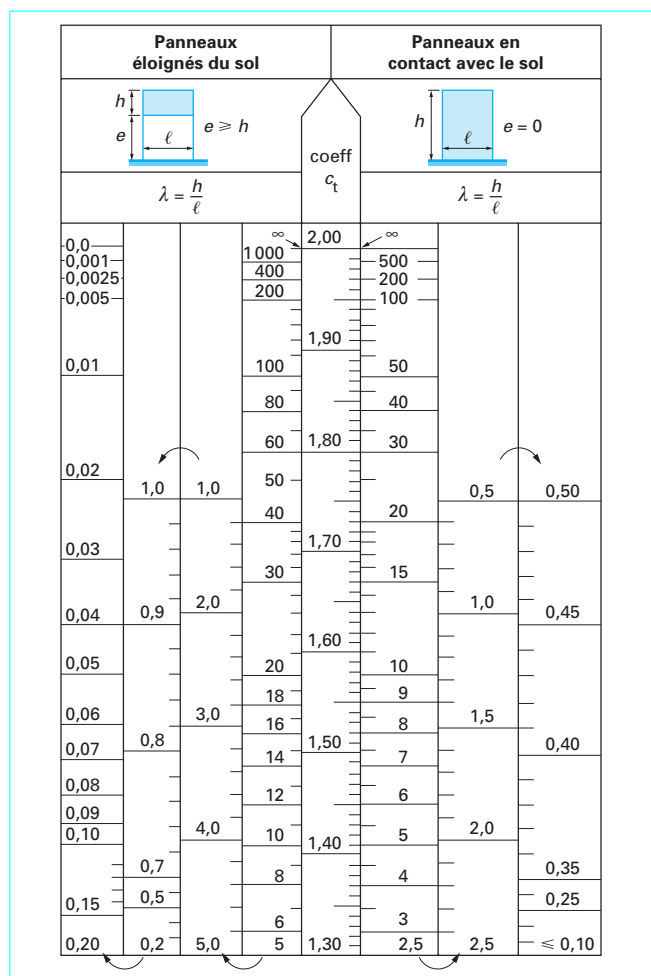
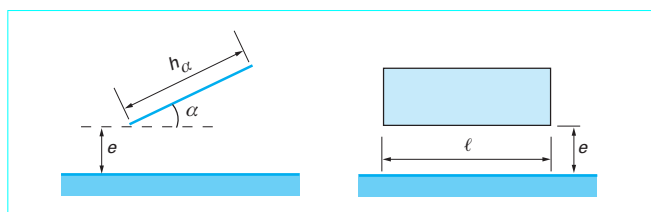
Figure 29 – Panneaux pleins isolés. Coefficient de traînée c_t 

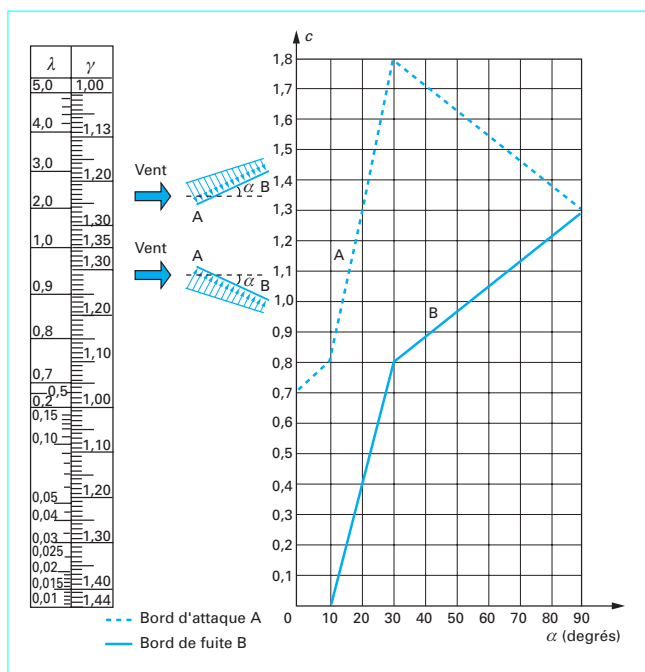
Figure 30 – Toiture isolée à un versant

■ Toitures à un versant (figure 30)

Les toitures isolées en forme de voûte de surbaissement inférieur ou égal à 1/7 peuvent être assimilées à un versant plan de longueur égale à la corde.

