



Calcul des différences de pression d'air sur les bâtiments appliqué aux domaines de la ventilation et de l'infiltration d'air

Christophe Delmotte

Division Climat, Equipements et Performance Energétique
Centre scientifique et technique de la construction

9 juillet 2015

Table des matières

1	INTRODUCTION	2
2	DIFFERENCES DE PRESSION D'AIR DUES A L'ACTION DU VENT	2
2.1	Formule générale	2
2.2	Vitesse du vent	3
2.2.1	Variation de la vitesse du vent	3
2.2.2	Vitesses du vent mesurées	4
2.2.3	Echelle anémométrique Beaufort	5
2.3	Le coefficient de pression	5
2.4	Différence de pression d'air sur une façade	7
2.5	Exemple de calcul	7
3	DIFFERENCE DE PRESSION HYDROSTATIQUE	9
3.1	Formule générale	9
3.2	Répartition des pressions	10
3.3	Exemple de calcul	11
3.4	Développement des formules	12
3.4.1	Local étanche à l'air avec une ouverture	12
3.4.2	Local étanche à l'air avec une ouverture dans le bas et une ouverture dans le haut	13
4	COMBINAISON DES DIFFERENCES DE PRESSION D'AIR	15
4.1	Formule générale	15
4.2	Exemple de calcul	16
5	REFERENCES	17

1 Introduction

Le présent document traite du calcul des différences de pression que subissent les bâtiments par l'action du vent, par les différences de température entre l'ambiance extérieure et l'ambiance intérieure et par la combinaison de ces deux effets. Il est principalement destiné aux professionnels qui s'intéressent à la ventilation et à la mesure de l'étanchéité à l'air des bâtiments.

Les charges à prendre en considération lors du calcul d'une structure sous l'effet du vent ne sont pas abordées dans le présent document.

Les notions de surpression et de dépression sont relatives et dépendent du point de vue de l'observateur. Par convention, on considère ici que l'on observe le bâtiment de l'extérieur. Sauf mention contraire, il faut alors comprendre par « surpression » que la pression à l'extérieur du bâtiment est plus élevée qu'à l'intérieur. De même il faut comprendre par « dépression » que la pression à l'extérieur du bâtiment est plus faible qu'à l'intérieur.

2 Différences de pression d'air dues à l'action du vent

2.1 Formule générale

La pression exercée par le vent en un point de l'enveloppe d'un bâtiment est exprimée par la relation suivante:

$$p_w = c_p \frac{\rho v^2}{2} \quad [Pa] \quad (1)$$

avec

- p_w , la pression exercée par le vent [Pa]
- c_p , le coefficient de pression [-]
- ρ , la masse volumique de l'air [kg/m^3]
- v , la vitesse du vent à hauteur du point considéré [m/s]

Tableau 1 - Masse volumique de l'air sous la pression atmosphérique normale de 101325 Pa [2]

Température [°C]	Masse volumique [kg/m ³]		
	Air sec (humidité relative 0 %)	Air humide (humidité relative 50 %)	Air saturé (humidité relative 100 %)
-20	1.396	1.395	1.395
-15	1.368	1.368	1.367
-10	1.342	1.342	1.341
-5	1.317	1.316	1.315
0	1.293	1.291	1.290
5	1.270	1.268	1.266
10	1.247	1.244	1.241
15	1.225	1.222	1.218
20	1.204	1.199	1.194
25	1.184	1.177	1.170
30	1.165	1.155	1.146
35	1.146	1.134	1.022
40	1.127	1.112	1.096
45	1.110	1.090	1.070
50	1.092	1.067	1.042

2.2 Vitesse du vent

2.2.1 Variation de la vitesse du vent

Le vent est essentiellement un phénomène très variable, tant en ce qui concerne sa direction que sa vitesse.

Dans des conditions atmosphériques données, la vitesse du vent croît à mesure que la hauteur au sol augmente. Plus la rugosité de la surface du sol est grande (constructions, boisement, etc.), plus le mouvement de l'air est freiné. La vitesse moyenne du vent décroît donc à mesure que la rugosité du sol augmente.

Selon la rugosité de la surface du sol, on distingue par ordre croissant, cinq catégories de terrain (Tableau 2). En météorologie, la vitesse du vent est mesurée à 10 m au-dessus d'un terrain de catégorie II.

On peut estimer la vitesse du vent à une hauteur z quelconque à l'aide de la formule simplifiée suivante¹ (NBN EN 1991-1-4 [5]):

Pour $z_{\min} \leq z \leq 200$ m

$$v_m(z) = v_b k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad [m/s] \quad (2)$$

Pour $z \leq z_{\min}$

$$v_m(z) = v_m(z_{\min}) \quad [m/s] \quad (3)$$

avec

- z_{\min} , la hauteur minimale définie dans le Tableau 2[m]
- v_b , la vitesse de référence du vent mesurée à une hauteur de 10 m au-dessus d'un sol relevant de la catégorie de terrain II [m/s]
- z , la hauteur au-dessus sol [m]
- k_r , le facteur de terrain (Tableau) [-]
- z_0 , la longueur de rugosité (Tableau) [m]

Tableau 2 - Catégories et paramètres de terrain (NBN EN 1991-1-4 [5])

Catégories de terrain		z_0 [m]	z_{\min} [m]	k_r [-]
0	Mer ou zone côtière exposée au vent	0.003	1	0.1560
I	Lacs ou zone plate et horizontale à végétation négligeable et libre de tous obstacles	0.01	1	0.1698
II	Zone à végétation basse telle que de l'herbe, avec ou non quelques obstacles isolés (arbres, bâtiments) séparés les uns des autres d'au moins 20 fois leur hauteur	0.05	2	0.1900
III	Zone avec une couverture végétale régulière ou des bâtiments, ou avec des obstacles isolés séparés d'au plus 20 fois leur hauteur (par exemple des villages, des zones suburbaines, des forêts permanentes)	0.3	5	0.2154
IV	Zone dont au moins 15% de la surface sont recouverts de bâtiments dont la hauteur moyenne est supérieure à 15 m	1.0	10	0.2343

Exemple

La vitesse du vent à une hauteur de 8 m au-dessus d'un terrain de catégorie III dans une région où la vitesse de référence est de 6 m/s est égale à :

$$v_m(8) = v_b k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 6 \cdot 0.2154 \ln\left(\frac{8}{0.3}\right) = 4.2 \quad [m/s]$$

NOTE : Etant donné la simplicité de la formule, il convient de considérer les résultats avec circonspection.

NOTE : Cette formule ne s'applique pas aux villes présentant des bâtiments élevés et des rues étroites. Dans ce cas, il faut tenir compte de l'effet de canyon qui peut fortement réduire la vitesse du vent [9].

¹ Différents autres modèles sont disponibles dans la littérature.

2.2.2 Vitesses du vent mesurées

En Belgique, les vents dominants viennent du Sud-Ouest. La vitesse moyenne du vent de 6 à 7 m/s au littoral se réduit à 2 à 4 m/s dans les vallées de haute Belgique et en Gaume. Tous les deux ans en moyenne, la pointe maximale de vent atteint ou dépasse 35 m/s au littoral et 23 à 30 m/s à l'intérieur du pays. [IRM – www.meteo.be – 04/06/2013]

Alors que les vitesses de pointe sont importantes pour l'étude de l'action du vent sur les structures, les vitesses moyennes sont plus appropriées pour les problèmes de ventilation et d'infiltration d'air.

