

# Efforts climatiques

## Effet du vent

|   |    |
|---|----|
| 1 GENERALITES .....   | 2  |
| 1.1 Objectifs et modélisation des actions du vent.....                                | 2  |
| 1.1.1) Objectifs.....   | 2  |
| 1.1.2) Actions du vent .....  | 2  |
| 1.2 Notions .....   | 3  |
| 1.3 Prérequis .....   | 5  |
| 1.4 Domaine d'application et limites du cours.....                                    | 5  |
| 1.4.1) Domaine d'application .....  | 5  |
| 1.4.2) Limites du cours.....  | 5  |
| 2) VITESSE DU VENT .....  | 6  |
| 2.1) Détermination de la vitesse de référence du vent .....                           | 6  |
| 2.1.1) $v_{b,0}$ : valeur de base de la vitesse de référence.....                     | 6  |
| 2.1.2) $v_b$ : vitesse de référence du vent .....                                     | 6  |
| 2.2) Détermination de la vitesse moyenne du vent.....                                 | 8  |
| 2.3) Turbulence du vent .....   | 11 |
| 2.3.1) $\sigma_v$ : écart type de la composante turbulente de la vitesse du vent..... | 11 |
| 2.3.2) $I_v(z)$ : intensité de la turbulence de la vitesse du vent .....              | 11 |
| 2.4) $q_p(z)$ : pression dynamique de pointe .....                                    | 12 |
| 3) BATIMENTS.....   | 13 |
| 3.1) Bâtiment ou ouvrage isolé ? .....  | 13 |
| 3.2) $c_s$ et $c_d$ : coefficients structuraux .....                                  | 13 |
| 3.3) $c_{pe}$ et $c_{pi}$ : coefficients de pression - généralités .....              | 16 |
| 3.4) $c_{pe}$ : coefficient de pression extérieure.....                               | 16 |
| 3.4.1) Influence de l'aire de l'élément étudié .....                                  | 16 |
| 3.4.2) Influence de la position pour une paroi verticale (murs) .....                 | 17 |
| 3.4.3) Parois horizontales (toitures terrasses).....                                  | 18 |
| 3.4.4) Parois inclinées à 1 versant (toitures mono-pente).....                        | 19 |
| 3.4.5) Parois inclinées à 2 versants (toitures bi-pente) .....                        | 20 |
| 3.4.6) Autres cas.....  | 21 |
| 3.5) $c_{pi}$ : coefficient de pression intérieure .....                              | 21 |
| 3.5.1) Cas où le bâtiment ne possède pas de face dominante .....                      | 22 |
| 3.5.2) Cas où le bâtiment possède une face dominante .....                            | 22 |
| 3.6) $w_i$ , $w_e$ : pressions aérodynamiques sur les bâtiments .....                 | 23 |
| 3.6.1) $w_e$ : pression aérodynamique agissant sur les surfaces extérieures .....     | 23 |
| 3.6.2) $w_i$ : pression aérodynamique agissant sur les surfaces intérieures .....     | 23 |
| 3.6.3) $F_w$ : force normale exercée par le vent sur un élément .....                 | 23 |
| 4) OUVRAGES ISOLÉS – NOTIONS .....  | 23 |
| 4.1) Définition .....   | 23 |
| 4.2) $C_{p,net}$ : coefficient de pression des éléments isolés.....                   | 23 |
| 5) FORCES DE FROTTEMENT .....   | 23 |
| 6) EXERCICE .....   | 24 |
| 7) METHODOLOGIE D'ETUDE DU VENT SUR UN BATIMENT A BASE RECTANGULAIRE .....            | 25 |
| 8) ZONES DE VENT .....  | 28 |

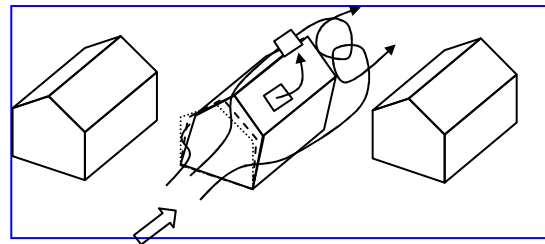
# 1 GENERALITES

## 1.1 Objectifs et modélisation des actions du vent

### 1.1.1) Objectifs

Le vent, agissant sur une structure, engendre une déformée, éventuellement un arrachement d'éléments ... Par conséquent, il provoque des efforts sur les différentes parois qu'il rencontre.

Ce cours a pour objet de modéliser cette action sous forme de chargements (force ponctuelle, charge linéique, charge surfacique).



Cet effort fait partie des charges variables, et plus particulièrement des charges dites climatiques.

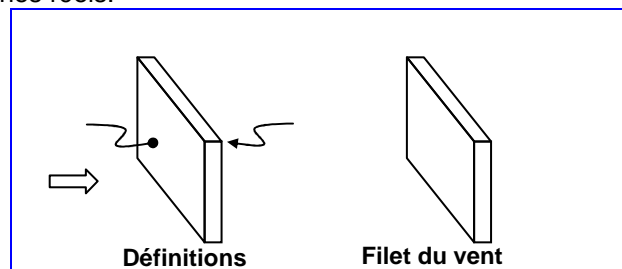
### 1.1.2) Actions du vent

L'effet du vent est une action très complexe. Il est donc indispensable de prendre des hypothèses simplificatrices, sans trop s'éloigner des phénomènes réels.

- **Cas d'un mur isolé :**

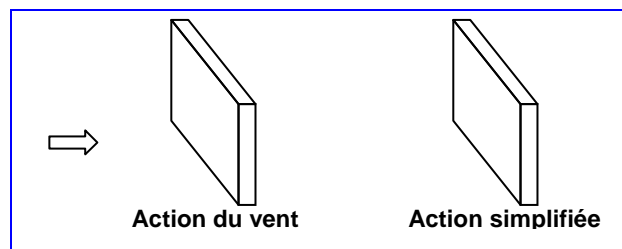
Analysons le parcours de l'air :

- \_\_\_\_\_
- \_\_\_\_\_
- \_\_\_\_\_
- \_\_\_\_\_



Ce filet de vent provoque des \_\_\_\_\_ très aléatoires (forces surfaciques normales aux parois). Les pressions seront comptées positives alors que les dépressions seront comptées négatives.

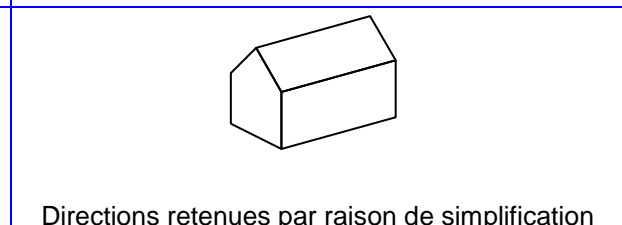
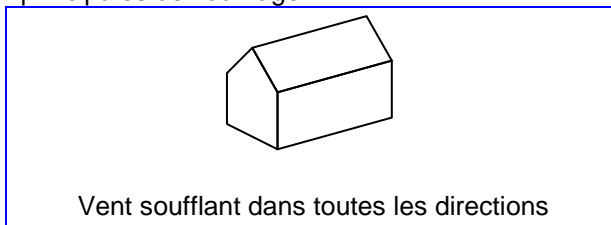
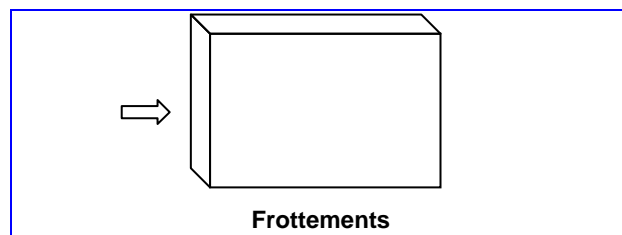
L'effet du vent est dynamique. Il varie d'intensité au cours du temps.



Mais par souci de simplification, nous nous rapprocherons d'un effort statique, constant par zone, et qui soit sécuritaire (plus défavorable).

Lorsque le vent agit latéralement sur la paroi, des \_\_\_\_\_ se développent.

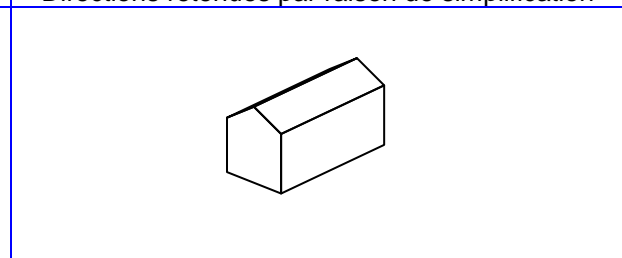
Généralement, le vent souffle selon une direction quelconque. Cependant, nous pouvons considérer que les effets les plus défavorables sont obtenus lorsqu'il suit les directions principales de l'ouvrage.



- **Cas d'un bâtiment fermé :**

Le vent arrivant sur la première face est chassé latéralement ou dévié au dessus de l'ouvrage. Des turbulences sont ainsi engendrées.

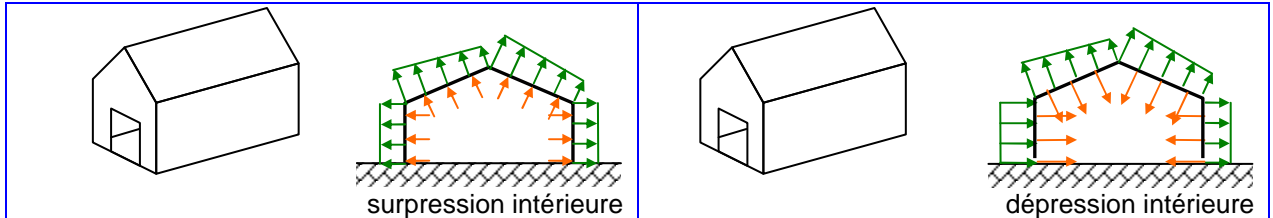
En fonction de ses positions horizontale et verticale, les pressions du vent sur la paroi peuvent varier.



Un phénomène de pression ou dépression intérieure se superpose à ces efforts extérieurs (forces normales et frottements).

Si les ouvertures sont majoritairement au vent \_\_\_\_\_

Si les ouvertures sont majoritairement sous le vent \_\_\_\_\_

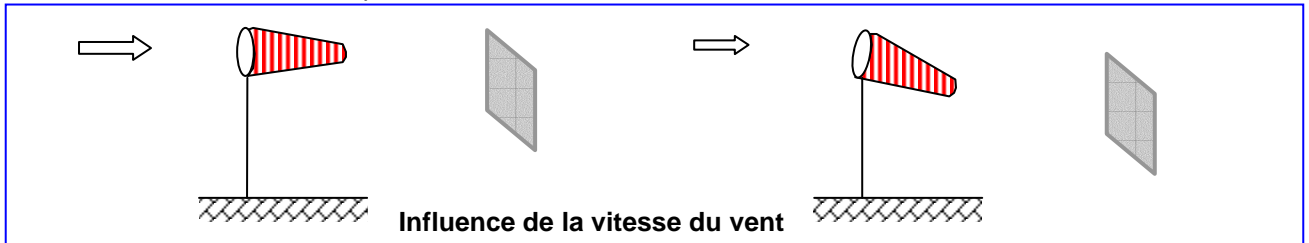


**1.2 Notions**

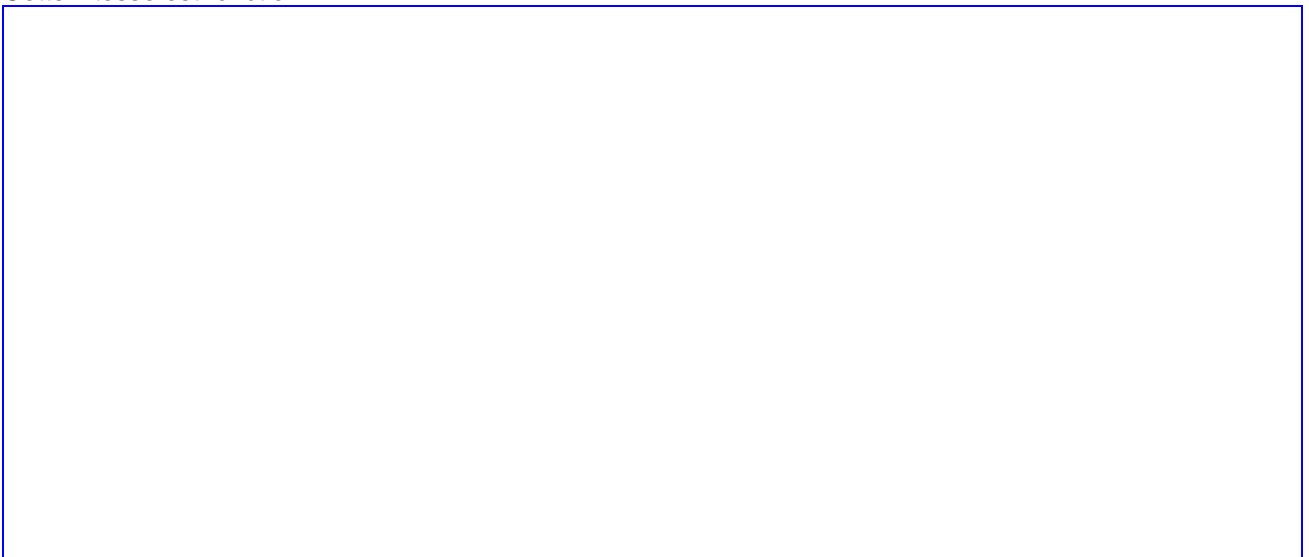
Les effets du vent ont pour base la mécanique des fluides. Cette action climatique engendre principalement des efforts de surpression et dépression.

Elle fait partie des actions variables (dans le temps) et fixes (dans l'espace), ce qui peut provoquer parfois un effet très défavorable de résonance de la structure.

Plus la vitesse du vent sera importante, \_\_\_\_\_



Cette vitesse est fonction :

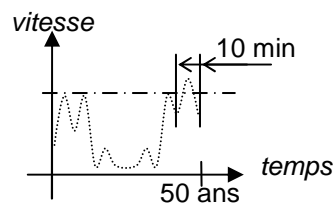


Les vitesses de vent proches de la mer sont plus élevées que dans les terres



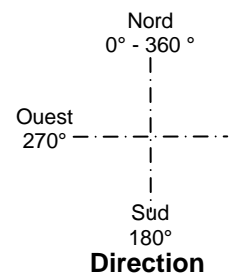
Lieu d'implantation de l'ouvrage

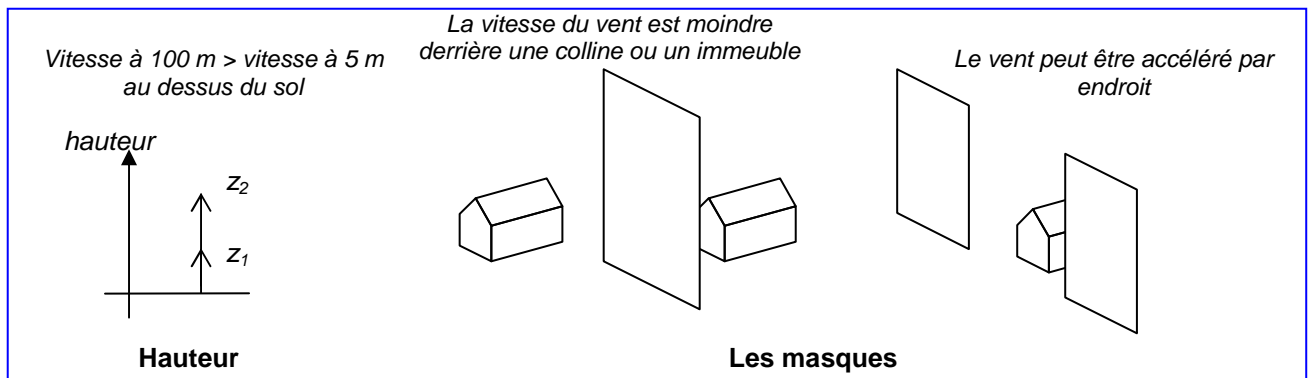
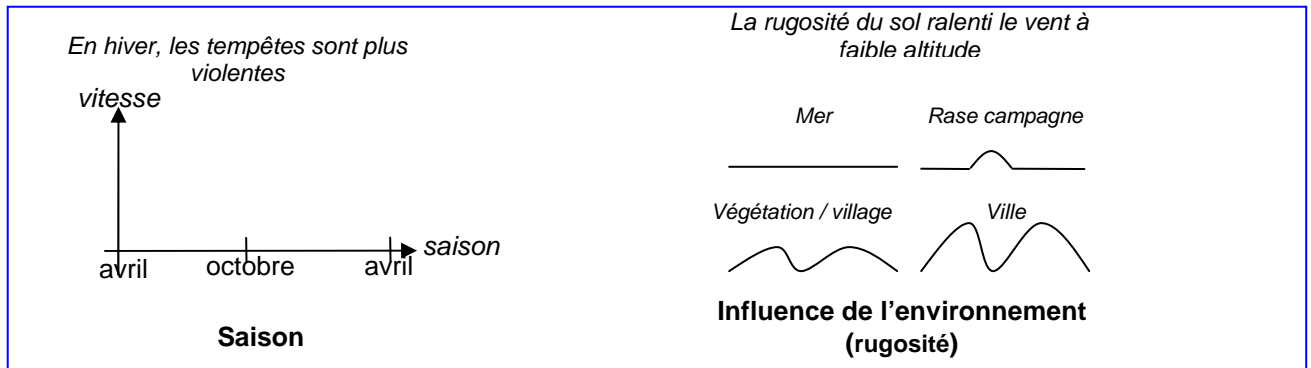
Une construction temporaire à peu de chance de subir la tempête du siècle !