● **Vent normal** au bord horizontal du versant : le **rapport de dimensions** $\lambda = h_\alpha / \ell$ et les **coefficients de pression** c varient linéairement du bord d'attaque A au bord de fuite B du versant. Ils sont lus sur le diagramme de la figure 31.

Les coefficients c sont multipliés par un coefficient γ_α fonction du rapport de dimension λ et de l'angle de pente α du versant :

Figure 31 – Toitures isolées à un versant. Coefficients c et γ

— pour $\lambda < 0,20$: $\gamma_\alpha = \gamma$ (indépendant de α) est lu sur l'échelle de la figure 31 en fonction de λ ;

— pour $\lambda \geq 0,20$:

$$\alpha \leq 25^\circ : \gamma_\alpha = 1$$

$$25^\circ < \alpha < 35^\circ : \gamma_\alpha = \frac{\alpha - 25}{10} \gamma + \frac{35 - \alpha}{10}$$

$$35^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ : \gamma_\alpha = \gamma$$

$$40^\circ < \alpha < 50^\circ : \gamma_\alpha = \frac{50 - \alpha}{10} \gamma + \frac{\alpha - 40}{10}$$

$$\alpha \geq 50^\circ : \gamma_\alpha = 1$$

● **Vent parallèle** au bord horizontal du versant : la force d'entraînement est calculée comme pour les panneaux pleins (voir § 5.1).

■ Toitures isolées à deux versants symétriques

Les toitures isolées en forme de voûte de surbaissement inférieur ou égal à 1/7 ou les voûtes symétriques concaves vers le sol de surbaissement inférieur ou égal à 1/4 peuvent être assimilées à des toitures à deux versants plans de largeurs égales à la corde (figure 32).

● **Vent normal** au bord horizontal des versants

• **Rapport de dimensions** λ :

$$\lambda = \frac{h_\alpha}{\ell} (1 + \cos 2\alpha) \quad \text{pour } 0 \leq \alpha \leq 45^\circ$$

$$\lambda = \frac{h_\alpha}{\ell} \quad \text{pour } \alpha > 45^\circ$$

avec h_α dimension d'un versant suivant sa pente,
 α angle de pente des versants.

• **Coefficients de pression** c : ils varient linéairement entre le bord d'attaque, l'arête centrale et le bord de fuite.

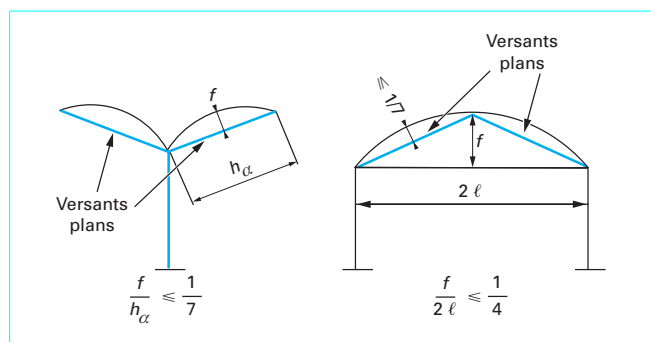


Figure 32 – Toitures isolées à deux voûtes symétriques assimilables à deux versants plans