Le Tableau 3 donne, à titre d'exemple, les vitesses moyennes mensuelles du vent pour différentes localités de Belgique. Ces vitesses ont été relevées en 2011 à 10 m au-dessus du sol en terrain dégagé (champs d'aviation) (IRM - Bulletins mensuels 2011 [7]).

La Figure 2 présente quant à elle la répartition de la vitesse moyenne journalière du vent pour quatre de ces stations. On peut y observer que cette vitesse dépasse rarement les 10 m/s.

Tableau 3 - Vitesses moyennes mensuelles du vent (m/s) enregistrées en 2011 (IRM - Bulletins mensuels 2011 [7])

Localité	Mois											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. Koksijde	5.1	5.3	4.4	4.2	4.9	4.7	4.0	3.9	4.4	5.0	3.9	7.0
2. Middelkerke	5.2	5.2	4.5	4.3	5.2	4.8	4.5	4.3	4.7	5.2	4.0	7.5
3. Deurne	3.8	4.3	3.3	3.1	3.9	3.6	3.5	3.4	3.4	3.5	3.0	5.2
4. Kleine Brogel	3.2	3.6	2.9	2.5	3.2	3.2	2.7	2.8	2.9	3.0	2.1	4.9
5. Zaventem	4.1	4.3	3.4	2.8	3.7	3.5	3.2	3.4	3.4	3.8	3.0	5.9
6. Beauvechain	4.4	4.5	3.7	2.9	3.5	3.7	3.1	3.5	3.9	3.9	3.1	6.1
7. Chièvres	4.6	4.5	3.8	3.1	3.9	3.9	3.4	3.2	3.4	3.8	2.8	5.5
8. Gosselies	4.7	4.4	4.2	3.3	3.9	4.2	3.3	3.6	4.0	4.0	3.4	5.7
9. Florennes	4.4	4.0	3.7	2.9	3.5	3.7	3.1	3.3	3.5	3.9	3.2	6.0
10. Bierset	4.6	4.6	3.9	3.4	3.9	4.2	3.6	4.0	4.4	4.4	3.8	6.5
11. Elsenborn	3.7	3.3	3.3	2.9	2.9	3.0	2.8	2.8	2.9	3.1	2.5	5.0
12. Saint-Hubert	3.7	3.2	3.7	3.2	3.2	3.2	3.0	2.8	2.9	3.6	3.3	4.1



Figure 1 - Emplacement des différentes localités présentées au Tableau 3

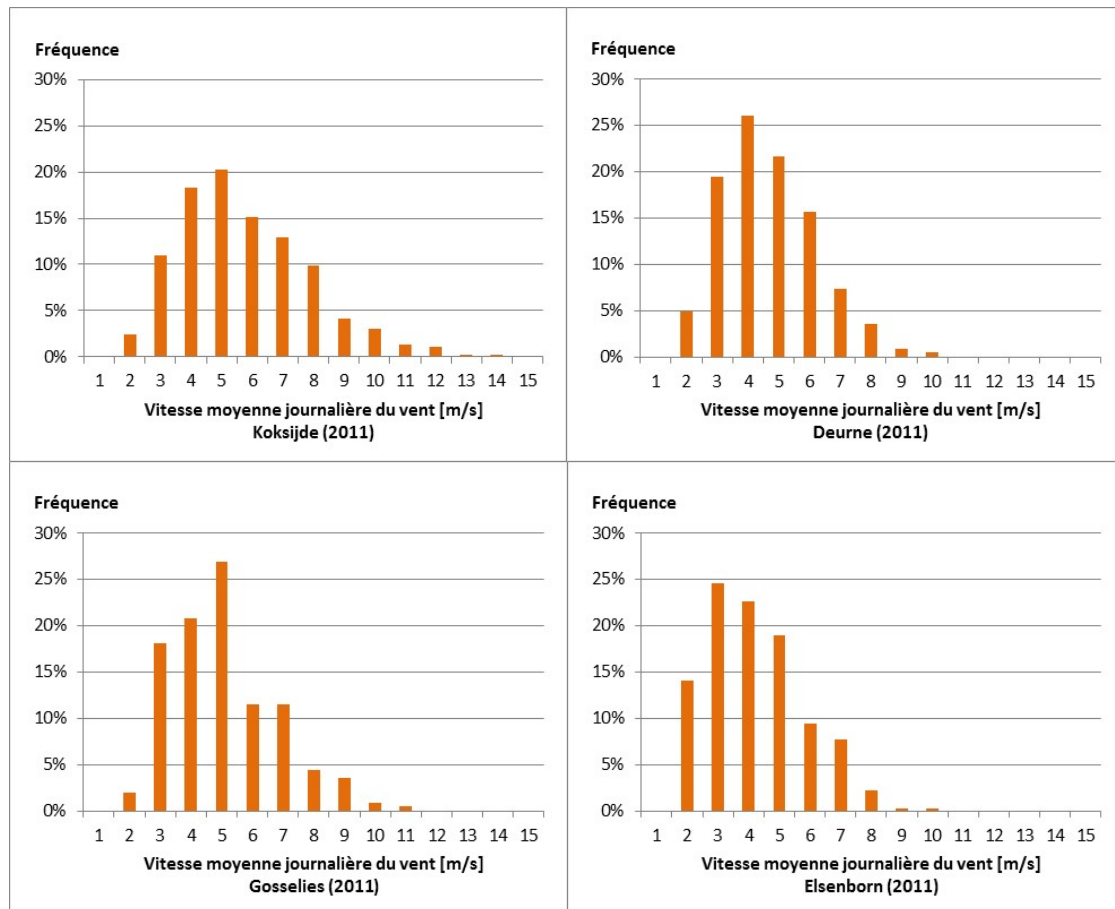


Figure 2 - Histogrammes de la vitesse moyenne journalière du vent pour Koksijde, Deurne, Gosselies et Elsenborn en 2011

2.2.3 Echelle anémométrique Beaufort

L'échelle anémométrique Beaufort est une échelle de mesure empirique, comportant 13 degrés (de 0 à 12) et utilisée pour évaluer la force du vent (voir Tableau 4)

2.3 Le coefficient de pression

Le coefficient de pression c_p est un paramètre qui dépend de la forme du bâtiment considéré, de la direction du vent et de l'influence des bâtiments voisins, de la végétation ou encore des caractéristiques du terrain.

Une détermination précise de ce coefficient peut être effectuée par des mesures en vraie grandeur sur site ou sur des modèles en soufflerie atmosphérique ou encore par des simulations numériques au moyen de logiciels spécialisés. Pour des calculs de ventilation ou d'infiltration d'air dans des bâtiments rectangulaires isolés et non protégés, on peut toutefois raisonnablement faire appel à des valeurs disponibles dans la littérature. Un exemple est donné au Tableau 5.