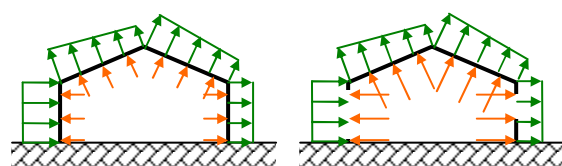
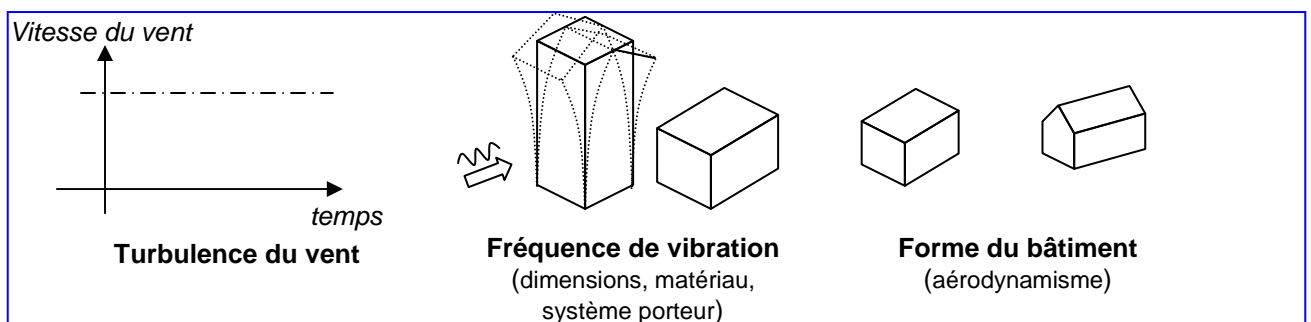
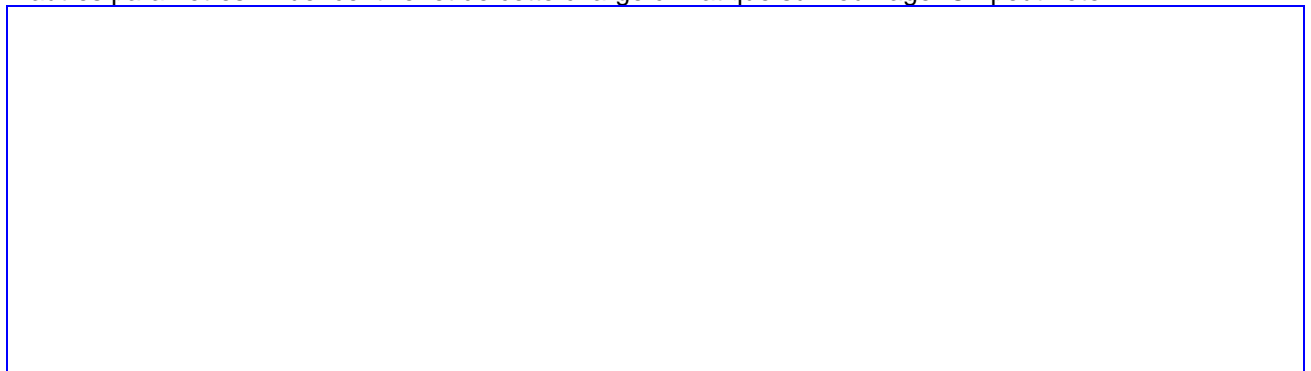
Temps de retour : 50 ans

Vents forts en provenance du Nord/ouest

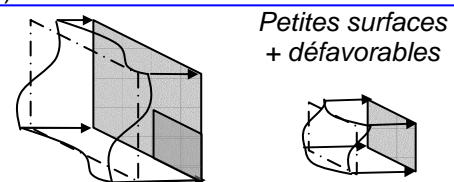




D'autres paramètres influencent l'effet de cette charge climatique sur l'ouvrage. On peut noter :



**Position des ouvertures**



**Etendue de la surface**

### **1.3 Prérequis**

Pour bien comprendre la logique du règlement vent (EC1-4), il est indispensable d'avoir des notions de mécanique des fluides et de s'y rattacher dès que possible (en considérant, par exemple, que le bâtiment est dans un venturi ou qu'il est noyé – pour imaginer des courants nautiques, par exemple. Le théorème de Bernoulli, à propos des pressions sur les parois, sera maîtrisé par l'apprenant). Il faut aussi avoir quelques connaissances en mécanique des structures (statique principalement) et en mécanique vibratoire (le terme de résonance ne doit pas être totalement inconnu).

### **1.4 Domaine d'application et limites du cours**

#### 1.4.1) Domaine d'application

La partie 1.4 de l'EN 1991 donne des règles et des méthodes de calcul de l'action du vent sur des bâtiments de hauteurs inférieures à 200 m. Cette partie de l'Eurocode 1 traite aussi des cheminées, des tours en treillis et les ponts (route, rail et passerelle) courants. Ne sont pas concernés par cette partie, les ponts à haubans ou suspendus, les mâts haubanés et les ouvrages en mer. Pour les ouvrages complexes, il est recommandé de réaliser des essais en soufflerie.

Les ouvrages de génie civil sont soumis à l'action du vent. Cette action peut être dimensionnante dans le cas de constructions légères ou fragiles (c'est-à-dire principalement les ouvrages en charpentes – assez peu pour les ouvrages en béton).

Il est donc indispensable de pouvoir évaluer les effets climatiques engendrés par ces courants d'air.

#### 1.4.2) Limites du cours

Le règlement est assez complexe. Selon les formes des bâtiments, leurs hauteurs ... les abaques sont différents. Ce cours se limite donc à l'étude de structures particulières donc les conditions sont :

- ouvrage en France métropolitaine ;
- structure acier ou béton (pour les coefficients de vibration) ;
- hauteur inférieure à 200 m ;
- bâtiment à base rectangulaire ;
- perméabilité (surface des ouvertures sur chaque face / surface totale de la face) < 0,3 ;
- terrain plat ;
- pas d'obstacle au vent (type collines ou immeubles) ;
- 2 pans de toiture au maximum (toiture plate, 1 pan ou 2 pans) ;

Dans les autres cas, il est impératif de se reporter à la norme.

Par définition, nous prendrons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- effet du vent défavorable lorsqu'il souffle selon les directions principales de l'ouvrage (sans faire tourner la direction du vent) ;
- période de retour de 50 ans ;
- forces de frottement négligeables dans la plupart des cas.

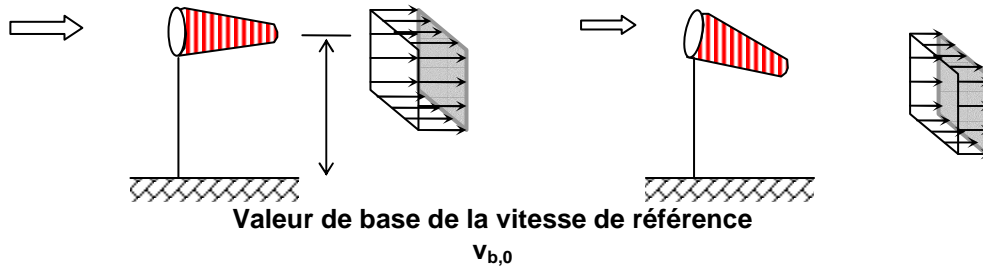
Par grand vent, nous supposons que les portes et fenêtres sont fermées (hormis la porte la plus grande – cas supposé le plus défavorable pour quitter le bâtiment).

## 2) VITESSE DU VENT

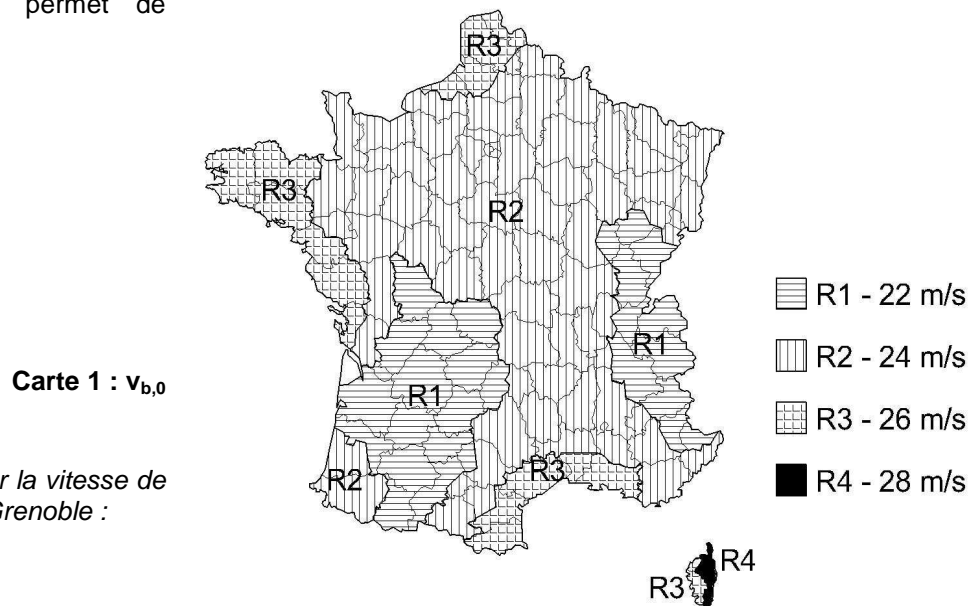
### 2.1) Détermination de la vitesse de référence du vent

#### 2.1.1) $v_{b,0}$ : valeur de base de la vitesse de référence

La valeur de base de la vitesse de référence du vent, notée  $v_{b,0}$ , correspond à la vitesse moyenne sur 10 minutes observée à 10 m au dessus du sol en terrain dégagé (maximum observé tous les 50 ans<sup>(\*)</sup>). Elle n'est fonction que de l'emplacement de l'ouvrage.



La carte de droite permet de déterminer sa valeur :



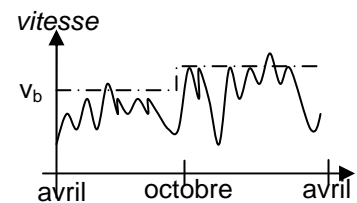
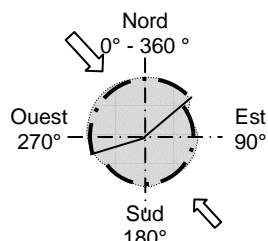
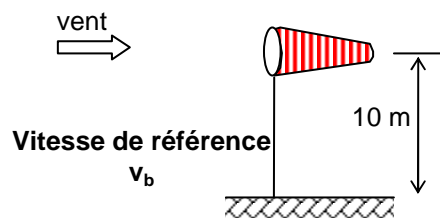
*Exercice 1 : déterminer la vitesse de base à Grenoble :*

#### 2.1.2) $v_b$ : vitesse de référence du vent

La vitesse du vent observable en rase campagne à 10 m de hauteur dépend, entre autres, de deux paramètres : la saison et la direction.

La vitesse de référence du vent se distingue de la vitesse de base par la prise en compte de ces deux phénomènes :

$$v_b = v_{b,0} \times C_{dir} \times C_{saison}$$



**$C_{saison}$  : Influence de la saison**

- Le coefficient de direction  $c_{dir}$  permet de minorer jusqu'à 30% la vitesse du vent. Cette minoration est fonction de l'emplacement de l'ouvrage :

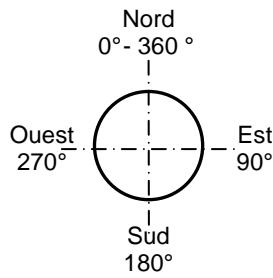
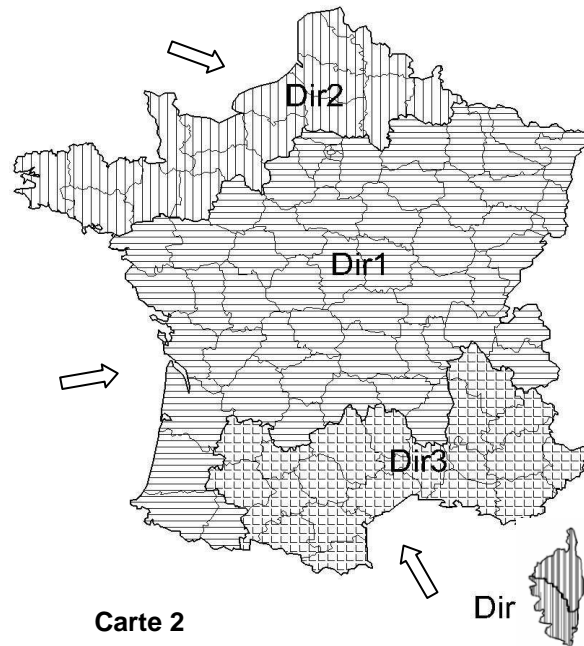


Tableau 1  $C_{dir}$

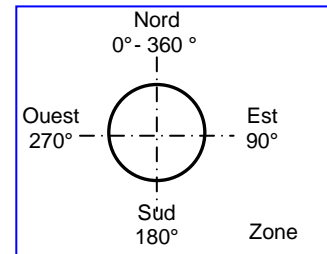
| Zones | Secteur 1    |           | Secteur 2    |           |
|-------|--------------|-----------|--------------|-----------|
|       | direction    | $c_{dir}$ | direction    | $c_{dir}$ |
| Dir1  | [150° - 10°] | 1         | [10° - 150°] | 0,70      |
| Dir2  | [150° - 70°] | 1         | [70° - 150°] | 0,70      |
| Dir3  | [250° - 50°] | 1         | [50° - 250°] | 0,85      |



Carte 2

Exercice 2 : déterminer le coefficient  $c_{dir}$  à Grenoble pour un vent en provenance de l'Est :

---



- Le coefficient de saison  $c_{saison}$  permet de minorer jusqu'à 20 % la vitesse de référence du vent.