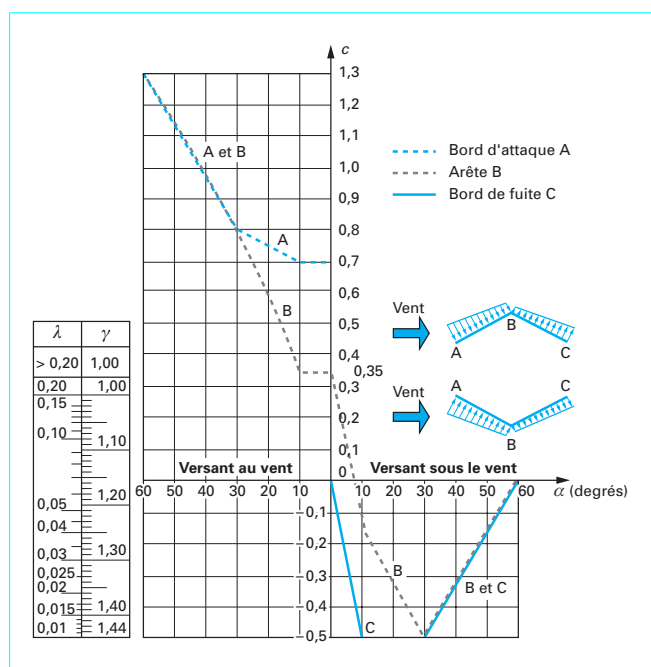


Figure 33 – Toitures isolées à deux versants symétriques. Coefficients c et γ

Ils sont lus sur le diagramme de la figure 33 en fonction de l'angle de pente α des versants. Si $\lambda < 0,20$, les coefficients c sont multipliés par un coefficient γ fonction de λ et lus sur l'échelle de la figure 33.

● Vent **oblique** au bord horizontal : le vent oblique est pris en compte par l'addition d'un coefficient de surpression $c = + 0,5$ sur la face intérieure de la toiture à l'une ou l'autre des extrémités, dans le sens de la longueur et sur une profondeur égale à h .

● Vent **parallèle** au bord horizontal du versant : la force d'entraînement est calculée comme pour les panneaux pleins.

■ Toitures isolées symétriques multiples

Les mêmes règles que pour les toitures multiples des constructions à base quadrangulaire sont applicables aussi bien au niveau des coefficients de pression c (voir § 3.1.3.1) qu'au niveau de l'action d'ensemble (voir § 3.1.5).

6. Effets du vent sur les constructions ajourées et constructions à treillis

6.1 Éléments plans

Ce sont, par exemple, les panneaux ajourés, les poutres à treillis. Ils peuvent être uniques ou multiples. L'action du vent sur ces structures est fonction :

- du rapport $\varphi = \frac{S_p}{S}$

avec S_p surface des parties pleines supposées régulièrement réparties,

S surface totale de l'élément supposé plein ;

Nota : pour les structures de ce type soumises aux intempéries, le coefficient φ peut être fortement modifié par la présence de givre. Deux études doivent alors être faites (avec et sans givre).

— de la forme de la section des barres pour les éléments à treillis (arêtes vives, sections tubulaires...).

■ Éléments plans uniques

- L'action d'ensemble du vent est donnée par l'expression :

$$\mathcal{T} = c_t q S_p$$

avec c_t coefficient global de traînée,

q valeur de la pression dynamique déterminée suivant le paragraphe 2,

S_p surface des parties pleines de l'élément.

- Coefficient global de traînée c_t

— Treillis constitués de **barres à arêtes vives ou faiblement arrondies** :

$$0 < \varphi < 0,25 : c_t = 2 - 1,6 \varphi$$

$$0,25 \leq \varphi \leq 0,90 : c_t = 1,6$$

$$0,90 < \varphi \leq 1,0 : c_t = c_{t\varphi=1} - [10c_{t\varphi=1} - 16] [1 - \varphi]$$

($c_{t\varphi=1}$ est lu sur l'échelle de la figure 29)

— Treillis constitués de **tubes** : les valeurs précédentes de c_t sont à multiplier par 0,6.

■ Éléments plans multiples

La règle suivante s'applique à des éléments se succédant dans la direction du vent, parallèles entre eux. Ils sont de caractéristiques identiques avec un coefficient $\varphi \leq 0,6$.

— Treillis constitués de **barres à arêtes vives ou faiblement arrondies** :

$p_1 = c_t q$ est la pression dynamique sur le premier élément directement frappé par le vent.

Sur les autres éléments, supposés protégés, les pressions seront successivement réduites par un coefficient η

soit : $p_1 = c_t q$

$$p_2 = \eta p_1$$

$$p_n = \eta p_{n-1}$$

Le coefficient η est fonction du rapport e/ℓ

avec e espacement entre les éléments,

ℓ plus petite dimension de l'élément.