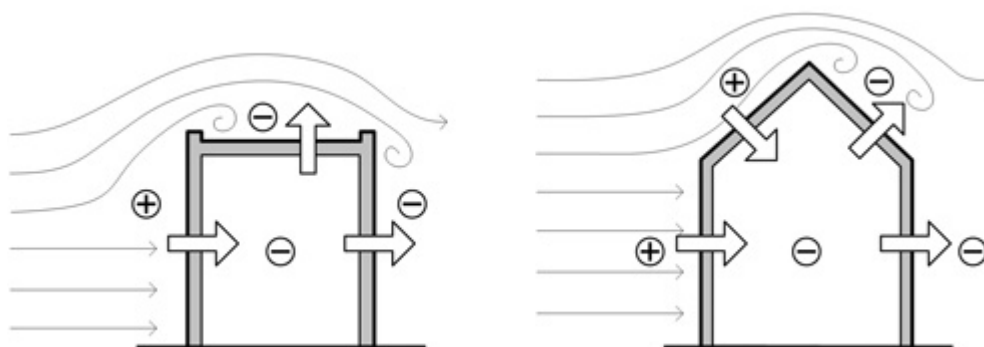


Figure 3 - Exemples de zones de surpression et dépression générées par le vent sur un bâtiment

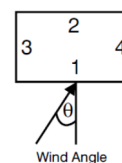
D'une façon générale, on peut indiquer que les façades et les versants de toiture (pente supérieure à environ 20°) exposés au vent subissent une surpression (coefficient de pression positif) tandis que les façades sous le vent et les toitures plates et légèrement inclinées (pente inférieure à environ 20°) subissent une dépression (coefficient de pression négatif). (Figure 3)

Tableau 4 - Échelle anémométrique Beaufort (extrait) [4]

Chiffre Beaufort	Terme descriptif	Vitesse du vent * [m/s]	Spécifications sur terre
0	Calme	0-0.2	Calme ; la fumée s'élève verticalement
1	Très légère brise	0.3 – 1.5	La direction du vent est révélée par l'entraînement de la fumée, mais non par les girouettes
2	Légère brise	1.6 – 3.3	Le vent est perçu au visage; les feuilles frémissent; une girouette ordinaire est mise en mouvement
3	Petite brise	3.4 - 5.4	Feuilles et petites branches constamment agitées; le vent déploie les drapeaux légers
4	Jolie brise	5.5 – 7.9	Le vent soulève la poussière et les feuilles de papier ; les petites branches sont agitées
5	Bonne brise	8.0 – 10.7	Les arbustes en feuilles commencent à se balancer; de petites vagues avec crêtes se forment sur les eaux intérieures
6	Vent frais	10.8 – 13.8	Les grandes branches sont agitées; les fils télégraphiques font entendre un sifflement; l'usage des parapluies est rendu difficile
7	Grand frais	13.9 – 17.1	Les arbres sont agités en entier; la marche contre le vent est assez pénible
8	Coup de vent	17.2 – 20.7	Le vent casse des rameaux; la marche contre le vent est généralement rendue très difficile
9	Fort coup de vent	20.8 – 24.4	Le vent occasionne de légers dommages aux habitations (tuyaux de cheminées et ardoises arrachés)
10	Tempête	24.5 – 28.4	Rare à l'intérieur des terres; arbres déracinés; importants dommages aux habitations
11	Violente tempête	28.5 – 32.6	Très rarement observé; s'accompagne de ravages étendus
12	Ouragan	32.7 et plus	-

* Vitesse du vent équivalente à la hauteur normalisée de 10 mètres au-dessus d'un terrain plat et découvert

Tableau 5 – Coefficients de pression pour un bâtiment bas (3 étages au maximum) présentant un rapport longueur largeur égal à 2 :1 et non protégé du vent [1]



		Direction du vent							
		0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Façade 1		0.5	0.25	-0.5	-0.8	-0.7	-0.8	-0.5	0.25
Façade 2		-0.7	-0.8	-0.5	0.25	0.5	0.25	-0.5	-0.8
Façade 3		-0.9	0.2	0.6	0.2	-0.9	-0.6	-0.35	-0.6
Façade 4		-0.9	-0.6	-0.35	-0.6	-0.9	0.2	0.6	0.2
Toiture (pente <10°)	Avant	-0.7	-0.7	-0.8	-0.7	-0.7	-0.7	-0.8	-0.7
	Arrière	-0.7	-0.7	-0.8	-0.7	-0.7	-0.7	-0.8	-0.7
Average		-0.7	-0.7	-0.8	-0.7	-0.7	-0.7	-0.8	-0.7
Toiture (pente 11-30°)	Avant	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7
	Arrière	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6
Average		-0.6	-0.65	-0.7	-0.65	-0.6	-0.65	-0.7	-0.65
Toiture (pente >30°)	Avant	0.25	0	-0.6	-0.9	-0.8	-0.9	-0.6	0
	Arrière	-0.8	-0.9	-0.6	0	0.25	0	-0.6	-0.9

NOTE : Ces coefficients de pression simplifiés sont applicables aux problèmes d'infiltration d'air et de ventilation naturelle. Des coefficients plus précis peuvent être nécessaires pour d'autres applications telles que la fixation des tuiles sur les toitures inclinées par exemple.[8]

2.4 Différence de pression d'air sur une façade

Outre la pression exercée sur les parois extérieures, l'action du vent a également pour effet de modifier la pression à l'intérieur des bâtiments. Cette modification résulte du nécessaire équilibre entre les infiltrations d'air au travers des façades et versants de toiture qui subissent une surpression d'une part et les exfiltrations d'air au travers des façades et versants de toiture qui subissent une dépression d'autre part.

Supposons, à titre d'illustration, un bâtiment soumis à l'action du vent qui subit une surpression de 16 Pa sur la façade avant et une dépression de -22 Pa sur la façade arrière (voir le calcul de ces valeurs dans l'exemple du paragraphe suivant ; on suppose toutes les autres parois extérieures parfaitement étanches à l'air pour simplifier le problème). Si ces deux façades présentent la même perméabilité à l'air, il est évident qu'elles devront être soumises à une différence de pression d'égale valeur mais de signe opposé de façon à laisser passer le même débit d'air, l'une vers l'intérieur du bâtiment et l'autre vers l'extérieur. La différence de pression d'équilibre résultant de l'action du vent sera égale à 3 Pa. La façade avant subira donc une différence de pression de 19 Pa (= 16 + 3) et la façade arrière une différence de pression de -19 Pa (= -22 + 3).

La différence de pression Δp_w subie par les façades et versants de toiture d'un bâtiment dépend donc de la pression exercée par le vent p_w et de la différence de pression d'équilibre Δp_i . Cette dernière est influencée par les caractéristiques et la localisation des fentes et ouvertures dans l'enveloppe du bâtiment.

$$\Delta p_w = p_w + \Delta p_i \quad [Pa] \quad (4)$$

Lorsque l'intérieur du bâtiment est cloisonné, la différence de pression d'équilibre peut différer d'un espace à l'autre et dépend en outre de la perméabilité à l'air des parois internes. Dans ce cas, ces dernières supportent une partie de la pression exercée par le vent.

Dans le cas le plus défavorable (pas de parois intérieures ou toutes les portes intérieures ouvertes), la pression exercée par le vent est supportée uniquement par les façades et les versants de toiture. Une bonne étanchéité à l'air des parois intérieures (dans un immeuble à appartements par exemple) permet donc de limiter la pression que les façades et versants de toiture doivent subir et, en conséquence, de limiter le débit d'infiltration d'air.