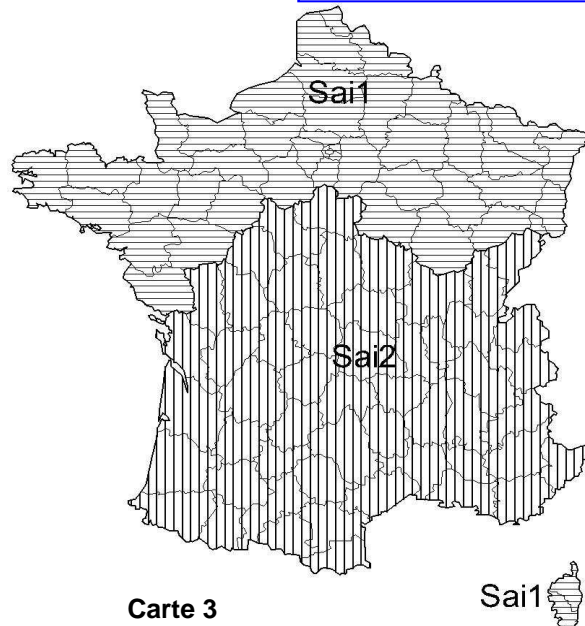
Tableau 2  $C_{saison}$

| Zones | Avril à septembre | Octobre à mars |
|-------|-------------------|----------------|
| Sai1  | 0,80              | 1              |
| Sai2  | 0,90              | 1              |

Remarque : il faudra être prudent quant à la prise en compte de ce coefficient. En effet, les ouvrages de Génie Civil ont généralement une durée de vie supérieure à 1 an. Dans ce cas, la prise en compte du coefficient  $c_{saison}$  ne se justifie pas ( $c_{saison} = 1$ ).

Exercice 3 : déterminer le coefficient  $C_{saison}$  à Grenoble pour le montage d'un chapiteau au mois de juillet :

---



Carte 3

Exercice 4 : déterminer la vitesse de référence du vent pour une construction (permanente) à Grenoble. On prendra le cas du vent en provenance de l'ouest.

|  |  |  |
|--|--|--|
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

- Le coefficient de probabilité  $c_{prob}$

Plus la durée de vie d'un ouvrage est longue, plus il risque de rencontrer une tempête exceptionnelle. Or, le risque d'effondrement de cet ouvrage ne peut être raisonnablement plus élevé que celui d'un ouvrage temporaire. Il est donc nécessaire de tenir compte d'un effort de vent plus important si l'on souhaite que ce bâtiment résiste longtemps.

(\*) La durée de retour de la valeur  $v_{b,0}$  est par défaut de 50 ans. Si le maître d'ouvrage indique dans le CCTP une autre période, on devra multiplier la valeur  $v_b$  par le coefficient  $c_{prob}$  tel que :

$$c_{prob} = \left( \frac{1 - K \times \ln(-\ln(1 - P))}{1 - K \times \ln(-\ln(0,98))} \right)^n$$

K : paramètre de forme dépendant du coefficient de variation de la loi des valeurs extrêmes = 0,15 ;

n : est l'exposant = 0,5 ;

P : probabilité de dépassement (= 1/durée de retour).

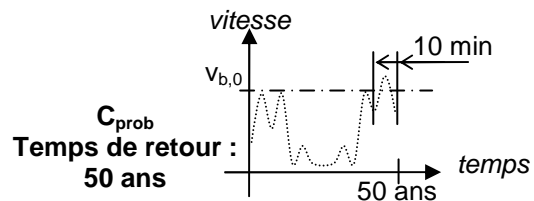


Tableau 3  $C_{prob}$

| Période de retour [année] | 100  | <b>50</b>   | 25   | 10   | 5    | 2    |
|---------------------------|------|-------------|------|------|------|------|
| $c_{prob}$                | 1,03 | <b>1,00</b> | 0,97 | 0,92 | 0,88 | 0,82 |

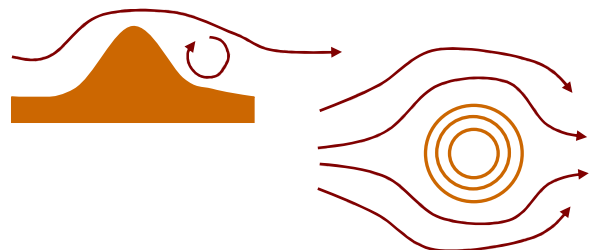
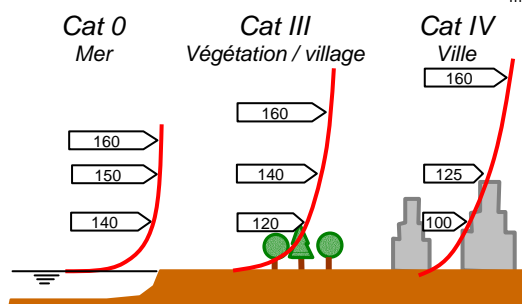
Remarque : dans les exercices, à défaut d'indication, nous prendrons la valeur conseillée par l'Eurocode, c'est-à-dire une période de retour de 50 ans.

Concrètement, la durée de vie sera indiquée dans les documents particuliers du marché si elle n'est pas de 50 ans.

### 2.2) Détermination de la vitesse moyenne du vent

La vitesse moyenne du vent est celle qui sera observée sur la construction étudiée. Elle doit donc tenir compte de l'environnement de la construction, c'est-à-dire des turbulences observées à la hauteur (z) de l'élément recevant le vent. Elle sera notée  $v_m(z)$  tel que :

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



#### $C_r(z)$ : Influence de la hauteur et de la catégorie du site

La rugosité du sol engendre des frottements qui ralentissent le vent à basse altitude.

#### $C_0(z)$ : Influence de l'orographie

La présence de reliefs engendre une modification de la vitesse du vent.

- Le coefficient de rugosité  $c_r(z)$  tient compte de l'état de surface du site ainsi que de la hauteur, au dessus du sol, de la facette recevant le vent :

$$c_r(z) = k_r \times \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{pour} \quad z_{min} \leq z \leq z_{max} = 200 \text{ m}$$

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

$$\text{avec} \quad k_r = 0,19 \times \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} = 0,19 \times \left(\frac{z_0}{0,05}\right)^{0,07}$$

et  $z_{0,II}$  : longueur de rugosité pour un site de catégorie II

Remarque : si l'ouvrage est à plus de 200 m au dessus du sol, des essais en soufflerie sont obligatoires pour déterminer l'influence de la hauteur.

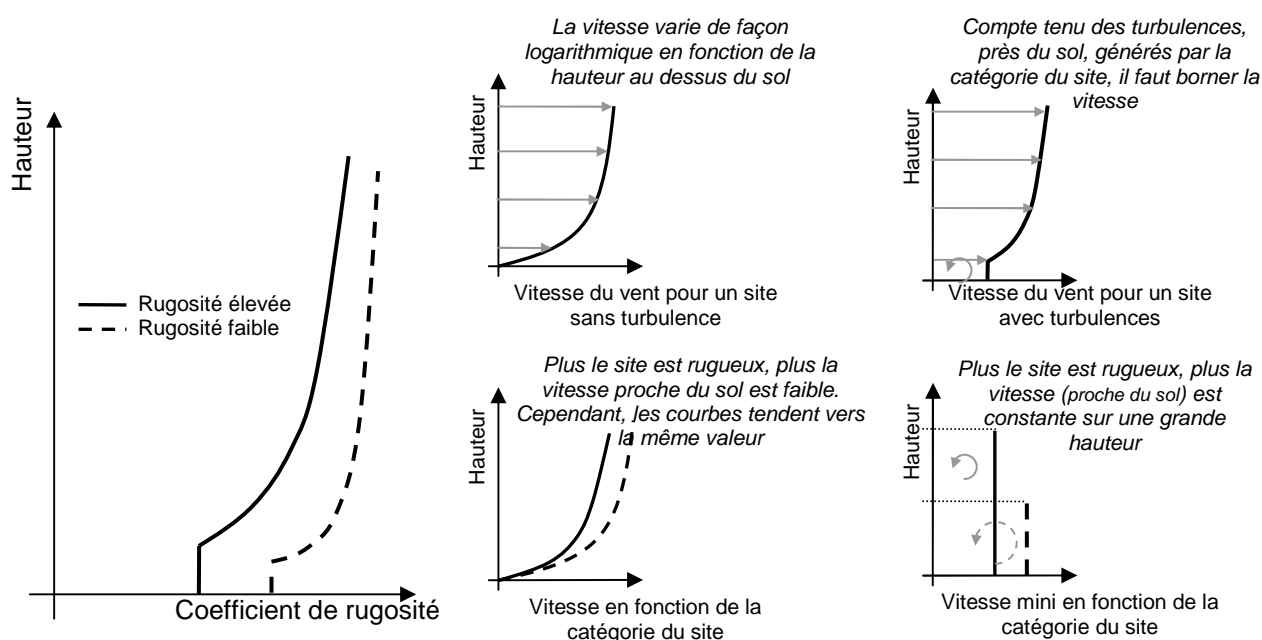


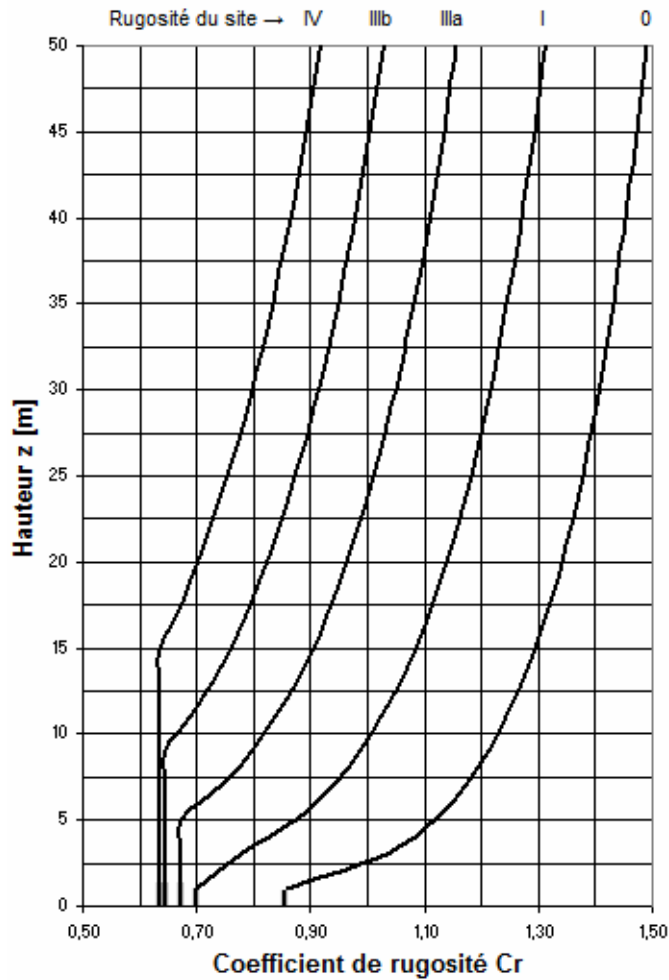
Le tableau suivant présente les valeurs de  $z_0$  et  $z_{min}$  :

Tableau 4  $Z_0, Z_{min}$

| Catégorie de rugosité du terrain |  | $z_0$<br>[m] | $z_{min}$<br>[m] | $k_r$  |
|----------------------------------|--|--------------|------------------|--------|
| 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.<br>Photo représentant la catégorie 0 dans le cas où le vent provient de la mer. Dans les autres directions, il sera de catégorie IV | 0,005        | 1                | 0,1617 |
| II                               | Lacs ou zone plate et horizontale à végétation négligeable et libre de tous obstacles.   | 0,05         | 2                | 0,19   |
| IIIa                             | Zone à végétation basse telle que l'herbe, sans ou avec quelques obstacles isolés (arbres, bâtiments) séparés les uns des autres d'au moins 20 fois leur hauteur.  | 0,20         | 5                |        |
| IIIb                             | Zone avec une couverture végétale régulière, des bâtiments, ou avec des obstacles isolés séparés d'au plus 20 fois leur hauteur.   | 0,5          | 9                | 0,2232 |
| IV                               | Zone dont au moins 15 % de la surface est recouverte de bâtiments dont la hauteur moyenne est supérieure à 15 m ; forêts.  | 1,0          | 15               | 0,2343 |

Photos de l'EC2



Abaque 1  $C_r$ 

- Le coefficient orographique  $c_o(z)$  est là pour ajuster la vitesse du vent en fonction des obstacles aux alentours de l'ouvrage. En effet, ces obstacles peuvent avoir un effet d'accélération.

Tableau 5  $C_o(z)$ 

| Procédure |  | Coefficient orographique  |
|-----------|--|---|
| 0         | Cas général  | $C_o(z) = 1$  |
| 1         | Obstacles de hauteurs et de forme variées              | Se reporter à l'annexe nationale de l'Eurocode 1 chapitre 4 § 4.3.3 |
| 2         | Obstacles bien individualisés (falaises, collines ...) |   |

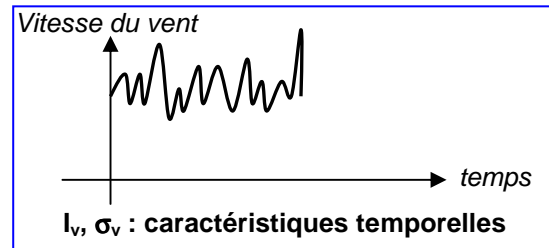
Remarque : pour l'influence de la présence de constructions de hauteurs bien plus élevées, se reporter au paragraphe 4.4 de l'EC1-4

Exercice 5 : déterminer la vitesse moyenne du vent en provenance de l'ouest à une hauteur de 18 m au dessus du sol (6<sup>ème</sup> étage), en centre ville de Grenoble – les effets des obstacles sont supposés négligeables (période de retour de 50 ans).

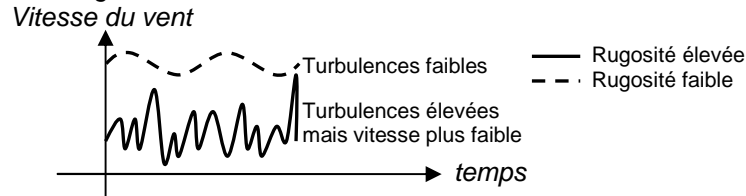
**2.3) Turbulence du vent**

Lorsque le vent agit, sa vitesse varie d'un instant à l'autre (bourrasques plus ou moins intenses).

On caractérise cette variation par \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_ qui est proportionnelle à \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_



Remarque : turbulence = irrégularité de la vitesse



**Comparaison selon la rugosité du site**

2.3.1)  $\sigma_v$  : écart type de la composante turbulente de la vitesse du vent

$$\sigma_v = v_b \times k_r \times k_t$$

- Le facteur du terrain  $k_r$  a déjà été défini ci-dessus :

$$k_r = 0,19 \times \left( \frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} = 0,19 \times \left( \frac{z_0}{0,05} \right)^{0,07}$$

- Le coefficient de turbulence  $k_t$  :

Tableau 6  $k_t$

| Procédure   | Coefficient $k_t$  |
|---|--|
| 0 Cas général   | $k_t = 1$  |
| 1 Obstacles de hauteurs et de forme variées                             | $k_t = c_o(z) \left[ 1 - 2 \times 10^{-4} \times (\log_{10}(z_0) + 3)^6 \right]$ |
| 2 Site plat avec obstacles bien individualisés (falaises, collines ...) | $k_t = 1 - 2 \times 10^{-4} \times (\log_{10}(z_0) + 3)^6$                       |

2.3.2)  $I_v(z)$  : intensité de la turbulence de la vitesse du vent

L'intensité de la turbulence de la vitesse du vent correspond à l'écart type de la vitesse du vent ramené à une vitesse unitaire. Ainsi,

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_t}{c_o(z) \times \ln(z/z_0)} \quad \text{pour} \quad z_{\min} \leq z \leq z_{\max} = 200 \text{ m}$$

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

*Exercice 6 : déterminer les caractéristiques de la turbulence de la vitesse du vent en provenance de l'ouest à une hauteur de 18 m au dessus du sol (6<sup>ème</sup> étage), en centre ville de Grenoble – les effets des obstacles sont supposés négligeables.*

### 2.4) $q_p(z)$ : pression dynamique de pointe

Pour une vitesse  $v_m$  d'un fluide de masse volumique  $\rho$ , Bernoulli définit la pression de cet élément sur une paroi telle que :

$$p = \frac{1}{2} \times \rho \times v_m^2$$

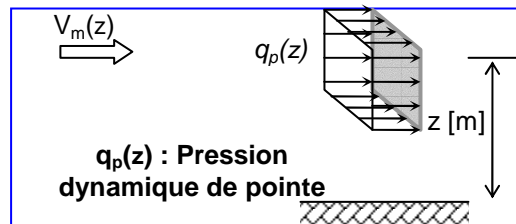
Le règlement a adapté cette loi dans le cas d'un fluide (ou plutôt l'air) n'ayant pas une vitesse constante. L'effet de la turbulence de ce vent, observé à une hauteur  $z$ , amène une pression supplémentaire qui est estimée être 7 fois plus importante :

$$\Delta p = (7 \times I_v(z)) \times \frac{1}{2} \times \rho \times v_m^2$$

Ainsi, par addition des constatations ci-dessus, l'EC1 retient la formule de pression suivante :

$$q_p(z) = [1 + 7 \times I_v(z)] \times \frac{1}{2} \times \rho \times v_m^2(z)$$

$\rho$  : masse volumique de l'air prise égale à 1,225 kg/m<sup>3</sup> (quelque soit le taux d'humidité).