Pour $\frac{e}{\ell} \leq 2 : \eta = 1 - 1,2 \varphi$

Pour $2 < \frac{e}{\ell} < 5 : \eta = 1 - 0,4 \varphi \left(5 - \frac{e}{\ell}\right)$

Pour $\frac{e}{\ell} \geq 5 : \eta = 1$

— Treillis constitués de **barres tubulaires** : aucune réduction n'est admise, quel que soit le rapport e/ℓ .

6.2 Ensembles prismatiques

Les constructions principalement visées par les règles sont les tours à treillis de section carrée ou triangulaire équilatérale.

L'action d'ensemble du vent est donnée par l'expression :

$$\mathcal{T} = c_t q_r S_p \quad \text{ou} \quad \mathcal{T} = \chi c_t q_r S_p$$

avec c_t coefficient global de traînée,

q_r valeur moyenne de la pression dynamique (au sens analytique),

S_p surface des parties pleines d'une seule face de la construction,

χ coefficient défini au tableau 12.

**Tableau 12 – Tours et pylônes à section carrée.
Vent diagonal. Coefficient χ**

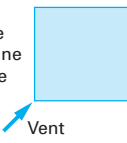
Nature de la structure	Coefficient χ	
	Barres simples	Barres jumelées
Charpente métallique	$1 + 0,6 \varphi$	1,2
Charpente en béton armé	1,2	1,2
Charpente en bois	1,2	1,3

■ Tours et pylônes à section carrée

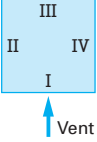
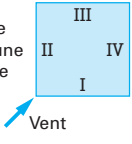
Validité : $0,08 \leq \varphi \leq 0,35$

Le coefficient global de traînée c_t est donné au tableau 13. Le coefficient χ est donné au tableau 12. Les coefficients permettant la décomposition de l'action d'ensemble $\mathcal{T}$ sur chacune des quatre faces de la construction sont donnés au tableau 14.

**Tableau 13 – Tours et pylônes à section carrée.
Coefficient global de traînée**

Incidence du vent	Barres à arêtes vives ou faiblement arrondies	Tubes
Incidence normale à une face 	$c_t = 3,2 - 2 \varphi$	$c_t = 2,24 - 1,4 \varphi$
Incidence suivant une diagonale 	$c_t = \chi (3,2 - 2 \varphi)$	$c_t = \chi (2,24 - 1,4 \varphi)$

**Tableau 14 – Tours et pylônes à section carrée.
Coefficients de décomposition de $\mathcal{T}$**

Face considérée (1)	Barres à arêtes vives ou faiblement arrondies				Tubes			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
Incidence normale à une face 	n 0,63	0,0	0,37	0,0	0,50	0,0	0,50	0,0
	t 0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Incidence suivant une diagonale 	n 0,22	0,22	0,13	0,13	0,18	0,18	0,18	0,18
	t 0,22	0,22	0,13	0,13	0,18	0,18	0,18	0,18

(1) n composante perpendiculaire à la face
 t composante parallèle à la face

■ Tours et pylônes à section triangulaire équilatérale

Validité : $0,08 \leq \varphi \leq 0,35$

Le coefficient global de traînée c_t ainsi que les coefficients de décomposition de l'action d'ensemble $\mathcal{T}$ sur chacune des 3 faces de la construction sont donnés aux tableaux 15 et 16 respectivement.

**Tableau 15 – Tours et pylônes à section triangulaire.
Coefficient global de traînée**

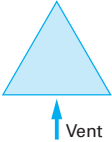
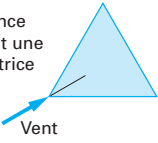
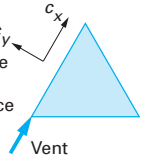
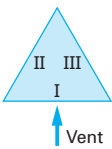
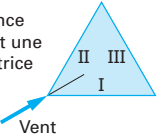
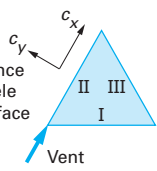
Face considérée	Barres à arêtes vives ou faiblement arrondies	Tubes
Incidence normale à une face 	$c_t = 3,2 - 4 \varphi$ avec un minimum de 2	$c_t = 2,24 - 2,8 \varphi$ avec un minimum de 1,4
Incidence suivant une bissectrice 	$c_t = 2,6 - 2 \varphi$	$c_t = 1,82 - 1,4 \varphi$
Incidence parallèle à une face 	$c_x = 2,6 - 2 \varphi$ $c_y = + 0,8$	$c_x = 1,82 - 1,4 \varphi$ $c_y = + 0,56$