2.5 Exemple de calcul

Considérons une maison isolée située en zone suburbaine (terrain de catégorie III) telle que représentée à la Figure 4. La vitesse de référence du vent est égale à 4 m/s. Le vent souffle perpendiculairement à la façade principale. Les températures d'air intérieur et extérieur sont égales à 20°C pour une humidité relative de 50%. Il n'y a pas de cloisons et de planchers à l'intérieur de la maison.

La vitesse du vent à mi-hauteur des façades (2.6 m) peut être calculée au moyen des formules (3) et (2). Etant donné que cette hauteur est inférieure à la hauteur minimale z_{\min} (5 m) pour la catégorie de terrain III, le calcul est effectué pour cette valeur.

$$v_m(2.6) = v_m(5) = 4 \cdot 0.2154 \ln\left(\frac{5}{0.3}\right) = 2.4 \quad [m/s]$$

La vitesse du vent à mi-hauteur des versants de toiture (6.4 m) peut être calculée au moyen de la formule (2)

$$v_m(6.4) = 4 \cdot 0.2154 \ln\left(\frac{6.2}{0.3}\right) = 2.6 \quad [m/s]$$

La pression du vent sur les façades et les versants de toitures peut être calculée au moyen de la formule (1) en appliquant les coefficients de pression issus du Tableau 5.

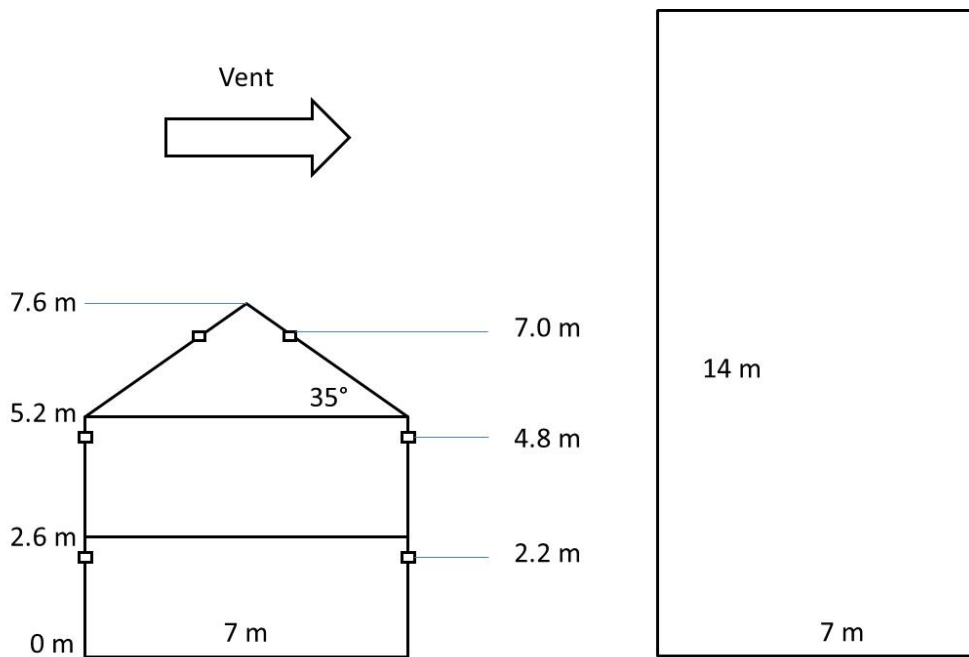


Figure 4 - Vues en coupe et en plan de la maison considérée pour l'exemple de calcul

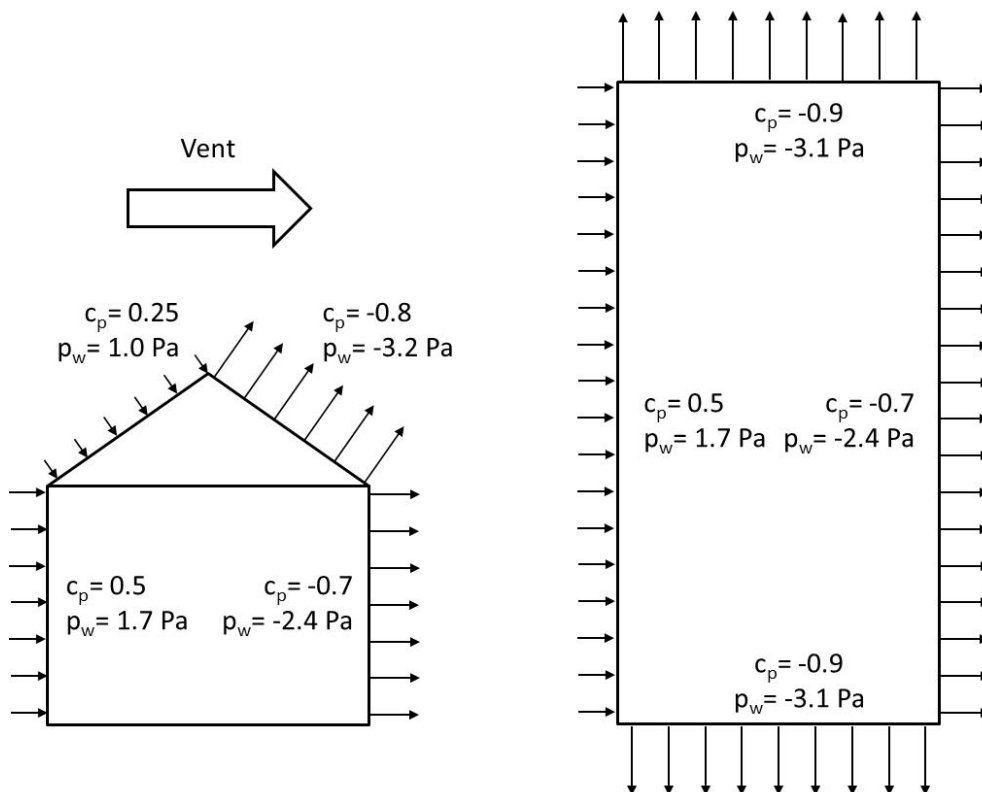


Figure 5 - Surpressions et dépressions créées par le vent sur le bâtiment

	Coefficient de pression c_p [-]	Pression exercée par le vent p_w [Pa]
Façade avant	0.5	1.7
Façade arrière	-0.7	-2.4
Façade latérale	-0.9	-3.1
Toiture avant	0.25	1.0
Toiture arrière	-0.8	-3.2

Si on considère que les façades et versants de toiture de la maison sont parfaitement étanches à l'air et que la maison est pourvue de 6 ouvertures de ventilation identiques (Figure 4), la différence de pression d'équilibre Δp_i est égale à 0.6 Pa. Les différentes ouvertures de ventilation subissent alors les différences de pression Δp_w suivantes :

Ouverture de ventilation	Différence de pression due à l'effet du vent Δp_w	Ouverture de ventilation	Différence de pression due à l'effet du vent Δp_w
Versant de toiture avant	$1 + 0.6 = 1.6$	Versant de toiture arrière	$-3.2 + 0.6 = -2.6$
Façade avant (haute)	$1.7 + 0.6 = 2.3$	Façade arrière (haute)	$-2.4 + 0.6 = -1.8$
Façade avant (basse)	$1.7 + 0.6 = 2.3$	Façade arrière (basse)	$-2.4 + 0.6 = -1.8$

NOTE : Le principe du calcul de la différence de pression d'équilibre consiste à annuler la somme des débits d'air entrant et sortant du bâtiment en considérant les caractéristiques des différentes ouvertures. Il convient pour cela d'exprimer le débit au travers chaque ouverture en fonction de la pression d'équilibre et de faire varier cette dernière par itération jusqu'à l'obtention du résultat souhaité (annulation de la somme des débits d'air dans le cas présent).