*Exercice 7 : déterminer l'intensité de la pression dynamique de pointe pour un vent en provenance de l'ouest à une hauteur de 18 m au dessus du sol (6<sup>ème</sup> étage), en centre ville de Grenoble – les effets des obstacles sont supposés négligeables.*

### 3) BATIMENTS

#### 3.1) Bâtiment ou ouvrage isolé ?

Nous distinguons les ouvrages fermés (bâtiments perméables ou non – partie 3 :  $c_{pi}$  et  $c_{pe}$ ) et les ouvrages sans intérieur (exemple : acrotères, auvents, murs isolés, clôtures ... - partie 4 :  $c_{pnet}$ ).

#### 3.2) $c_s$ et $c_d$ : coefficients structuraux

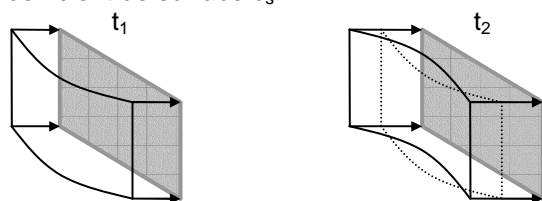
Le vent est une action d'intensité aléatoire. Elle varie dans le temps et dans l'espace. A un même instant  $t$ , sur deux facettes différentes, la fréquence du vent peut être différente voire déphasée. Il y a donc lieu de tenir compte de cet effet favorable par un coefficient de dimension noté  $c_s$ . Cet effet sera d'autant plus favorable que le bâtiment est grand.

De même,  $c_d$  est un coefficient dit dynamique. Il tient compte de la mise en vibration de la structure engendrée par la turbulence.

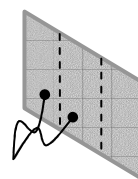
Effet favorable de l'étendue de la surface :  
 $c_s \leq 1$

Effet défavorable de la mise en résonance de la structure  
 $c_d \geq 1$

- Coefficient de surface  $c_s$  :



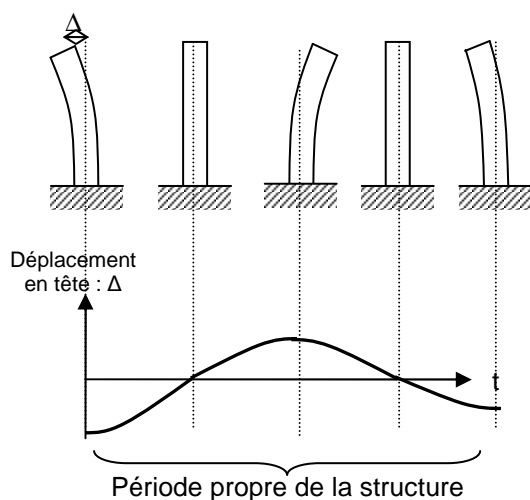
$c_s$  : effet favorable de surface



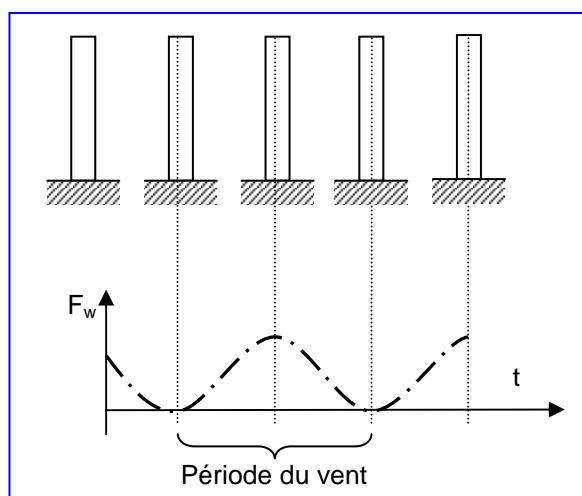
Zones soumises à une vibration en opposition de phase

- Coefficient dynamique  $c_d$  :

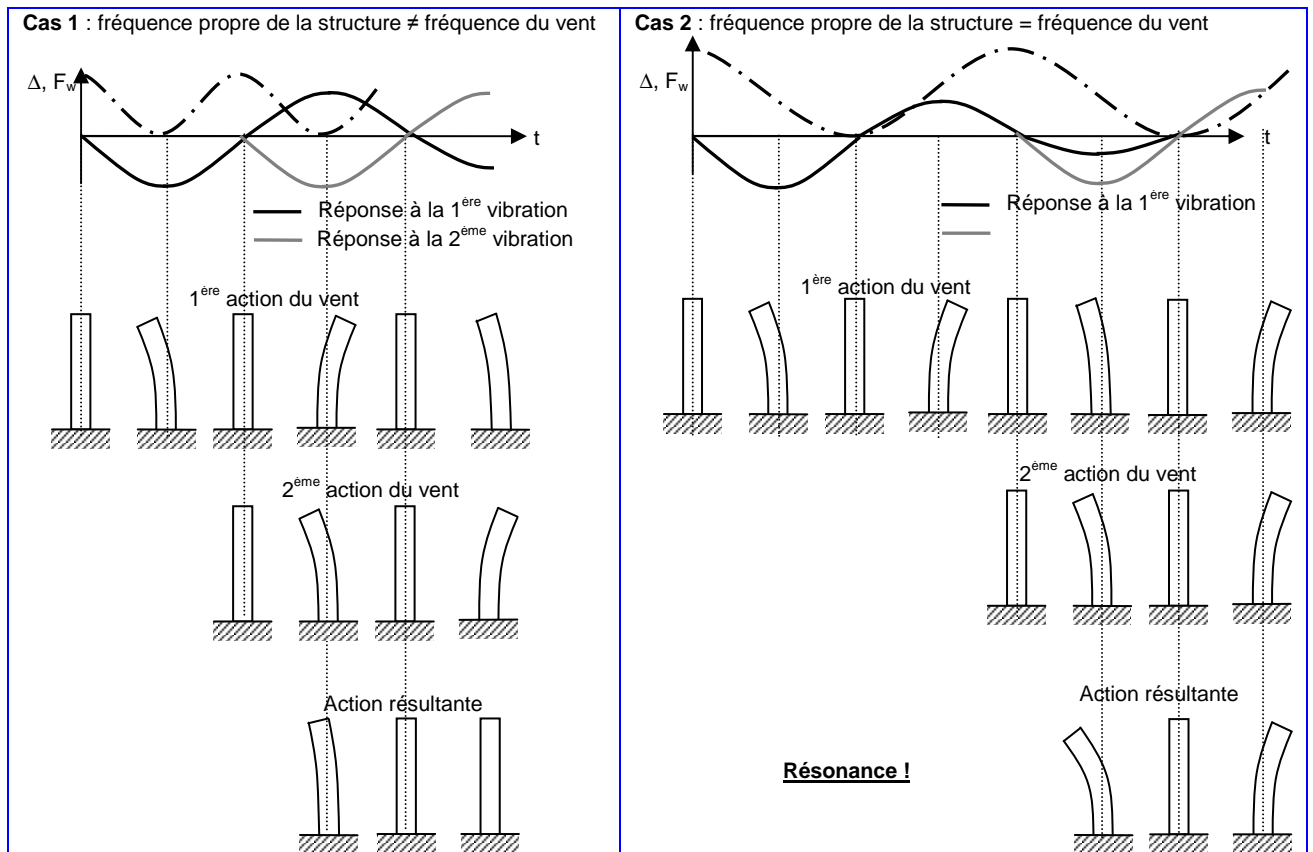
#### Comportement dynamique de la structure



#### Comportement du vent



Le bâtiment est un oscillateur ayant une période (ou fréquence) propre. Le vent est une action dynamique (c'est à dire variable dans le temps) qui peut amplifier le mouvement, c'est la résonance de la structure. Le principe du calcul des actions du vent consiste à déterminer une charge statique affectée du coefficient  $c_s$ .



- Valeur du coefficient  $c_s \times c_d$  :

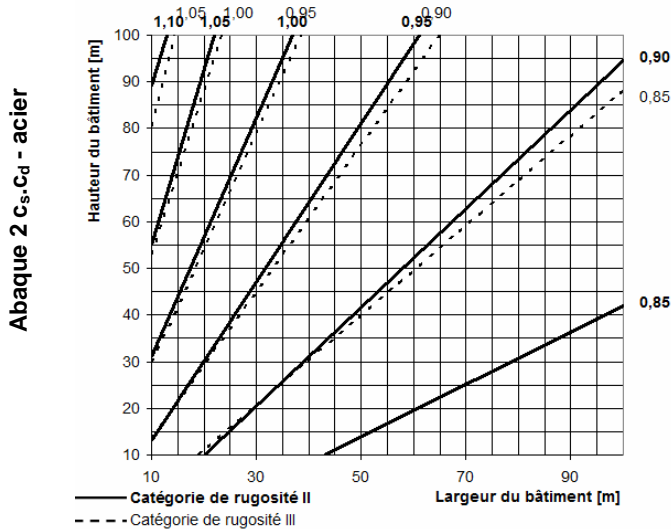
Cependant, l'Eurocode 1, chapitre 4 (§ 6.3) précise les modalités de calcul de ce coefficient en fonction de paramètres vibratoires de la structure.

Nous retiendrons les cas suivants :

|   |                           |
|---|---------------------------|
| Bâtiments de hauteur < 15 m   | $c_s \times c_d = 1$      |
| Bâtiments en charpente de hauteur < Min [100 m ; 4 x longueur du bâtiment], comportant des cloisons   |                           |
| Bâtiments en acier à plusieurs niveaux, murs extérieurs verticaux, à base rectangulaire et à répartition régulière de la rigidité et des masses | Abaque 2 $c_s c_d$        |
| Bâtiments en béton à plusieurs niveaux, murs extérieurs verticaux, à base rectangulaire et à répartition régulière de la rigidité et des masses | Abaque 3 $c_s c_d$        |
| Autres cas  | Se reporter à l'EC1.4.6.3 |

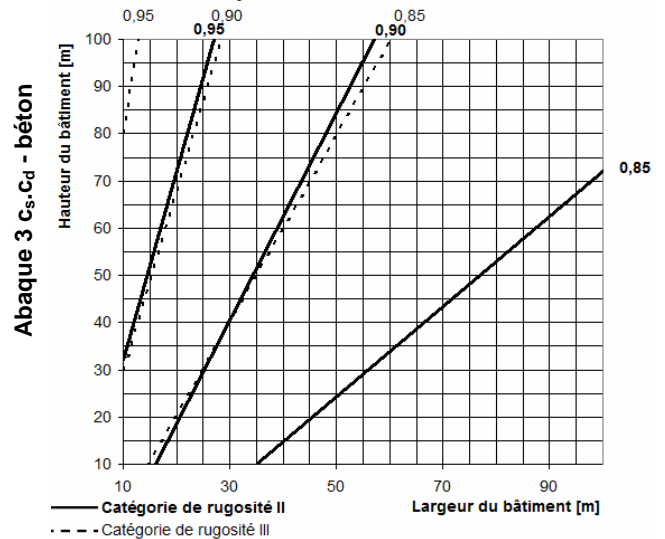
Bâtiment en acier à :  
 - base rectangulaire ;  
 - plusieurs niveaux ;  
 - murs extérieurs verticaux ;  
 - répartition régulière de la rigidité et des masses.

**Cs.Cd pour les bâtiments en acier**



Bâtiment en béton à :  
 - base rectangulaire ;  
 - plusieurs niveaux ;  
 - murs extérieurs verticaux ;  
 - répartition régulière de la rigidité et des masses.

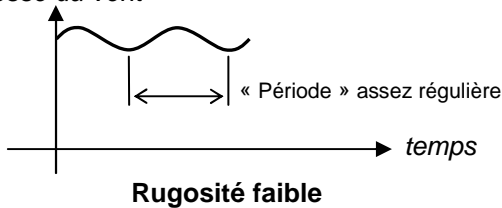
**Cs.Cd pour les bâtiments en béton**



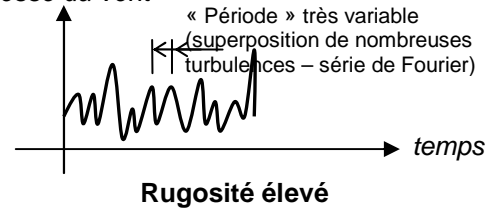
Remarque : pour les ouvrages en catégories de rugosité de terrain non définies, nous prendrons :  
 IV → III et 0 et I → II

Plus la catégorie du site de rugosité est élevée, plus les turbulences sont importantes mais aléatoires. Les fréquences des vitesses sont donc très variées pour un site de catégorie IV. Il est donc plus difficile de faire entrer en résonance le bâtiment.

Vitesse du vent

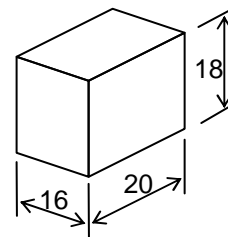


Vitesse du vent



Remarque : « largeur du bâtiment » : plus petit côté de la base du bâtiment.

Exercice 8 : considérons un bâtiment situé à Grenoble. Cet ouvrage est à parois (voiles), en béton armé, de base rectangulaire 16 x 20 m<sup>2</sup>, à toiture terrasse, de hauteur 18 m au dessus du sol, à plusieurs niveaux. Déterminez le produit des coefficients  $c_s.c_d$ .



### 3.3) $c_{pe}$ et $c_{pi}$ : coefficients de pression - généralités

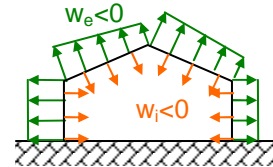
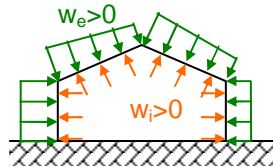
Un mur possède deux faces. L'une est exposée à l'extérieur, et l'autre est à l'intérieur.

Le vent souffle directement sur la face extérieure, mais crée aussi une surpression (ou éventuellement une dépression) dans le bâtiment qui aura tendance à augmenter ou à diminuer l'effet du vent sur l'ouvrage.

Il est donc nécessaire de déterminer ces deux effets.

$c_{pe}$  est le coefficient permettant l'évaluation de l'effort du vent sur la paroi extérieure, alors que  $c_{pi}$  est celui qui permet de déterminer l'effet du vent sur une paroi à l'intérieur du bâtiment.

Par convention, nous prendrons les surpressions positives et les dépressions négatives :



**Coefficients de surpression : positifs**

**Coefficients de dépression : négatifs**

Remarque : naturellement, les combinaisons de valeurs positives et négatives sont possibles (et même fréquentes).

### 3.4) $c_{pe}$ : coefficient de pression extérieure

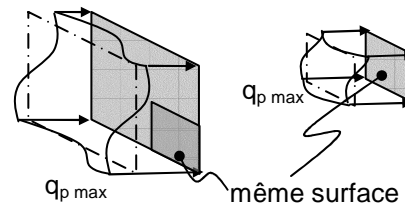
Le coefficient de pression extérieure est fonction de :

- l'étendue de la surface recevant le vent ;
- sa position (au vent, sous le vent ... et l'altitude).