Tableau 16 – Tours et pylônes à section triangulaire. Coefficients de décomposition de $\mathcal{T}$

Face considérée (1)		Barres à arêtes vives ou faiblement arrondies			Tubes		
		I	II	III	I	II	III
Incidence normale à une face 	n	0,63	0,09	0,09	0,50	0,13	0,13
	t	0,0	0,16	0,16	0,0	0,22	0,22
Incidence suivant une bissectrice 	n	0,16	0,16	0,37	0,13	0,13	0,50
	t	0,27	0,27	0,0	0,22	0,22	0,0
Incidence parallèle à une face 	n	$1,67 - 1,09 \varphi$	0,0	$0,68 - 0,64 \varphi$	$0,93 - 0,81 \varphi$	0,0	$0,65 - 0,81 \varphi$
	t	$-0,38 + 0,63 \varphi$	0,0	$0,74 - 0,37 \varphi$	$-0,22 + 0,35 \varphi$	0,0	$0,69 - 0,35 \varphi$

(1) n composante perpendiculaire à la face
 t composante parallèle à la face

7. Actions perpendiculaires à la direction du vent

Suivant la forme et l'élancement d'une construction, le nombre de Reynolds caractérisant l'écoulement d'un fluide autour d'un cylindre peut prendre une valeur telle qu'il se produit des zones tourbillonnaires agissant perpendiculairement à la direction du vent. Au-delà d'une certaine valeur du nombre de Reynolds, ces tourbillons se détachent périodiquement et alternativement (tourbillons de Karman) et donnent naissance, sur la construction, à des efforts alternés perpendiculaires à la direction du vent (forces de dérive).

Le risque est la mise en résonance de la construction sous ces efforts.

Application au calcul des cheminées

On admet que la construction est soumise à une force de dérive périodique, perpendiculaire à la direction du vent, de répartition triangulaire, et dont l'action est assimilée à celle d'une force statique.

Valeur maximale de la force de dérive $\mathcal{L}$:

à chaque niveau de calcul, on a :

$$\mathcal{L} = \delta c_L \beta' q_{cr} d \frac{H}{h}$$

avec δ coefficient de réduction de dimension dépendant de la hauteur (voir § 2.2.5),

c_L coefficient de dérive,

β' coefficient de majoration dynamique tenant compte de l'amortissement,

q_{cr} pression critique correspondant à la vitesse de résonance V_{cr} ,

d largeur du maître-couple,

h hauteur de la construction,

H cote de niveau du point de calcul ;

$$V_{cr} = \frac{d}{SrT} \text{ (m/s)}$$

avec d largeur du maître-couple (en m),

Sr nombre de Strouhal, fonction de la rugosité des surfaces, de la forme de la construction et de la viscosité du fluide,

T période propre du mode fondamental de vibration de la construction (en s).

Les règles NV 65 admettent arbitrairement que le risque de résonance n'est plus à craindre pour $V_{cr} > 25$ m/s.

L'annexe 8 des règles NV 65 conseille de prendre :

$Sr = 0,20$ pour les cylindres rugueux (catégorie V)

$Sr = 0,25$ à $0,30$ pour les prismes à base carrée

$c_L = 0,20$

$$\beta' = \frac{\pi}{\Delta}$$

avec Δ décrément logarithmique d'amortissement.

Il y a lieu d'être prudent avec les valeurs de Δ données dans l'annexe 8 des règles NV 65.

L'annexe C de l'ENV 1991-2.4 (Eurocode 1, partie 2.4. vent) donne des valeurs plus réalistes pour ce coefficient.

Ainsi, pour l'étude du détachement tourbillonnaire de Karman sur des constructions sans équipements spéciaux d'amortissement, l'Eurocode 1 partie 2.4 donne les valeurs suivantes :

$$\Delta = a_1 \mu_1 + b_1 \geq \delta_{\min}$$

avec μ_1 fréquence propre du mode fondamental de vibration en flexion (en Hz),

$a_1, b_1, \delta_{\min}$ paramètres donnés au tableau 17.