3 Différence de pression hydrostatique

3.1 Formule générale

La différence de pression hydrostatique totale $\Delta p_{g,tot}$ est engendrée par la différence de température entre l'extérieur et l'intérieur d'un bâtiment et est exprimée par la relation suivante:

$$\Delta p_{g,tot} = (\rho_e - \rho_i) g h \quad (5)$$

Ce que l'on peut approximer comme suit:

$$\Delta p_{g,tot} \approx \rho_0 T_0 \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_i} \right) g h \quad (6)$$

avec

ρ_e , la masse volumique de l'air extérieur [kg/m^3]

ρ_i , la masse volumique de l'air intérieur [kg/m^3]

ρ_0 , la masse volumique de l'air à $273.15 \text{ K} = 1.291$ [kg/m^3]

g , l'accélération de la pesanteur ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$)

h , la différence de hauteur entre les ouvertures les plus basses et les plus hautes du bâtiment considéré [m]

T_i , la température de l'air intérieur [K]

T_e , la température de l'air extérieur [K]

T_0 , la température de référence égale à 273.15 [K]

Il découle de la formule (5) que la différence de pression hydrostatique totale augmente si la différence de hauteur h entre les ouvertures supérieures et inférieures du bâtiment augmente et si la différence de température $\theta_i - \theta_e$ s'accroît.

Exemple

Calculons la différence de pression hydrostatique totale avec $\theta_e = 0^\circ\text{C}$ ($T_e = 273.15 \text{ K}$; $\rho_e = 1.291 \text{ kg}/\text{m}^3$) et $\theta_i = 20^\circ\text{C}$ ($T_i = 293.15 \text{ K}$; $\rho_i = 1.199 \text{ kg}/\text{m}^3$) pour différentes situations en utilisant la formule (5).

	Différence de hauteur [m]	Différence de pression hydrostatique totale $\Delta p_{g,tot}$ [Pa]
Fenêtre normale	1	0.90
Maison unifamiliale	5	4.5
Immeuble élevé	50	45

3.2 Répartition des pressions

Sous l'effet de la différence de pression hydrostatique, de l'air froid pénètre par les ouvertures et les fentes situées dans le bas du bâtiment et de l'air chaud s'échappe par les ouvertures et les fentes situées dans le haut du bâtiment lorsque celui-ci a une température plus élevée que l'ambiance extérieure.

Dans ces conditions, la partie basse du bâtiment est en effet soumise à une surpression et tandis que la partie haute est soumise à une dépression. Dans la Figure 6 A, la différence de pression à laquelle sont soumis les éléments de façade est représentée par la différence entre la droite de pression extérieure (p_e) et celle de pression intérieure (p_i). La hauteur à laquelle cette différence de pression est nulle constitue le plan de pression neutre (PPN).

Dans le cas d'un bâtiment compartimenté sur sa hauteur (étages étanches à l'air les uns par rapport aux autres), la différence de pression hydrostatique ne peut se développer sur toute la hauteur du bâtiment et il convient dans ce cas d'appliquer la formule (5) étage par étage. Le bâtiment présente dans ce cas plusieurs plans de pression neutre. La différence de pression entre les différents étages est représentée par les discontinuités dans la droite de pression intérieure (p_i) (Figure 6 B).

Les bâtiments réels ne sont ni complètement ouverts sur toute leur hauteur ni parfaitement étanches entre les étages. Les cages d'escalier, les gaines techniques ou autres cages d'ascenseur permettent le passage d'air entre les étages. La Figure 6 C représente un bâtiment chauffé avec une répartition uniforme des ouvertures dans les façades extérieures, entre les locaux des étages et vers la cage d'escalier. La différence de pression entre les locaux des étages et la cage d'escalier est représentée par la différence entre la droite de pression intérieure (p_i) et celle de pression de la cage d'escalier (p_{cage}). Une partie de la différence de pression hydrostatique étant reprise par les cloisons de la cage d'escalier, la différence de pression subie par les façades des locaux est donc moindre que s'il n'y avait pas ces cloisons.

Une bonne étanchéité à l'air entre les locaux des différents étages et vers les cages d'escalier permet donc de réduire la différence de pression hydrostatique sur les façades de ces locaux et par conséquence de réduire le débit d'infiltration d'air.

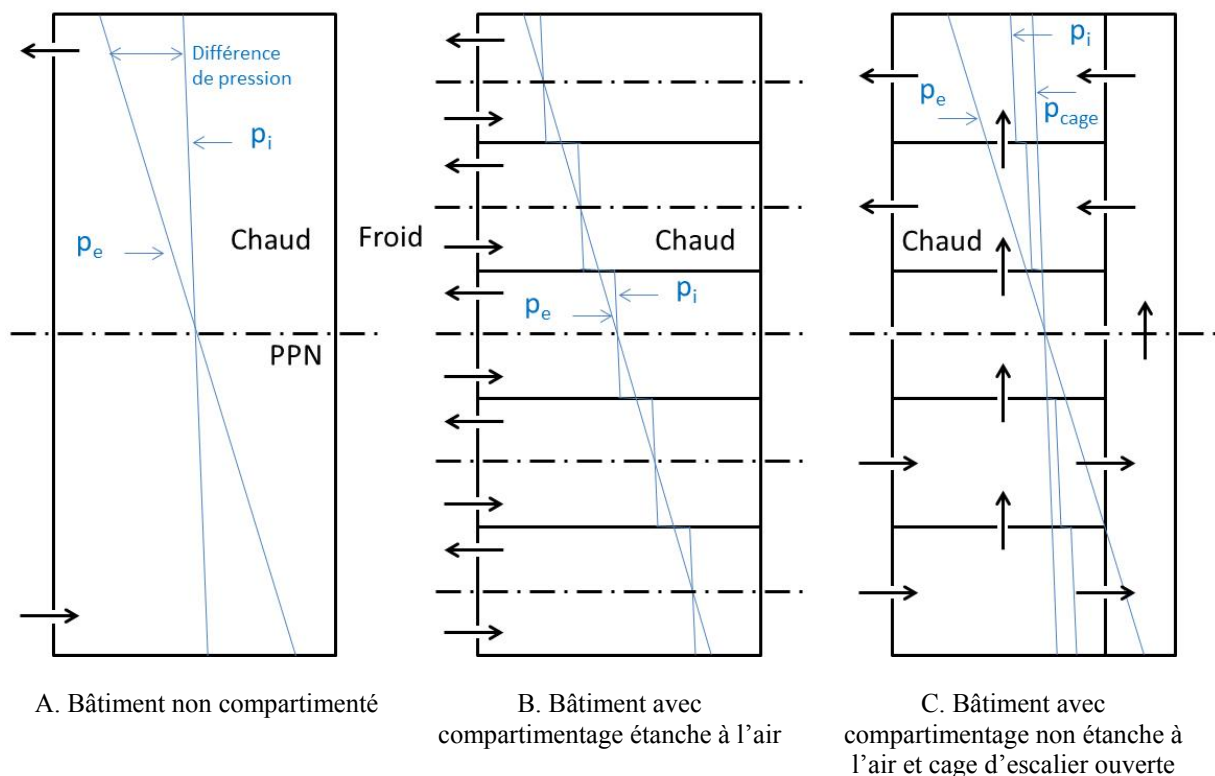


Figure 6 – Effet du compartimentage des bâtiments sur la répartition des pressions