#### 3.4.1) Influence de l'aire de l'élément étudié

Ces coefficients dépendent de la surface sur laquelle le vent souffle (surface de l'élément calculé). On obtiendra ainsi des valeurs différentes pour la vérification de l'action sur un vitrage (vérification, par exemple du non arrachement de celui-ci – surface relativement faible) et le calcul du vent agissant sur un potelet (surface plus élevée généralement).

Il sera nécessaire d'extrapoler les valeurs de  $c_{pe}$  à partir de  $c_{pe,1}$  et  $c_{pe,10}$  données par l'Eurocode :



**Vent sur grande surface**

$$F_{10\text{ m}^2} \ll \int_A q_{\text{max}} \times dA$$

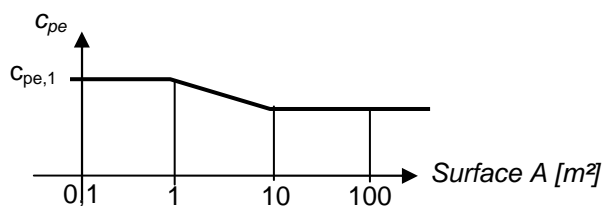
$$A < 1\text{ m}^2 \rightarrow c_{pe} = c_{pe,1}$$

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

$$A > 10\text{ m}^2 \rightarrow c_{pe} = c_{pe,10}$$

**Vent sur petite surface**

$$F_{1\text{ m}^2} \approx \int_A q_{\text{max}} \times dA$$



Exercice 9 : si dans le tableau on lit  $c_{pe,1} = -2,5$  et  $c_{pe,10} = -1,8$ , quel est le coefficient  $c_{pe}$  à retenir pour l'étude du vent sur un vitrage de  $1,5 \times 1,5\text{ m}^2$  ?

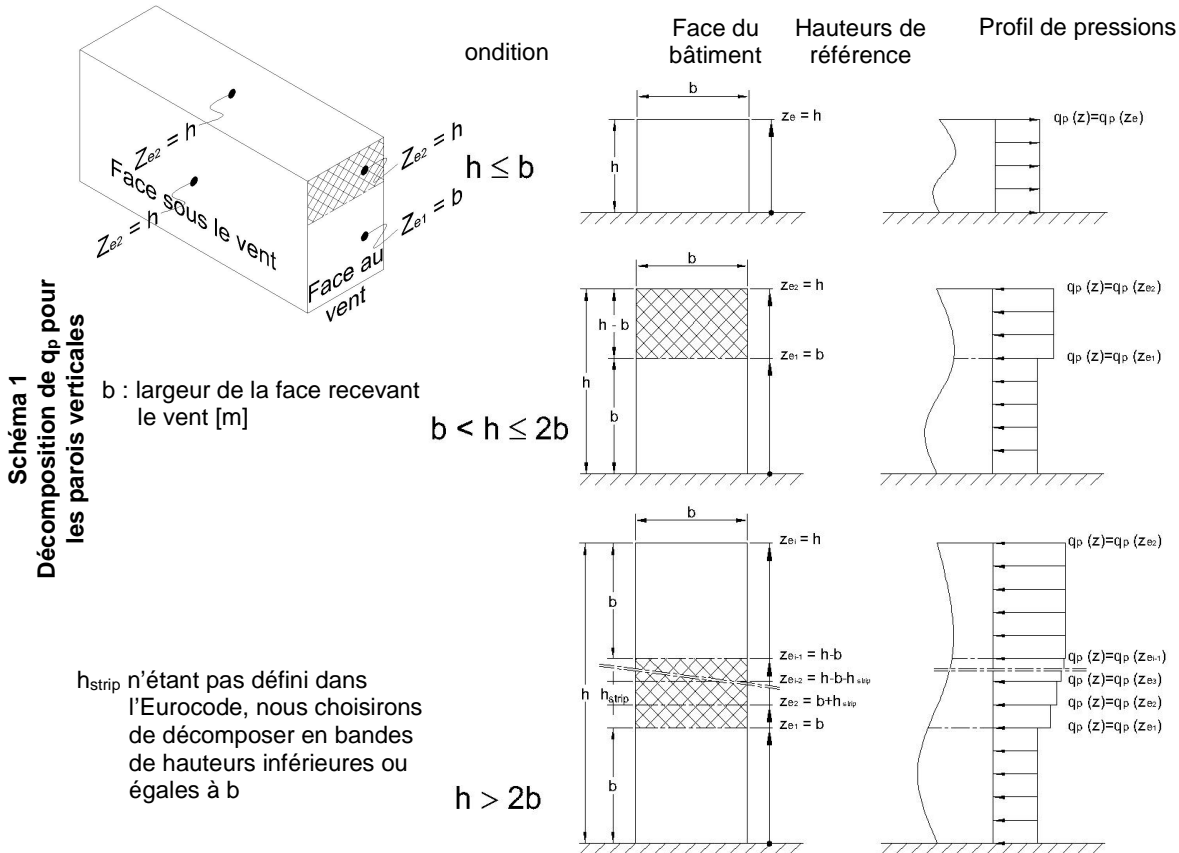


3.4.2) Influence de la position pour une paroi verticale (murs)

Selon la position de la facette recevant le vent, la pression sera plus ou moins importante.

- Position verticale de la facette **recevant** le vent (face au vent)

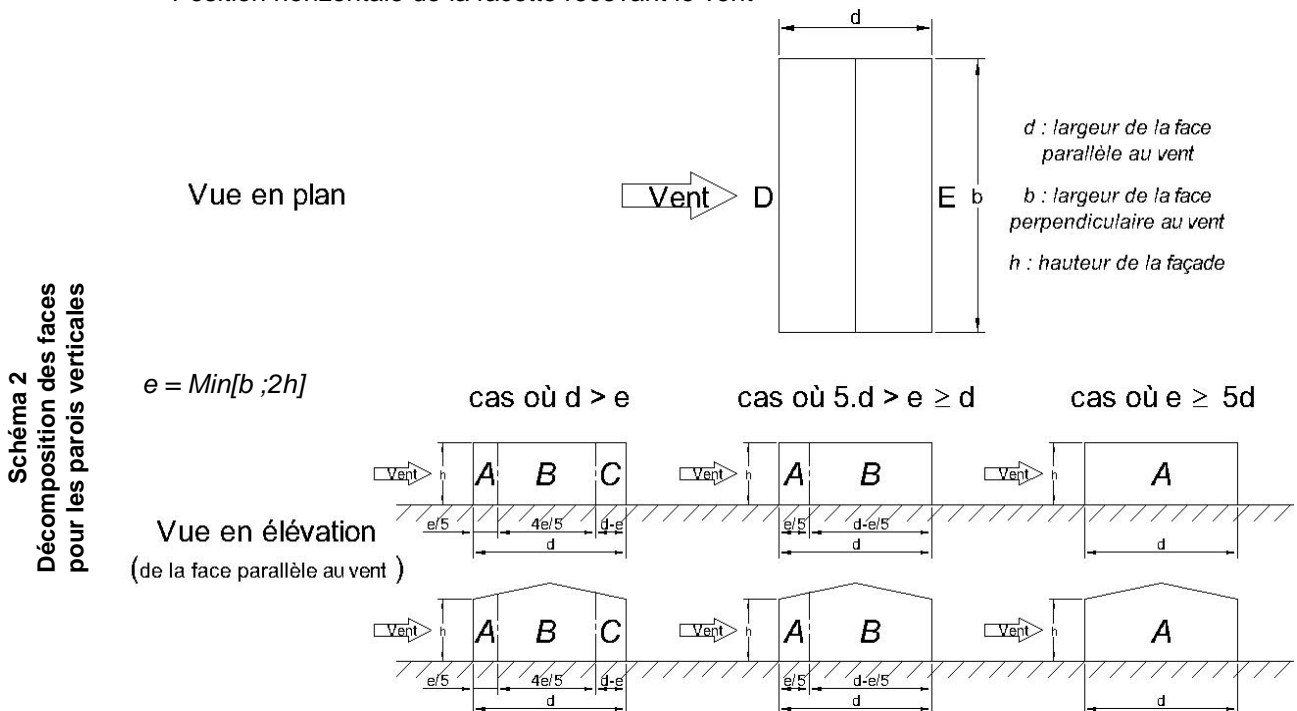
La décomposition se fera en fonction du rapport  $h/b$  :



- Position verticale des facettes **ne recevant pas** le vent (faces sous le vent)

On ne décomposera pas en tranches comme pour les faces au vent. Une seule pression sera calculée :  $q_p(z) = q_p(h)$  – avec  $h$  : hauteur de la construction (et non pas de la façade considérée).

- Position horizontale de la facette recevant le vent



- Valeur de  $c_{pe}$

Une fois localisé l'élément calculé (zone A, B, C, D ou E), on extrapolera la valeur de  $c_{pe}$  à partir du tableau suivant :

Tableau 7  $c_{pe}$  pour les parois verticales

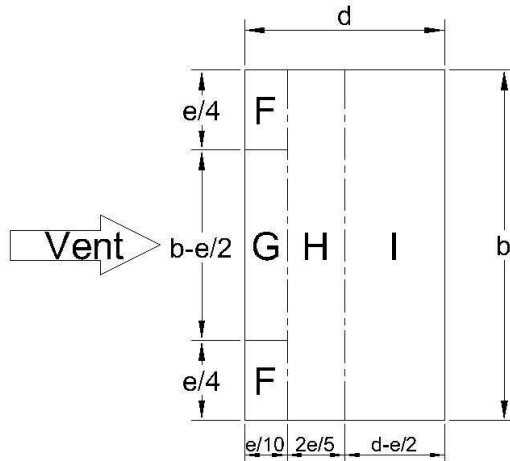
| Zone        | A           |            | B           |            | C           |            | D           |            | E           |            |
|-------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|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

Remarque : pour les autres rapports  $h/d$ , faire une interpolation linéaire.

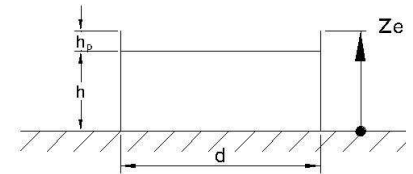
### 3.4.3) Parois horizontales (toitures terrasses)

On place dans cette catégorie les toitures formant un angle par rapport à l'horizontale inférieur à 5°

- Position de la facette recevant le vent

Schéma 3 bâtiment à toiture terrasse plate  
Décomposition des faces pour les parois horizontales

$d$  : largeur de la face parallèle au vent  
 $b$  : largeur de la face perpendiculaire au vent  
 $h$  : hauteur de la façade  
 $e$  :  $\text{Min}[b ; 2h]$

Tableau 8  $c_{pe}$  pour les parois horizontales

| Zone            |               | F           |            | G           |            | H           |            | I           |            |
|-----------------|---------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|
| Type de toiture |               | $c_{pe,10}$ | $c_{pe,1}$ | $c_{pe,10}$ | $c_{pe,1}$ | $c_{pe,10}$ | $c_{pe,1}$ | $c_{pe,10}$ | $c_{pe,1}$ |
| Sans acrotère   |               | - 1,8       | - 2,5      | - 1,2       | - 2,0      | - 0,7       | - 1,2      | - 0,2       | - 0,2      |
|                 |               | - 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      |
|                 |               | - 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      |
|                 |               | - 1,4       | - 2,0      | - 0,9       | - 1,6      | - 0,7       | - 1,2      | + 0,2       | + 0,2      |
|                 |               | - 1,2       | - 1,8      | - 0,8       | - 1,4      | - 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       |            |

Remarque : il faut donc étudier 2 cas à chaque fois, en changeant le sens sur la zone I : + 0,2 et - 0,2.

3.4.4) Parois inclinées à 1 versant (toitures mono-pente)

Schéma 4-1 bâtiment à 1 versant  
Décomposition des faces pour les parois inclinées

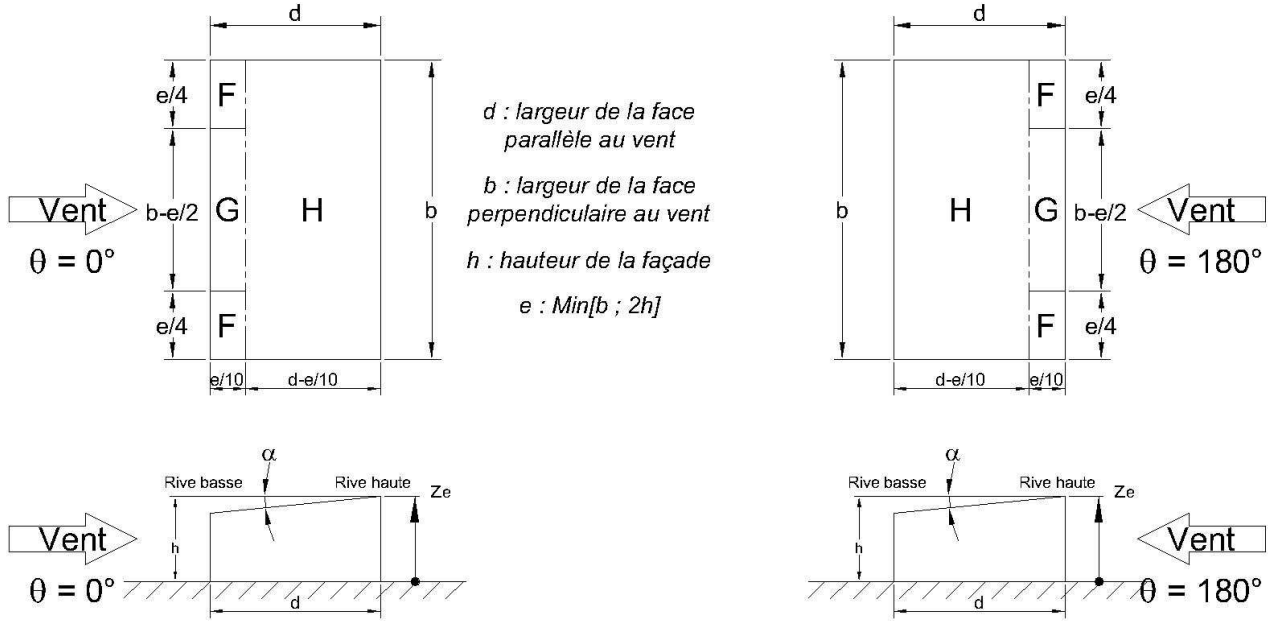
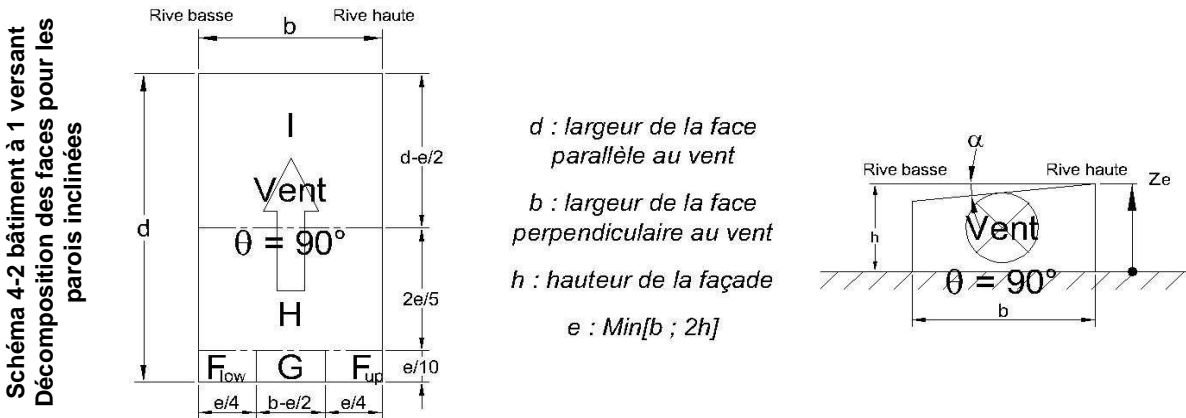