Actions résultantes

La vitesse V_{cr} étant connue il faut, à chaque niveau de calcul pour cette vitesse :

— déterminer la force de dérive $\mathcal{L}$ dans la direction perpendiculaire à celle du vent ;

— déterminer la force de traînée $\mathcal{T}$ dans la direction du vent ;

— vérifier la structure sous la composante géométrique $\sqrt{\mathcal{L}^2 + \mathcal{T}^2}$ de ces efforts.

Tableau 17 – Coefficients a_1 , b_1 , $\delta_{\min}$ pour le calcul du décrétement logarithmique selon ENV 1991-2.4

Types de structures	a_1	b_1	$\delta_{\min}$
Bâtiments en béton armé	0,045	0,05	0,10
Bâtiments en acier	0,045	0	0,05
Structures composites béton + acier	0,08	0	0,08
Tours en béton armé	0,05	0	0,025
Cheminées en béton armé	0,075	0	0,03
Cheminées en acier soudé non revêtues	0	0,015	0
Cheminée en acier avec revêtement ou isolation thermique	0	0,025	0
Cheminée en acier avec deux revêtements ou plus	0	0,030	0
Cheminée en acier avec revêtement en briques	0	0,07	0
Cheminées accouplées sans revêtement	0	0,015	0
Cheminée haubanée en acier sans revêtement	0	0,04	0
Ponts en acier + pylônes treillis acier			
— soudés.....	0	0,02	0
— assemblés par boulons à haute résistance.....	0	0,03	0
— assemblés par boulons ordinaires.....	0	0,05	0
Ponts composites	0	0,04	0
Ponts en béton			
— précontrainte sans fissures.....	0	0,04	0
— précontrainte avec fissures.....	0	0,10	0
Câbles			
— câbles et fils parallèles.....	0	0,006	0
— câbles et fils en torons.....	0	0,020	0

8. Calcul de la période propre du mode de vibration d'une construction

La connaissance de la période propre d'une construction est nécessaire pour déterminer les coefficients d'amplification dynamique dans la direction du vent et dans la direction perpendiculaire. Il peut donc être nécessaire de calculer cette période suivant plusieurs directions, et suivant la configuration de la construction.

La valeur de la période est directement liée à celle de la masse excitée. Aussi, s'il est envisagé de cumuler les actions du vent avec celles de la neige, la période doit, en toute rigueur, être évaluée avec la masse correspondant au poids propre de la construction augmenté de la demi-neige.

On trouvera ci-après les principales méthodes utilisées pour le calcul des périodes.

■ Analyse modale

Les logiciels de calcul des structures sont maintenant d'une utilisation courante. Ces logiciels sont maintenant dotés de « modules dynamiques » permettant aisément de réaliser des analyses modales (détermination des modes de vibration) pour les structures les plus complexes compte tenu des performances actuelles des micro-ordinateurs.

Cette méthode de calcul se généralise de plus en plus.

■ Méthode de Rayleigh

Les poids P_1 , P_2 , ... P_n de chaque tronçon ou de chaque plancher de la construction sont supposés concentrés à leurs centres de gravité et agir horizontalement.

Soit Y_1 , Y_2 , ... Y_n les déplacements des centres de gravité sous ces efforts. La période est alors donnée par la formule :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i Y_i^2}{g \sum_{i=1}^n P_i Y_i}}$$

avec g accélération due à la pesanteur.

Les déplacements Y_1 , ... Y_n peuvent être calculés par une analyse statique linéaire informatique.

■ Quelques cas courants

● **Masse concentrée reposant sur un support de masse négligeable :**

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{Pf}{g}}$$

avec f déplacement en tête du support sous l'action d'une force horizontale unitaire,

P poids de la masse concentrée en tête du support,

g accélération due à la pesanteur.

● **Masse répartie sur toute la hauteur d'une construction d'inertie constante :**

$$T = 1,79h^2 \sqrt{\frac{P}{gEI}}$$

avec h hauteur de la construction,

P poids par unité de hauteur,

I moment d'inertie de la section,

E module d'élasticité du matériau.