Lorsque les ouvertures, fuites ou fentes dans les façades sont réparties de manière uniforme sur la hauteur d'un bâtiment, le plan de pression neutre se trouve à mi-hauteur de celui-ci (Figure 6 A). La dépression qui s'applique sur les ouvertures les plus hautes (dans le cas d'un bâtiment chauffé) est donc égale à la surpression qui s'applique

sur les ouvertures les plus basses. La valeur absolue de ces différences de pression est égale à la moitié de la différence de pression hydrostatique totale et leur somme est bien égale à la différence de pression hydrostatique totale.

Par contre, lorsque les ouvertures, fuites ou fentes en partie basse sont plus larges que celles en partie haute, on observe un déplacement vers le bas du plan de pression neutre (Figure 7). La dépression qui s'applique sur les ouvertures les plus hautes (dans le cas d'un bâtiment chauffé) est donc supérieure à la surpression qui s'applique sur les ouvertures les plus basses. La somme des valeurs absolues de ces différences de pression reste toutefois toujours égale à la différence de pression hydrostatique totale.

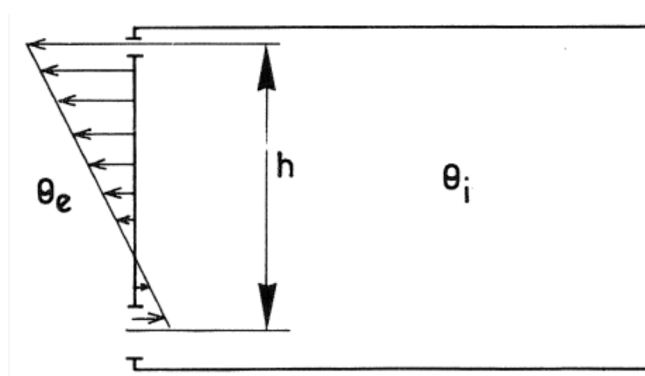


Figure 7 - Déplacement du plan de pression neutre vers l'ouverture la plus large

3.3 Exemple de calcul

Reprenons l'exemple précédent (Figure 4). La température extérieure θ_e est égale à 0°C ($\rho_e = 1.291 \text{ kg/m}^3$) et la température intérieure θ_i est égale à 20°C ($\rho_i = 1.199 \text{ kg/m}^3$). La différence de hauteur entre les ouvertures de ventilation les plus basses et les plus hautes est égale à 4.8 m ($7.0 - 2.2$).

La différence de pression hydrostatique totale peut être calculée au moyen de la formule (5) :

$$\Delta p_{g,tot} = (1.291 - 1.199) 9.81 \cdot 4.8 = 4.3 \text{ [Pa]}$$

Les différentes ouvertures de ventilation subissent alors les différences de pression hydrostatique Δp_g suivantes :

Ouverture de ventilation	Différence de pression hydrostatique Δp_g [Pa]	Ouverture de ventilation	Différence de pression hydrostatique Δp_g [Pa]
Versant de toiture avant	-2.0	Versant de toiture arrière	-2.0
Façade avant (haute)	0.0	Façade arrière (haute)	0.0
Façade avant (basse)	2.3	Façade arrière (basse)	2.3

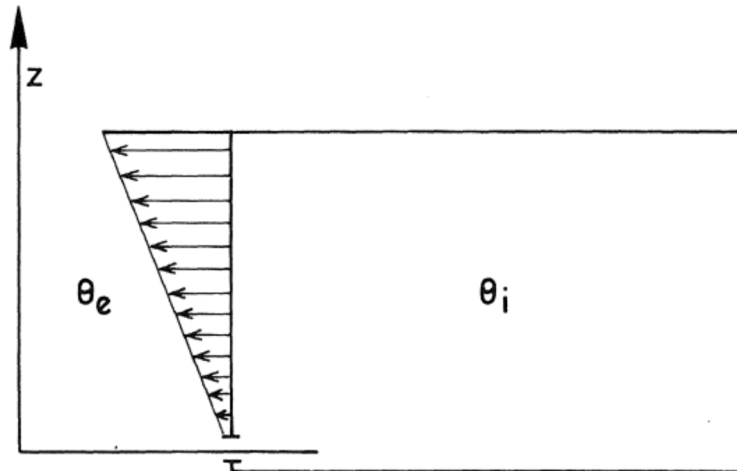
Les ouvertures situées en partie haute des façades se trouvant presque à mi-hauteur par rapport aux autres ouvertures se situent à peu près au niveau du plan de pression neutre et subissent de ce fait une différence de pression quasi nulle.

NOTE : Le principe du calcul de la différence de pression hydrostatique subie par chaque ouverture consiste à annuler la somme des débits d'air entrant et sortant du bâtiment en considérant les caractéristiques des différentes ouvertures. Il convient pour cela d'exprimer le débit au travers chaque ouverture en fonction de la différence de pression hydrostatique qu'elle subit, cette différence de pression étant elle-même exprimée en fonction de la différence de pression hydrostatique à une certaine hauteur, et de faire varier cette dernière par itération jusqu'à l'obtention du résultat souhaité (annulation de la somme des débits d'air dans le cas présent).

3.4 Développement des formules

3.4.1 Local étanche à l'air avec une ouverture

Considérons un local complètement étanche à l'air à l'exception d'une ouverture au ras du sol, par laquelle le local communique avec l'ambiance extérieure (Figure 8).



Légende :

θ_e température extérieure [°C]

θ_i température intérieure [°C]

Triangle fléché: variation de $p_{iz} - p_{ez}$

avec p_{iz} pression d'air intérieure à la hauteur z [Pa]

p_{ez} pression d'air extérieure à la hauteur z [Pa]

Figure 8 - Développement de la pression hydrostatique dans un local complètement étanche à l'air à l'exception d'une ouverture au ras du sol

A hauteur de l'ouverture (hauteur au sol $z = 0$), la pression d'air absolue à l'extérieur p_e est égale à la pression d'air absolue à l'intérieur p_i :

$$p_{e0} = p_{i0} \quad [Pa] \quad (7)$$

A une hauteur $z(m)$ quelconque, la pression extérieure sera égale à :

$$p_{ez} = p_{e0} - \rho_e g z \quad [Pa] \quad (8)$$

avec

ρ_e , la masse volumique de l'air extérieur [kg/m³]

g , l'accélération de la pesanteur ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$)

À la même hauteur $z (m)$ quelconque, la pression intérieure sera égale à :

$$p_{iz} = p_{i0} - \rho_i g z \quad [Pa] \quad (9)$$

avec

ρ_i , la masse volumique de l'air intérieur [kg/m³]

La différence de pression entre l'ambiance extérieure et l'ambiance intérieure à une hauteur z quelconque est donc :

$$\Delta p_z = p_{ez} - p_{iz} = (p_{e0} - \rho_e g z) - (p_{i0} - \rho_i g z) \quad [Pa] \quad (10)$$

et, puisque $p_{i0} = p_{e0}$ on a :

$$\Delta p_z = (\rho_i - \rho_e) g z \quad [Pa] \quad (11)$$

Supposons que la température extérieure θ_e soit inférieure à la température intérieure θ_i du local (et donc $\rho_e > \rho_i$).