Tableau 9-1  $c_{pe}$  pour les parois inclinées  
des bâtiments à 1 versant

| Zone           | Direction du vent : $\theta = 0^\circ$ |            |             |            |             |            | Direction du vent : $\theta = 180^\circ$ |            |             |            |             |            |
|----------------|--|------------|-------------|------------|-------------|------------|--|------------|-------------|------------|-------------|------------|
|                | F                                      |            | G           |            | H           |            | F  |            | G           |            | H           |            |
| Angle $\alpha$ | $C_{pe,10}$                            | $C_{pe,1}$ | $C_{pe,10}$ | $C_{pe,1}$ | $C_{pe,10}$ | $C_{pe,1}$ | $C_{pe,10}$                              | $C_{pe,1}$ | $C_{pe,10}$ | $C_{pe,1}$ | $C_{pe,10}$ | $C_{pe,1}$ |
| 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        | -0,0       | -0,0        | -0,0       | -2,3                                     | -2,5       | -1,3        | -2,0       | -0,8        | -1,2       |
| 15°            | -0,9                                   | -2,0       | -0,8        | -1,5       | -0,3        | -0,3       | -2,5                                     | -2,8       | -1,3        | -2,0       | -0,9        | -1,2       |
|                | +0,2                                   | +0,2       | +0,2        | +0,2       | +0,2        | +0,2       | -2,5                                     | -2,8       | -1,3        | -2,0       | -0,9        | -1,2       |
| 30°            | -0,5                                   | -1,5       | -0,5        | -1,5       | -0,2        | -0,2       | -1,1                                     | -2,3       | -0,8        | -1,5       | -0,8        | -0,8       |
|                | +0,7                                   | +0,7       | +0,7        | +0,7       | +0,4        | +0,4       | -1,1                                     | -2,3       | -0,8        | -1,5       | -0,8        | -0,8       |
| 45°            | -0,0                                   | -0,0       | -0,0        | -0,0       | -0,0        | -0,0       | -0,6                                     | -1,3       | -0,5        | -0,5       | -0,7        | -0,7       |
|                | +0,7                                   | +0,7       | +0,7        | +0,7       | +0,6        | +0,6       | -0,6                                     | -1,3       | -0,5        | -0,5       | -0,7        | -0,7       |
| 60°            | +0,7                                   | +0,7       | +0,7        | +0,7       | +0,7        | +0,7       | -0,5                                     | -1,0       | -0,5        | -0,5       | -0,5        | -0,5       |
| 75°            | +0,8                                   | +0,8       | +0,8        | +0,8       | +0,8        | +0,8       | -0,5                                     | -1,0       | -0,5        | -0,5       | -0,5        | -0,5       |

Tableau 9-2  $c_{pe}$  pour les parois inclinées  
des bâtiments à 1 versant



| Zone           | Direction du vent : $\theta = 90^\circ$ |            |             |            |             |            |             |            |             |            |
|----------------|---|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|
|                | $F_{up}$                                |            | $F_{low}$   |            | G           |            | H           |            | I           |            |
| Angle $\alpha$ | $C_{pe,10}$                             | $C_{pe,1}$ | $C_{pe,10}$ | $C_{pe,1}$ | $C_{pe,10}$ | $C_{pe,1}$ | $C_{pe,10}$ | $C_{pe,1}$ | $C_{pe,10}$ | $C_{pe,1}$ |
| 5°             | -2,1                                    | -2,6       | -2,1        | -2,4       | -1,8        | -2,0       | -0,6        | -1,2       | -0,5        | -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       | -1,3        | -2,0       | -1,2        | -2,0       | -1,0        | -1,3       | -0,7        | -1,2       |
| 75°            | -1,2                                    | -2,0       | -1,3        | -2,0       | -1,2        | -2,0       | -1,0        | -1,3       | -0,5        | -0,5       |

3.4.5) Parois inclinées à 2 versants (toitures bi-pente)

Schéma 5 bâtiment à 2 versants  
Décomposition des faces pour les parois  
inclinées

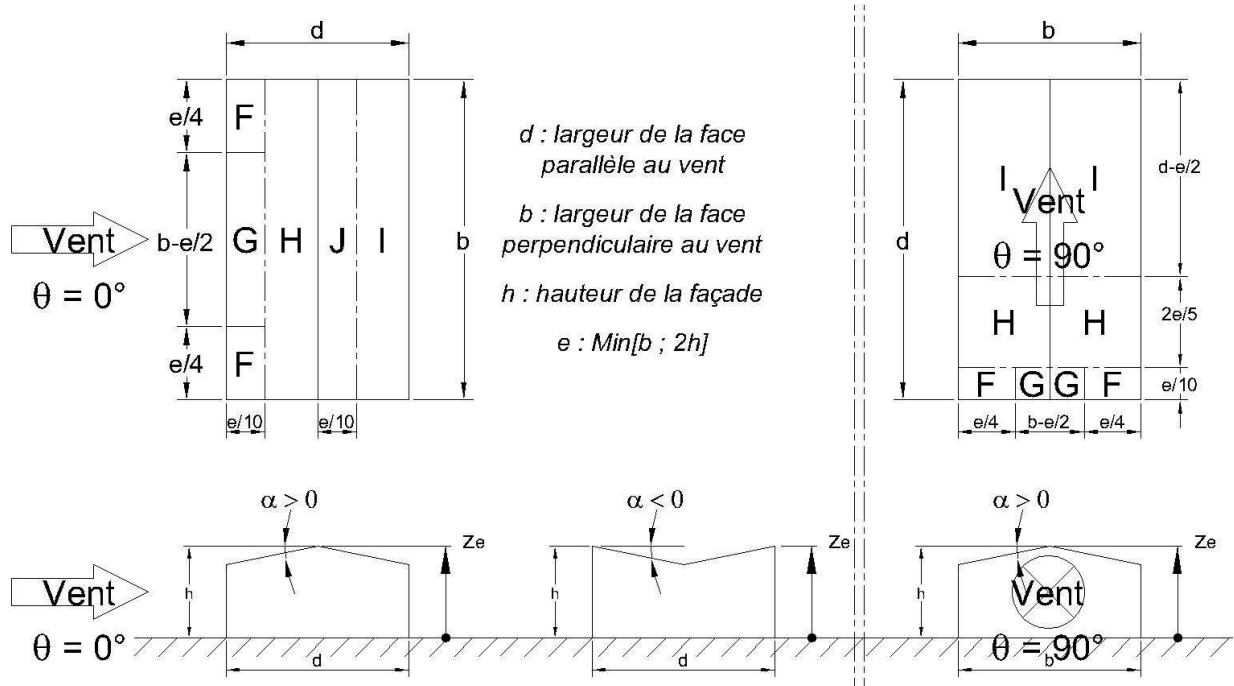


Tableau 10  $c_{pe}$  pour les parois inclinées  
des bâtiments à 2 versants

| Direction du vent : $\theta = 0^\circ$ |             |            |             |            |             |            |             |            |             |            |
|--|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|
| Zone                                   | F           |            | G           |            | H           |            | I           |            | J           |            |
| Pente $\alpha$                         | $c_{pe,10}$ | $c_{pe,1}$ | $c_{pe,10}$ | $c_{pe,1}$ | $c_{pe,10}$ | $c_{pe,1}$ | $c_{pe,10}$ | $c_{pe,1}$ | $c_{pe,10}$ | $c_{pe,1}$ |
| -45°                                   | -0,6        | -0,6       | -0,6        | -0,6       | -0,8        | -0,8       | -0,7        | -0,7       | -1,0        | -1,5       |
| -30°                                   | -1,1        | -2,0       | -0,8        | -1,5       | -0,8        | -0,8       | -0,6        | -0,6       | -0,8        | -1,4       |
| -15°                                   | -2,5        | -2,8       | -1,3        | -2,0       | -0,9        | -1,2       | -0,5        | -0,5       | -0,7        | -1,2       |
| -5°                                    | -2,3        | -2,5       | -1,2        | -2,0       | -0,8        | -1,2       | +0,2        | +0,2       | +0,2        | +0,2       |
| 5°                                     | -2,3        | -2,5       | -1,2        | -2,0       | -0,8        | -1,2       | -0,6        | -0,6       | -0,6        | -0,6       |
| 15°                                    | -1,7        | -2,5       | -1,2        | -2,0       | -0,6        | -1,2       | -0,6        | -0,6       | +0,2        | +0,2       |
| 30°                                    | +0,0        | +0,0       | +0,0        | +0,0       | +0,0        | +0,0       | -0,6        | -0,6       | -0,6        | -0,6       |
| 45°                                    | -0,9        | -2,0       | -0,8        | -1,5       | -0,3        | -0,3       | -0,4        | -0,4       | -1,0        | -1,5       |
| 60°                                    | +0,2        | +0,2       | +0,2        | +0,2       | +0,2        | +0,2       | +0,0        | +0,0       | +0,0        | +0,0       |
| 75°                                    | -0,5        | -1,5       | -0,5        | -1,5       | -0,2        | -0,2       | -0,4        | -0,4       | -0,5        | -0,5       |
|  | +0,7        | +0,7       | +0,7        | +0,7       | +0,4        | +0,4       | -0,0        | +0,0       | -0,0        | -0,0       |
|  | -0,0        | -0,0       | -0,0        | -0,0       | -0,0        | -0,0       | -0,2        | -0,2       | -0,3        | -0,3       |
|  | +0,7        | +0,7       | +0,7        | +0,7       | +0,6        | +0,6       | +0,0        | +0,0       | +0,0        | +0,0       |
|  | +0,7        | +0,7       | +0,7        | +0,7       | +0,7        | +0,7       | -0,2        | -0,2       | -0,3        | -0,3       |
|  | +0,8        | +0,8       | +0,8        | +0,8       | +0,8        | +0,8       | -0,2        | -0,2       | -0,3        | -0,3       |

| Direction du vent : $\theta = 90^\circ$ |             |            |             |            |             |            |             |            |  |
|---|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|--|
| Zone                                    | F           |            | G           |            | H           |            | I           |            |  |
| Pente $\alpha$                          | $c_{pe,10}$ | $c_{pe,1}$ | $c_{pe,10}$ | $c_{pe,1}$ | $c_{pe,10}$ | $c_{pe,1}$ | $c_{pe,10}$ | $c_{pe,1}$ |  |
| -45°                                    | -1,4        | -2,0       | -1,2        | -2,0       | -1,0        | -1,3       | -0,9        | -1,2       |  |
| -30°                                    | -1,5        | -2,1       | -1,2        | -2,0       | -1,0        | -1,3       | -0,9        | -1,2       |  |
| -15°                                    | -1,9        | -2,5       | -1,2        | -2,0       | -0,8        | -1,2       | -0,8        | -1,2       |  |
| -5°                                     | -1,8        | -2,5       | -1,2        | -2,0       | -0,7        | -1,2       | -0,6        | -1,2       |  |
| 5°                                      | -1,6        | -2,2       | -1,3        | -2,0       | -0,7        | -1,2       | -0,6        | -0,6       |  |
| 15°                                     | -1,3        | -2,0       | -1,3        | -2,0       | -0,6        | -1,2       | -0,5        | -0,5       |  |
| 30°                                     | -1,1        | -1,5       | -1,4        | -2,0       | -0,8        | -1,2       | -0,5        | -0,5       |  |
| 45°                                     | -1,1        | -1,5       | -1,4        | -2,0       | -0,9        | -1,2       | -0,5        | -0,5       |  |
| 60°                                     | -1,1        | -1,5       | -1,2        | -2,0       | -0,8        | -1,0       | -0,5        | -0,5       |  |
| 75°                                     | -1,1        | -1,5       | -1,2        | -2,0       | -0,8        | -1,0       | -0,5        | -0,5       |  |

### 3.4.6) Autres cas

Se reporter à l'Eurocode (exemple : toitures à 4 pans, avec sheds, voûtes et dômes, cheminées ...).

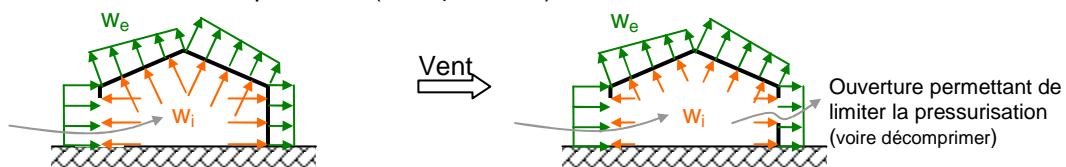
*Exercice 10 : on souhaite étudier un bâtiment de surface au sol  $16 \times 20 \text{ m}^2$  et de hauteur  $18 \text{ m}$ . Ce bâtiment possède une toiture plate.*

Déterminez :

- le nombre de sens de vent à étudier ;
- le nombre de  $q_p(z)$  à déterminer (en combien de tranches faut-il découper verticalement l'ouvrage) ;
- le nombre de coefficients  $c_{pe}$  à extraire des tableaux pour étudier l'ouvrage vis-à-vis du vent sur une surface supérieure à  $10 \text{ m}^2$ .

### 3.5) $c_{pi}$ : coefficient de pression intérieure

Selon la position des ouvertures sur l'ouvrage, le vent peut s'engouffrer plus ou moins à l'intérieur et créer des surpressions intérieures importantes (ou dépressions).



**Ouvertures majoritairement au vent**

**Ouvertures réparties**

On s'attachera ici au cas où la somme des aires des ouvertures sur chacune des faces est inférieure à 30 % de l'aire de la face considérée, et que le bâtiment ne possède pas de face dominante (face où l'air peut s'engouffrer beaucoup plus facilement que sur les autres faces).

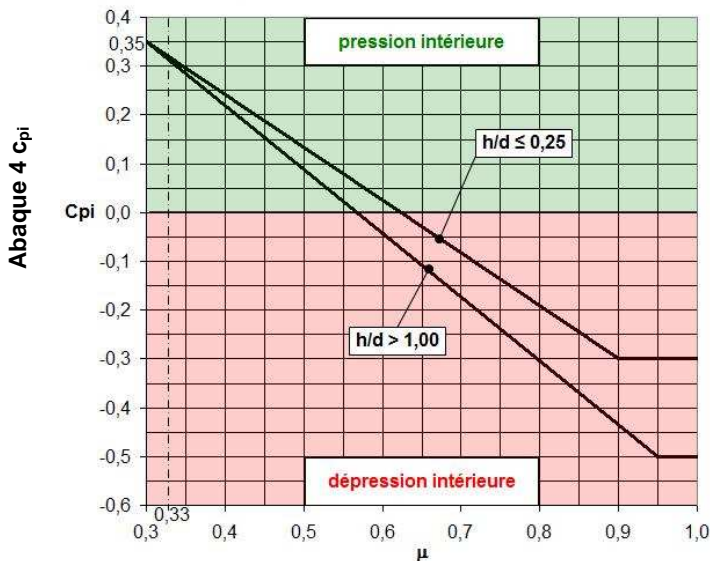
On compte ici comme ouvertures les surfaces susceptibles de rester ouvertes lors de grands vents.

On appelle face dominante, la façade (ou le pignon) de l'ouvrage qui possède une surface d'ouvertures au moins égal au double de la surface des ouvertures des autres faces réunies.

### 3.5.1) Cas où le bâtiment ne possède pas de face dominante

On extrapole la valeur de  $c_{pi}$  à l'aide de l'abaque suivant lorsque les ouvertures sont uniformément réparties :

#### C<sub>pi</sub> pour les bâtiments sans face dominante



Avec :

$$\mu = \frac{\sum \text{aire des ouvertures où } c_{pe} \leq 0}{\sum \text{aire de toutes les ouvertures}}$$

$h$  : hauteur du bâtiment ;

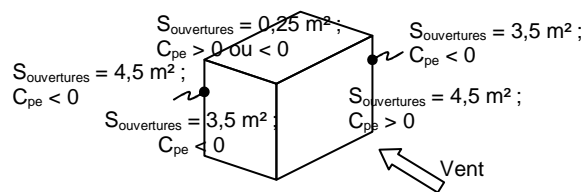
$d$  : profondeur du bâtiment

Remarque : lorsque la perméabilité n'est pas connue, prendre :  
 $c_{pi} = +0,2$  et  $-0,3$

Remarque : pour les bâtiments courants, la perméabilité est généralement comprise entre 0,01 % et 0,1 %.

Exercice 11 : le bâtiment étudié à une surface au sol  $16 \times 20 \text{ m}^2$  (base rectangulaire) et de hauteur 18 m.

Déterminez le coefficient  $c_{pi}$  à prendre en considération.



### 3.5.2) Cas où le bâtiment possède une face dominante

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| Aire des ouvertures de la face dominante > 3 x aire des ouvertures des autres faces | $c_{pi} = 0,90 \times c_{pe}$ |
| Aire des ouvertures de la face dominante = 2 x aire des ouvertures des autres faces | $c_{pi} = 0,75 \times c_{pe}$ |
| Entre les 2 cas précédents : faire une interpolation linéaire                       |                               |

Remarque :  $c_{pe}$  est le coefficient de pression extérieure au droit des ouvertures de la face dominante

### 3.6) $w_i$ , $w_e$ : pressions aérodynamiques sur les bâtiments

#### 3.6.1) $w_e$ : pression aérodynamique agissant sur les surfaces extérieures

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

- $q_p(z_e)$  : pression dynamique de pointe (c.f. 2.4 page 12) ;
- $z_e$  : hauteur de référence extérieure (c.f. schéma 1 page 17) ;
- $c_{pe}$  : coefficient de pression pour les faces extérieures.

#### 3.6.2) $w_i$ : pression aérodynamique agissant sur les surfaces intérieures

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

- $q_p(z_i)$  : pression dynamique de pointe (c.f. 2.4 page 12) ;
- $z_i$  : hauteur de référence intérieure – on prend généralement cette valeur égale à  $z_e$  ;
- $c_{pi}$  : coefficient de pression pour les faces intérieures.

#### 3.6.3) $F_w$ : force normale exercée par le vent sur un élément

$$\vec{F}_w = \vec{F}_{w,e} + \vec{F}_{w,i}$$

Généralement  $F_w = F_{w,e} - F_{w,i}$  (cas d'éléments d'épaisseurs constantes)

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

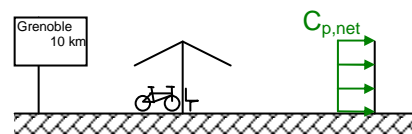
$$F_{w,i} = \sum_{\text{surfaces}} w_i \times A_{\text{ref}}$$

Remarque : pour obtenir la force exercée par le vent sur plusieurs éléments de construction, nous effectuerons une somme vectorielle – en distinguant les faces d'inclinaisons différentes.

## 4) OUVRAGES ISOLES – NOTIONS

### 4.1) Définition

- Ouvrages isolés (sans environnement intérieur) :  $c_{p,net}$  est le coefficient de pression nette permettant de déterminer l'effort du vent sur un ouvrage isolé.



### 4.2) $C_{p,net}$ : coefficient de pression des éléments isolés

On se reportera aux paragraphes :

- 7.3 de l'Eurocode 1 chapitre 4 pour les toitures isolées (c'est-à-dire bâtiments sans mur) ;
- 7.4 de l'Eurocode 1 chapitre 4 pour les murs isolés (c'est-à-dire sans couverture – exemple : acrotères, clôtures, panneaux de signalisation ...).

## 5) FORCES DE FROTTEMENT

L'effet du vent engendre majoritairement des efforts normaux, mais aussi des efforts tangents dits de frottement. Ils peuvent parfois être préjudiciables. Ils sont supposés tels que :

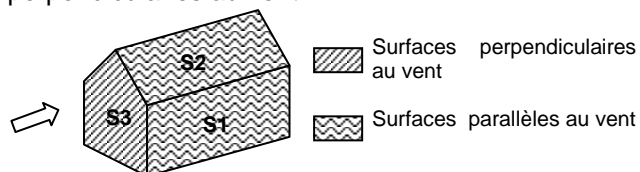
$$F_{fr} = c_{fr} \times q_p(z_e) \times A_{\text{ref}}$$

- $c_{fr}$  : coefficient de frottement :

| Surface  | Coefficient de frottement $c_{fr}$ |
|--|------------------------------------|
| Lisse (à savoir acier, béton lisse)                | 0,01                               |
| Rugueuse (à savoir béton brut, bardeaux bitumés)   | 0,02                               |
| Très rugueuse (à savoir ondulations, nervures ...) | 0,04                               |

- $A_{\text{ref}}$  : aire soumise au vent

La norme indique que ces frottements peuvent être négligés dans le cas où l'aire totale de toutes les surfaces parallèles au vent est inférieure ou égale à 4 fois l'aire totale de toutes les surfaces extérieures perpendiculaires au vent :



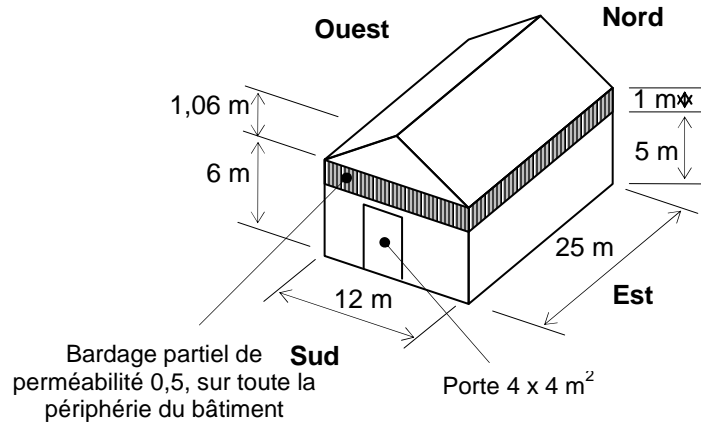
Frottements négligeables si :

$$S_2 + S_1 \leq 4 \times S_3$$

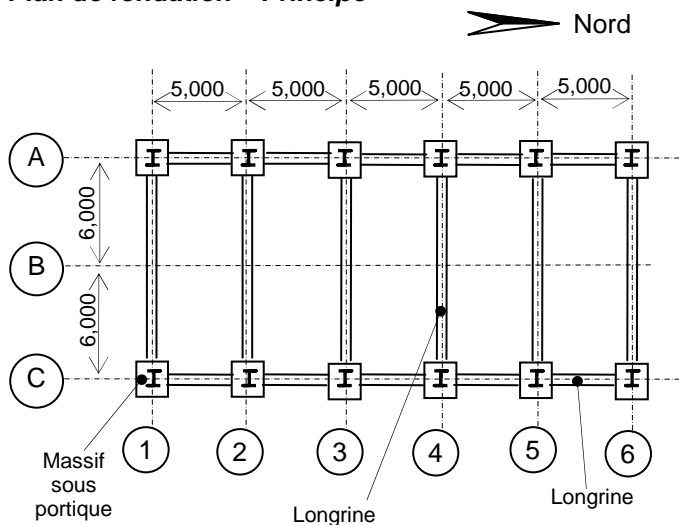
Dans le cas contraire, se reporter aux paragraphes 5.3 et 7.5 de l'EN 1991 1-4

## 6) EXERCICE

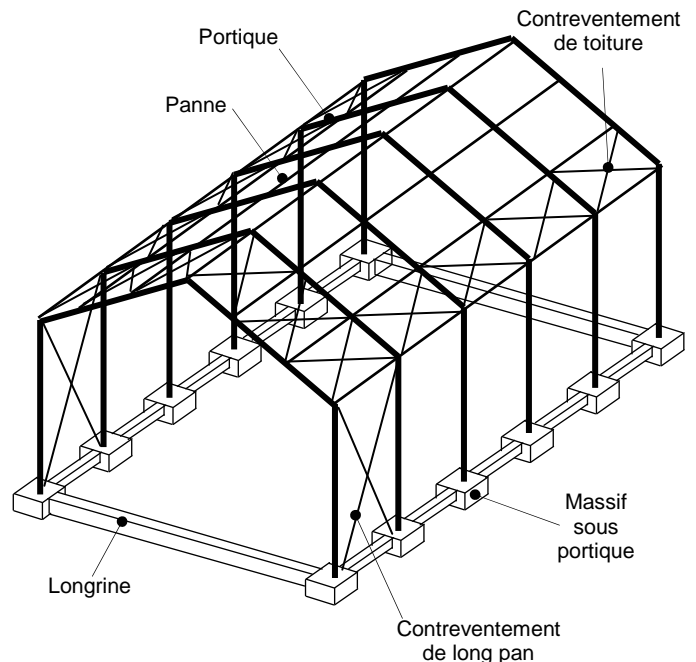
- On souhaite déterminer les actions exercées par le vent sur le bâtiment agricole représenté sur le schéma ci-contre
- Il est composé de six portiques en charpente métallique espacés de 5 mètres entre axes, supportant une couverture et un bardage en bacs acier.
- Il se situe dans la campagne à proximité de Lyon (69 - Rhône), à une altitude de 352 mètres et la végétation est basse.
- Sa géométrie est schématisée sur la figure ci-contre et le plan de fondations donné ci-dessous.
- La durée d'utilisation de l'ouvrage est de 50 ans.



### Plan de fondation – Principe



### Structure métallique porteuse



#### **Question 1 :** Etude du vent 1 – VENT SUD

1.1 Déterminez les efforts exercés par le vent (pression aérodynamique) sur les parois verticales et la toiture du bâtiment, lorsque le vent souffle depuis le SUD et lorsqu'on étudie un élément de surface d'influence, vis-à-vis du vent, supérieur à 10 m<sup>2</sup>.

1.2 En déduire la modélisation de l'action mécanique exercée par le vent sur le portique file 2.

**Question 2 :** Reprendre les questions 1.1 et 1.2 pour le vent EST (vent soufflant depuis l'EST).

#### **Question 3 :**

Déterminez les efforts exercés par le vent (pression aérodynamique) sur les parois verticales et la toiture du bâtiment, lorsque le vent souffle depuis les autres points cardinaux, soit :

- étude du vent 3 : Vent NORD ;
- étude du vent 4 : Vent OUEST.



## 7) METHODOLOGIE D'ETUDE DU VENT SUR UN BATIMENT A BASE RECTANGULAIRE

1) Détermination des sens du vent à étudier (nous nous contenterons du vent selon les 4 faces de l'ouvrage) et faire des croquis ;

2) Recherche des altitudes «  $z_e$  » à considérer dans l'étude (c.f. schéma 1 page 17) ;

3) Détermination des pressions dynamiques de pointes à considérer ( $q_p(z_e)$ ) :

- lire la valeur de la vitesse de base  $v_{b,0}$  sur la carte 1 page 6 ;

-  $v_b = v_{b,0} \times c_{dir} \times c_{season}$  (cas général, le coefficient de saison  $c_{season}$  sera pris égal à 1 – pour les constructions permanentes –  $c_{dir}$  c.f. page 7) ;

- déterminer la catégorie de rugosité du terrain (tableau 4 page 9), et extraire les altitudes  $z_{0,II}$ ,  $z_0$  et  $z_{min}$ .

-  $k_r = 0,19 \times \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} = 0,19 \times \left(\frac{z_0}{0,05}\right)^{0,07}$  ;

- calculer le coefficient de rugosité  $c_r(z)$  :

$$c_r(z) = k_r \times \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \text{ pour } z_{min} \leq z \leq z_{max} = 200 \text{ m}$$

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

-  $v_m(z) = v_b \times c_r(z) \times c_0(z)$  (dans les cas généraux, nous prendrons le coefficient orographique  $c_0 = 1$ ) ;

4) Pression dynamique de base

- Intensité de la turbulence de la vitesse du vent :  $I_v(z) = \frac{k_t}{c_0(z) \times \ln(z/z_0)}$  (dans les cas généraux, nous

prendrons le coefficient de turbulence  $k_t = 1$ ) ;

- pression dynamique de pointe  $q_p(z) = [1 + 7 \times I_v(z)] \times \frac{1}{2} \times \rho \times v_m^2(z)$  (avec la masse volumique de l'air  $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ ) ;

5) Extraction des coefficients de pression extérieure :  $c_{pe}$  pour les différents sens du vent :

- des faces verticales ( $c_{pe,1}$  si l'objet étudié à une aire inférieure à  $1 \text{ m}^2$  ;  $c_{pe,10}$  si l'objet étudié à une aire supérieure à  $10 \text{ m}^2$  ;  $C_{pe} = C_{pe,1} - (C_{pe,1} - C_{pe,10}) \times \log_{10}(A)$  sinon) – c.f. schéma 1 ;

- des faces inclinées (toitures) – c.f. schémas 2, 3, 4 ou 5 selon le cas ;

6) Extraction des coefficients de pression intérieure :  $c_{pi}$  pour les différents sens du vent (si perméabilité inférieure à 30% et s'il n'y a pas de face dominante, c'est-à-dire avec une surface d'ouvertures beaucoup plus importante que sur les autres faces) :

- calculer  $\mu$ , le rapport entre les aires des ouvertures ou  $c_{pe} \leq 0$  et l'aire totale de toutes les ouvertures (restantes ouvertes en cas de grand vent). Pour un bâtiment peu perméable prendre  $c_{pi} = + 0,2$  et  $- 0,3$  ;

7) En déduire la pression aérodynamique totale sur chaque face (attention à la décomposition verticale des murs) :

$$w = q_p(z_i) \times (c_{pe} - c_{pi})$$

force dans le sens de la pression extérieure

8)  $F_w$  : force normale exercée par le vent sur un élément

$$F_w = F_{w,e} - F_{w,i}$$

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

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

## Feuille réponse

**1) Sens du vent étudié :** vent \_

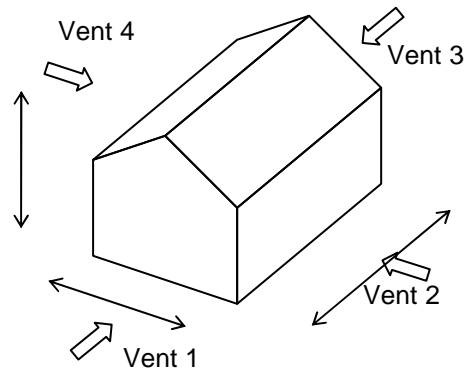
h (hauteur du pignon) = \_\_\_\_\_ [m]

b (largeur de la face recevant le vent) = \_\_\_\_\_ [m]

d (dimension du côté // au vent) = \_\_\_\_\_ [m]

cas :  $h \leq b$  ;  $b < h \leq 2b$  ;  $h > 2b$   
(entourer la solution qui convient)

(noircir la flèche sur le schéma ci-dessus et compléter les distances)



**2) Altitudes  $z_e$**  (c.f. schéma 1 page 17)

Nombre d'altitudes  $z_e$  à considérer : \_\_\_\_

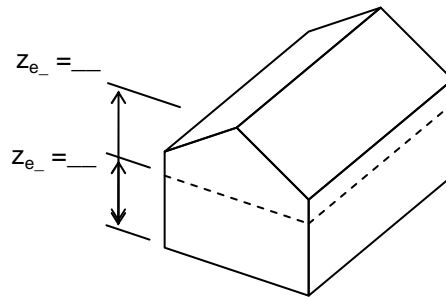
$z_{e1}$  = \_\_\_\_\_ [m]

$z_{e2}$  = \_\_\_\_\_ [m]

$z_{e3}$  = \_\_\_\_\_ [m]

$z_{e...}$  = \_\_\_\_\_ [m]

Remarque : la différence d'altitude de 2  $z_e$  successifs :  $z_{ei} - z_{ei-1}$  doit rester inférieure à b



(compléter les altitudes  $z_e$  en fonction du cas)

**3) Pressions dynamiques de pointes**

⇒ Département Français : \_\_\_\_\_ ;

⇒ Région R \_\_\_\_\_ →  $v_{b,0}$  = \_\_\_\_\_ [m/s] (c.f. carte 1 page 6) ;