Dans ce cas, on peut donc en déduire que:

1. lorsqu'un local est pourvu d'une ouverture unique dans le bas, il est en surpression par rapport à l'ambiance extérieure ;
2. cette surpression varie linéairement avec la hauteur suivant la formule (10). La variation de $p_{ez} - p_{iz}$ est représentée sur la Figure 8 par le triangle dont le sommet est situé à la hauteur de l'ouverture du local ;
3. si on pratiquait une petite ouverture (joint ou fente) dans la partie supérieure du local, on constaterait que l'air chaud s'échappe du local par suite de la différence de pression.

Si on applique le même raisonnement pour un local étanche à l'air pourvu d'une ouverture unique dans sa partie supérieure, on remarque que:

1. l'ensemble du local est en dépression par rapport à l'ambiance extérieure ;
2. cette dépression varie linéairement en fonction de la hauteur sous l'ouverture ;
3. si on pratiquait une petite ouverture dans le bas du local, de l'air froid s'introduirait à l'intérieur par cette ouverture sous l'effet de la dépression.

3.4.2 Local étanche à l'air avec une ouverture dans le bas et une ouverture dans le haut

Considérons un local complètement étanche à l'air à l'exception d'une ouverture au ras du sol et d'une ouverture identique au ras du plafond, par lesquelles le local communique avec l'ambiance extérieure (Figure 9). Dans ce cas, tout l'air extérieur qui pénétrerait dans le local par une des ouvertures devrait être compensé par une quantité égale d'air intérieur quittant le local par l'autre ouverture.

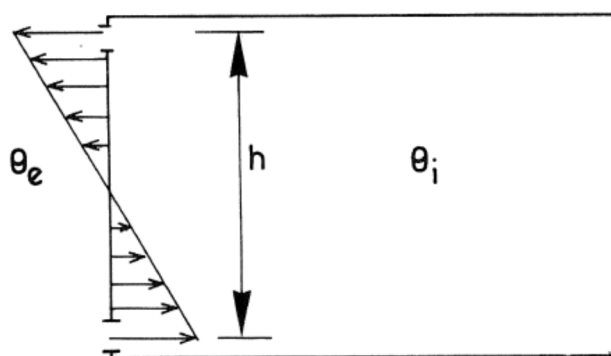


Figure 9 - Développement de la pression hydrostatique dans un local complètement étanche à l'air à l'exception d'une ouverture au ras du sol et d'une ouverture identique au ras du plafond

Comme indiqué précédemment, la pression extérieure à hauteur de l'ouverture du haut est égale à :

$$p_{eh} = p_{e0} - \rho_e g h \quad (12)$$

avec

h , la différence de hauteur entre les deux ouvertures [m]

De même, la pression intérieure à hauteur de l'ouverture du haut est égale à :

$$p_{ih} = p_{i0} - \rho_i g h \quad (13)$$

Etant donné que les deux ouvertures sont identiques et que le débit d'air qui les traverse est également identique, il faut nécessairement que la différence de pression qui s'applique sur les ouvertures soit aussi identique. En outre, puisque les débits doivent être de sens opposé, il faut que les différences de pression soient de signe opposé.

On peut donc écrire :

$$\begin{aligned} \Delta p_0 &= -\Delta p_h \\ (p_{e0} - p_{i0}) &= -(p_{eh} - p_{ih}) \end{aligned} \quad (14)$$

Ou encore

$$\begin{aligned}
 (p_{e0} - p_{i0}) &= (p_{ih} - p_{eh}) \\
 &= (p_{i0} - \rho_i g h) - (p_{e0} - \rho_e g h) \\
 &= (\rho_e g h - \rho_i g h) - (p_{e0} - p_{i0}) \\
 2(p_{e0} - p_{i0}) &= (\rho_e g h - \rho_i g h) \\
 \Delta p_0 = (p_{e0} - p_{i0}) &= -(\rho_i - \rho_e) \frac{g h}{2}
 \end{aligned} \tag{15}$$

et

$$\Delta p_h = (p_{eh} - p_{ih}) = (\rho_i - \rho_e) \frac{g h}{2} \tag{16}$$

Supposons que la température extérieure θ_e soit inférieure à la température intérieure θ_i du local (et donc $\rho_e > \rho_i$).

Dans ce cas, on constate que l'air froid de l'extérieur pénètre par l'ouverture située au ras du sol et que l'air chaud du local s'échappe par l'ouverture située au ras du plafond. La répartition de la pression d'air se fait comme le montre le schéma de la Figure 9, c'est-à-dire que la pression intérieure est égale à la pression extérieure à la moitié exactement de la distance h entre les deux ouvertures.

Considérons maintenant un local complètement étanche à l'air à l'exception d'une ouverture au ras du sol et d'une ouverture nettement plus petite au ras du plafond, par lesquelles le local communique avec l'ambiance extérieure (Figure 10). Dans ce cas également, tout l'air extérieur qui pénétrerait dans le local par une des ouvertures devrait être compensé par une quantité égale d'air intérieur quittant le local par l'autre ouverture.

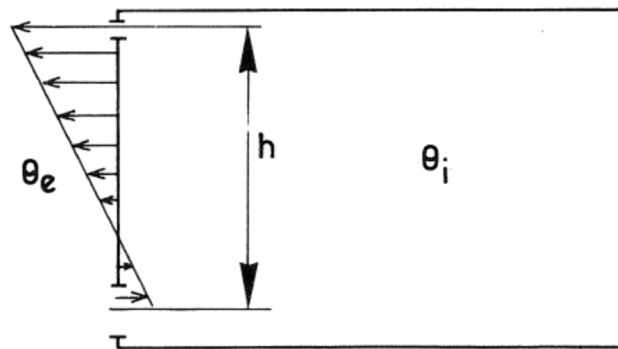


Figure 10 - Développement de la pression hydrostatique dans un local complètement étanche à l'air à l'exception d'une ouverture au ras du sol et d'une ouverture nettement plus petite au ras du plafond

La relation débit-pression des telles ouvertures peut s'exprimer sous la forme suivante :

$$q = C \Delta p^n \quad [m^3/h] \tag{17}$$

avec

q , le débit d'air traversant l'ouverture [m^3/h]

C , le coefficient de débit d'air [$m^3/h \cdot Pa^n$]

n , l'exposant de débit d'air [-]

p , la différence de pression [Pa]