⇒  $C_{dir}$  = \_\_\_\_\_ (c.f. carte 2 page 7) ;

⇒  $C_{season}$  = \_\_\_\_\_ (c.f. carte 3 page 7 – pour les ouvrages de durée de vie > 1 an, prendre 1) ;

⇒  $v_b = v_{b,0} \times C_{dir} \times C_{season}$  = \_\_\_\_\_ [m/s]

⇒ Catégorie de rugosité du site : \_\_\_\_\_ (c.f. tableau 4 page 9) ;

⇒ Altitudes :  $z_{0,ll} = 0,05$  [m]

$z_0$  = \_\_\_\_\_ [m] (pour la catégorie de rugosité du site) (c.f. tableau 4 page 9) ;

$z_{min}$  = \_\_\_\_\_ [m] (pour la catégorie de rugosité du site)

⇒  $k_1$  = \_\_\_\_\_ (dans les cas de sites sans obstacle,  $k_1 = 1$ )

⇒  $k_r = 0,19 \times \left( \frac{z_0}{0,05} \right)^{0,07}$  = \_\_\_\_\_

⇒  $C_r(z_{e1})$  = \_\_\_\_\_

$C_r(z_{e2})$  = \_\_\_\_\_

$C_r(z_{e...})$  = \_\_\_\_\_

$$C_r(z_e) = k_r \times \ln \left( \frac{\text{Max}[z_e; z_{min}]}{z_0} \right)$$

⇒  $C_0(z_{e1})$  = \_\_\_\_\_

$C_0(z_{e2})$  = \_\_\_\_\_

$C_0(z_{e...})$  = \_\_\_\_\_

(dans les cas de sites plats,  $C_0(z_e) = 1$ )

⇒  $v_m(z_{e1})$  = \_\_\_\_\_ [m/s]

$v_m(z_{e2})$  = \_\_\_\_\_ [m/s]

$v_m(z_{e...})$  = \_\_\_\_\_ [m/s]

$$v_m(z_e) = v_b \times C_r(z_e) \times C_0(z_e)$$

**4) Pression dynamique de base**

$\Rightarrow I_v(z_{e1}) = \underline{\hspace{2cm}}$

$I_v(z_{e2}) = \underline{\hspace{2cm}}$

$I_v(z_{e\dots}) = \underline{\hspace{2cm}}$

$\Rightarrow q_p(z_{e1}) = \underline{\hspace{2cm}}$  [Pa]

$q_p(z_{e2}) = \underline{\hspace{2cm}}$  [Pa]

$q_p(z_{e\dots}) = \underline{\hspace{2cm}}$  [Pa]

$$I_v(z_e) = \frac{k_t}{c_o(z_e) \times \ln(z_e/z_0)}$$

$$q_p(z_e) = [1 + 7 \times I_v(z_e)] \times 0,6125 \times v_m^2(z_e)$$

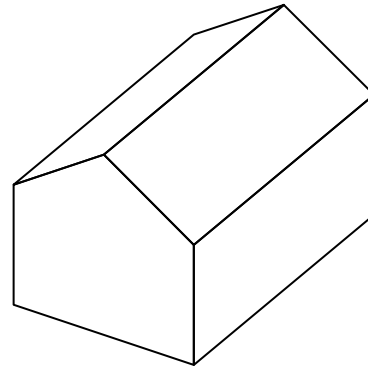
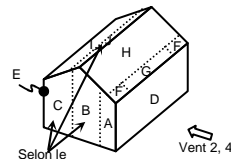
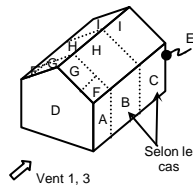
**5) Coefficients de pression extérieure au vent  $c_{pe}$**   
(c.f. schéma 2 page 17 pour les faces verticales, 3, 4, 5)

$\Rightarrow$  Faces :

$e = \text{Min}[b ; 2h] = \underline{\hspace{2cm}}$  [m]

cas :  $d > e ; 5d > e \geq d ; e > 5d$

(entourer la solution qui convient)



(compléter les faces à considérer, les nommer et les coter)

$\Rightarrow c_{pe}$  :

(c.f. schéma 3 page 18, schéma 4 page 19, schéma 5 page 20 selon le cas)

Surface de l'objet étudié :  $\underline{\hspace{2cm}}$  [m<sup>2</sup>] ; pente de toiture :  $\underline{\hspace{2cm}}$  [°]

$\Rightarrow \frac{h}{d} = \underline{\hspace{2cm}}$

Retenir la valeur :

$$C_{pe} = C_{pe,1} \quad \text{si } A < 1 \text{ m}^2$$

$$C_{pe} = C_{pe,1} - (C_{pe,1} - C_{pe,10}) \times \log_{10}(A) \quad \text{si } 1 \text{ m}^2 < A < 10 \text{ m}^2$$

$$C_{pe} = C_{pe,10} \quad \text{si } A > 10 \text{ m}^2$$

| Cas 1                                  | Cas 2 éventuel                         |
|--|--|
| $c_{pe}(A) = \underline{\hspace{2cm}}$ | $c_{pe}(A) = \underline{\hspace{2cm}}$ |
| $c_{pe}(B) = \underline{\hspace{2cm}}$ | $c_{pe}(B) = \underline{\hspace{2cm}}$ |
| $c_{pe}(C) = \underline{\hspace{2cm}}$ | $c_{pe}(C) = \underline{\hspace{2cm}}$ |
| $c_{pe}(D) = \underline{\hspace{2cm}}$ | $c_{pe}(D) = \underline{\hspace{2cm}}$ |
| $c_{pe}(E) = \underline{\hspace{2cm}}$ | $c_{pe}(E) = \underline{\hspace{2cm}}$ |
| $c_{pe}(F) = \underline{\hspace{2cm}}$ | $c_{pe}(F) = \underline{\hspace{2cm}}$ |
| $c_{pe}(G) = \underline{\hspace{2cm}}$ | $c_{pe}(G) = \underline{\hspace{2cm}}$ |
| $c_{pe}(H) = \underline{\hspace{2cm}}$ | $c_{pe}(H) = \underline{\hspace{2cm}}$ |
| $c_{pe}(I) = \underline{\hspace{2cm}}$ | $c_{pe}(I) = \underline{\hspace{2cm}}$ |
| $c_{pe}(J) = \underline{\hspace{2cm}}$ | $c_{pe}(J) = \underline{\hspace{2cm}}$ |

(pour la face la plus perméable)

**6) Coefficients de pression intérieure au vent  $c_{pi}$**

$\Rightarrow$  Perméabilité maxi =  $\frac{\text{surfaces ouvertes}}{\text{surface totale des parois}} = \underline{\hspace{2cm}}$

Vérifier que la perméabilité est inférieure à 0,3 et qu'il ne possède pas de face dominante

$\Rightarrow \mu = \frac{\sum \text{aire des ouvertures où } c_{pe} \leq 0}{\sum \text{aire de toutes les ouvertures}} = \underline{\hspace{2cm}}$

(si les surfaces ne sont pas connues, prendre  $c_{pi} = + 0,2$  et  $- 0,3$ )

$\Rightarrow c_{pi} = \underline{\hspace{2cm}}$  (c.f. abaque 4 page 22)

**7) Pression aérodynamique totale  $w$**

$w = q_p(z_i) \times (c_{pe} - c_{pi})$

(attention, il peut y avoir plusieurs cas à traiter)

| Cas 1                                  | Cas 2 éventuel                         |
|--|--|
| $w(A) = \underline{\hspace{2cm}}$ [Pa] | $w(A) = \underline{\hspace{2cm}}$ [Pa] |
| $w(B) = \underline{\hspace{2cm}}$ [Pa] | $w(B) = \underline{\hspace{2cm}}$ [Pa] |
| $w(C) = \underline{\hspace{2cm}}$ [Pa] | $w(C) = \underline{\hspace{2cm}}$ [Pa] |
| $w(D) = \underline{\hspace{2cm}}$ [Pa] | $w(D) = \underline{\hspace{2cm}}$ [Pa] |
| $w(E) = \underline{\hspace{2cm}}$ [Pa] | $w(E) = \underline{\hspace{2cm}}$ [Pa] |
| $w(F) = \underline{\hspace{2cm}}$ [Pa] | $w(F) = \underline{\hspace{2cm}}$ [Pa] |
| $w(G) = \underline{\hspace{2cm}}$ [Pa] | $w(G) = \underline{\hspace{2cm}}$ [Pa] |
| $w(H) = \underline{\hspace{2cm}}$ [Pa] | $w(H) = \underline{\hspace{2cm}}$ [Pa] |
| $w(I) = \underline{\hspace{2cm}}$ [Pa] | $w(I) = \underline{\hspace{2cm}}$ [Pa] |
| $w(J) = \underline{\hspace{2cm}}$ [Pa] | $w(J) = \underline{\hspace{2cm}}$ [Pa] |

**8) ZONES DE VENT**

| Département                  | Région | Détail   |
|------------------------------|--------|--|
| 01 - Ain                     | 2      | Bagé le Chatel, Chalamont, Châtillon-sur-Chalaronne, Coligny, Meximieux, Miribel, Montluel, Montrevel-en-Bresse, Pont-de-Vaux, Pont-de-Veyle, Reyrieux, Saint-Triviers-de-Courtes, Saint-Triviers-sur-Moignans, Trévoux, Villars-les-Dombes  |
|                              | 1      | Tous les autres cantons  |
| 04 - Alpes-de-Haute-Provence | 1      | Annot, Barcelonnette, Colmars, Entrevaux, Javie (la), Lauzet-Ubaye (le), Saint-André-les-Alpes, Seyne  |
|                              | 2      | Tous les autres cantons  |
| 05 - Hautes-Alpes            | 2      | Aspres-sur-Buëch, Barcelonnette, Laragne-Montéglin, Orpierre, Ribiers, Rosans, Serres, Tallard, Veynes   |
|                              | 1      | Tous les autres cantons  |
| 06 - Alpes-Maritimes         | 1      | Guillaumes, Puget-Théniers, Saint-Etienne-de-Tinée, Saint-Martin-Vésubie, Saint-Sauveur-sur-Tinée, Villars-sur-Var   |
|                              | 2      | Tous les autres cantons  |
| 11 - Aude                    | 2      | Alaigne, Alzonne, Belpech, Carcassonne (tous cantons), Castelnaudary (tous cantons), Chalabre, Conques-sur-Orbiel, Fanjeaux, Limoux, Mas-Cabardès, Montréal, Saissac, Salles-sur-l'Hers  |
|                              | 3      | Tous les autres cantons  |
| 15 - Cantal                  | 2      | Allanche, Chaudes-Aigues, Condat, Massiac, Murat, Pierrefort, Ruynes-en-Margeride, Saint-Flour (tous cantons)  |
|                              | 1      | Tous les autres cantons  |
| 17 - Charente-Maritime       | 1      | Montendre, Montguyon, Montlieu-la-Garde  |
|                              | 2      | Archiac, Aulnay, Burie, Cozes, Gémozac, Jonzac, Loulay, Mirambeau, Pons, Saintes (tous cantons), Saint-Genis-de-Saintonge, Saint-Hilaire-de-Villefranche, Saint-Jean-d'Angély, Saint-Porchaire, Saint-Savinien, Saujon, Tonnay-Boutonne  |
|                              | 3      | Tous les autres cantons  |
|                              | 4      | Bonifacio, Figari, Levie, Porto-Vecchio, Sierra-di-Scopamène   |
| 2A - Corse-du-Sud            | 3      | Tous les autres cantons  |
|                              | 3      | Belgodère, Calenzana, Calvi, Ile-Rousse  |
| 2B - Haute-Corse             | 4      | Tous les autres cantons  |
|                              | 1      | Auxonne, Chenôve, Dijon (tous cantons), Fontaine-Française, Fontaine-les-Dijon, Genlis, Grancey-le-Château-Neuville, Is-sur-Tille, Mirebeau-sur-Bèze, Pontailler-sur-Saône, Saint-Jean-de-Losne, Saint-Seine-l'Abbaye, Selongey  |
| 21 - Côte-d'Or               | 2      | Tous les autres cantons  |
|                              | 2      | Audincourt, Clerval, Etupes, Hérimoncourt, Isle-sur-le-Doubs (l'), Maiche, Montbéliard (tous cantons), Pont-de-Roide, Saint-Hippolyte, Sochaux, Valentigney  |
| 25 - Doubs                   | 1      | Tous les autres cantons  |
|                              | 3      | Aigues-Mortes, Aimargues, Aramon, Beaucaire, Bouillargues, Saint-Gilles, Marguerites, Nîmes (tous cantons), Quissac, Saint-Mamert-du-Gard, Sommières, Vauvert  |
| 30 - Gard                    | 2      | Tous les autres cantons  |
|                              | 2      | Auterive, Caraman, Cintegabelle, Lanta, Montgiscard, Nailloux, Revel, Villefranche-de-Lauragais  |
| 31 - Haute-Garonne           | 1      | Tous les autres cantons  |
|                              | 2      | Casteinau-de-M2doc, Lesparre-Médoc, Pauillac, Saint-Laurent-Médoc, Saint-Vivien-de-Médoc   |
| 33 - Gironde                 | 1      | Tous les autres cantons  |
|                              | 2      | Beaurepaire, Héyrieux, Saint-Jean-de-Boumay  |
| 38 - Isère                   | 1      | Tous les autres cantons  |
|                              | 2      | Amou, Castets, Dax (tous cantons), Montfort-en-Chalosse, Mugron, Peyrehorade, Pouillon, Saint-Martin-de-Seignanx, Saint-Vincent-de-Tyrosse, Soustons, Tartas (tous cantons)  |
| 40 - Landes                  | 1      | Tous les autres cantons  |
|                              | 2      | Ancenis, Blain, Châteaubriant, Derval, Guémené-Penfao, Ligné, Moisdon-la-Rivière, Nort-sur-Erdre, Nozay, Riaillé, Rougé, Saint-Julien-de-Vouvantes, Saint-Marc-la-Jaille, Saint-Nicolas-de-Redon, Vardes   |
| 44 - Loire Atlantique        | 3      | Tous les autres cantons  |
|                              | 2      | Arleux, Anzin, Avesnes-sur-Helpe (tous cantons), Bavay, Berlaimont, Bouchain, Cambrai (tous cantons), Carnières, Cateau-Cambrésis (le), Clary, Condé-sur-l'Escaut, Denain, Douai (tous cantons), Hautmont, Landrecies, Marchiennes, Marcoing, Maubeuge (tous cantons), Solesmes, Trélon, Valenciennes (tous cantons) |
| 59 - Nord                    | 3      | Tous les autres cantons  |
|                              | 2      | Bapaume, Bertincourt, Croisilles, Marquion, Vitry-en-Artois  |
| 62 - Pas-de-Calais           | 3      | Tous les autres cantons  |
|                              | 1      | Autrey-les-Gray, Champlitte, Dampierre-sur-Salon, Fresne-Saint-Mamès, Gray, Gy, Marnay, Montbozon, Pesmes, Tioz, Scey-sur-Saône-et-Saint-Albin   |
| 70 - Haute-Saône             | 2      | Tous les autres cantons  |
|                              | 3      | Bacqueville-en-Caux, Blangy-sur-Bresle, Cany-Barville, Eu, Dieppe (tous cantons), Envermeu, Fontaine-le-Dun, Offranville, Saint-Valery-en-Caux   |
| 76 - Seine-Maritime          | 2      | Tous les autres cantons  |
|                              | 2      | Ailly-sur-Noye, Albert, Bray-sur-Somme, Chaulnes, Combles, Ham, Montdidier, Moreil, Nesle, Péronne, Roisel, Rosières-en-Santerre, Roy  |
| 80 - Somme                   | 3      | Tous les autres cantons  |
|                              | 1      | Cadalen, Castelnau-de-Montmiral, Cordes-sur-Ciel, Gaillac, Graulhet, Lavaur, Lisle-sur-Tarn, Rabastens, Saint-Paul-Cap-de-Joux, Salvagnac, Vaour   |
| 81 - Tarn                    | 2      | Tous les autres cantons  |