On peut donc exprimer l'égalité des débits d'air en haut et en bas de la façon suivante :

$$q = C_0 \Delta p_0^{n_0} = -C_h \Delta p_h^{n_h} \tag{18}$$

On a donc

$$\begin{aligned}
 C_0 \Delta p_0^{n_0} &= -C_h \Delta p_h^{n_h} \\
 \Delta p_0 &= -\frac{C_h}{C_0} \Delta p_h^{\frac{n_h}{n_0}} \\
 \Delta p_0 &= -\frac{C_h}{C_0} (p_{eh} - p_{ih})^{\frac{n_h}{n_0}}
 \end{aligned} \tag{19}$$

$$\Delta p_0 = -\frac{C_h}{C_0} ((p_{e0} - \rho_e g h) - (p_{i0} - \rho_i g h))^{\frac{n_h}{n_0}}$$

$$\Delta p_0 = -\frac{C_h}{C_0} ((\rho_i g h - \rho_e g h) + (p_{e0} - p_{i0}))^{\frac{n_h}{n_0}}$$

Si on considère que les exposant de débit d'air des deux ouvertures ont la même valeur (c'est-à-dire qu'il s'agit d'ouvertures de même sorte ; par exemple des grilles de ventilation avec $n=0.5$ ou des fuites d'air avec $n=0.65$), n_h/n_0 est égal à 1 et on a

$$\Delta p_0 = -\frac{C_h}{C_0} ((\rho_i g h - \rho_e g h) + (p_{e0} - p_{i0}))^1$$

$$\Delta p_0 = -\frac{C_h}{C_0} (\rho_i g h - \rho_e g h) - \frac{C_h}{C_0} (p_{e0} - p_{i0})$$

$$\Delta p_0 = -\frac{C_h}{C_0} (\rho_i g h - \rho_e g h) - \frac{C_h}{C_0} \Delta p_0 \quad (20)$$

$$\Delta p_0 \left(1 + \frac{C_h}{C_0}\right) = -\frac{C_h}{C_0} (\rho_i g h - \rho_e g h)$$

$$\Delta p_0 = -\frac{C_h}{C_0 + C_h} (\rho_i - \rho_e) g h$$

De même on a

$$\Delta p_h = \frac{C_0}{C_0 + C_h} (\rho_i - \rho_e) g h \quad (21)$$

On constate donc que si une des deux ouvertures présente une résistance à l'écoulement de l'air nettement plus grande que l'autre (par exemple si l'ouverture supérieure est beaucoup plus petite), la droite de pression sera décalée et le point où p_i égale p_e va également se déplacer vers la plus grande ouverture (Figure 10).

Cela est logique, car la même quantité d'air passera à travers les deux ouvertures et la différence de pression sera plus importante au droit de l'ouverture présentant une grande résistance à l'écoulement de l'air qu'au droit de celle présentant une faible résistance.

4 Combinaison des différences de pression d'air

4.1 Formule générale

Il est évident que l'influence du vent et des écarts de température entre l'ambiance intérieure et l'ambiance extérieure d'un local ou d'un bâtiment peuvent se produire simultanément.

La différence de pression d'air réelle subie par un élément de façade ou de toiture est alors donnée par la somme de la pression exercée par le vent et de celle due à la différence de température en tenant compte d'une nouvelle différence de pression d'équilibre a priori inconnue.

$$\Delta p = p_w + \Delta p_g + \Delta p_l \quad [Pa] \quad (22)$$

avec

p_w , la pression exercée par le vent

Δp_g , la différence de pression hydrostatique

Δp_l , la différence de pression d'équilibre

Selon le cas et la partie du bâtiment considérée, les deux effets peuvent se renforcer (augmentation de la valeur absolue de la différence de pression) ou s'opposer (diminution de la valeur absolue de la différence de pression).

4.2 Exemple de calcul

Si on considère l'exemple développé précédemment (Figure 4) les différentes ouvertures de ventilation subissent les différences de pression suivantes :

Ouverture de ventilation	Différence de pression [Pa]	Ouverture de ventilation	Différence de pression [Pa]
Versant de toiture avant	$1.0 - 2.0 + 0.5 = -0.5$	Versant de toiture arrière	$-3.2 - 2.0 + 0.5 = -4.7$
Façade avant (haute)	$1.7 - 0.0 + 0.5 = 2.2$	Façade arrière (haute)	$-2.4 - 0.0 + 0.5 = -1.9$
Façade avant (basse)	$1.7 + 2.3 + 0.5 = 4.6$	Façade arrière (basse)	$-2.4 + 2.3 + 0.5 = 0.4$

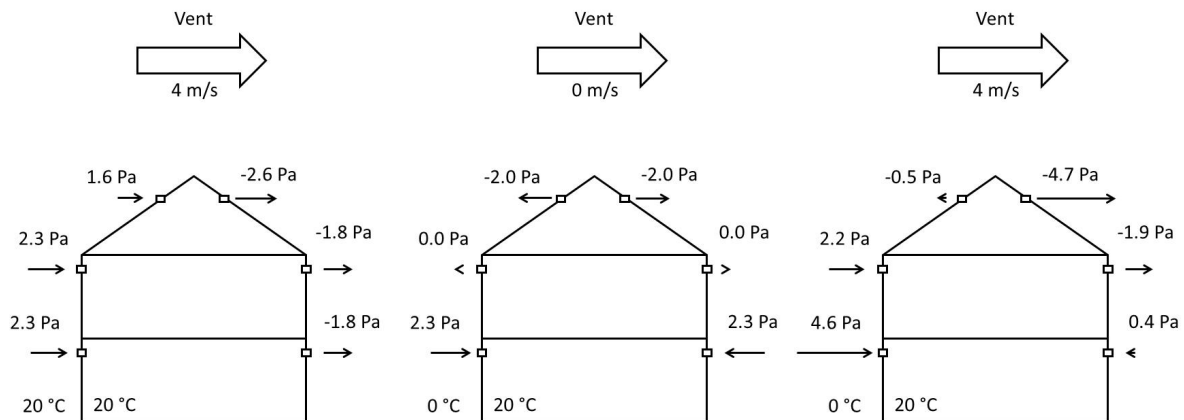


Figure 11 - Différences de pression générées par le vent seul, la différence de température seule et la combinaison des deux effets

NOTE : Le principe du calcul de la différence de pression d'équilibre consiste à annuler la somme des débits d'air entrant et sortant du bâtiment en considérant les caractéristiques des différentes ouvertures. Il convient pour cela d'exprimer le débit au travers chaque ouverture en fonction de la pression d'équilibre et de faire varier cette dernière par itération jusqu'à l'obtention du résultat souhaité (annulation de la somme des débits d'air dans le cas présent).

5 Références

- [1] ASHRAE Handbook - Fundamentals 2009 (SI Edition). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- [2] Davis, R. S., 1991. Formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide (1981/1991). Extrait des Procès-verbaux du Comité international des poids et mesures
- [3] Liddament M.W., 1996. A Guide to Energy Efficient Ventilation. AIVC, Great Britain
- [4] Manuel des codes – Codes internationaux, Volume I.1 : Partie A – Codes alphanumériques. Organisation météorologique mondiale – OMM, 2012 (OMM N°306)
- [5] NBN EN 1991-1-4 : 2005. Eurocode 1: Actions sur les structures - Partie 1-4: Actions générales - Actions du vent
- [6] Nylund P.O., 1980. Infiltration and Ventilation. Swedish Council for Building Research, Stockholm, Sweden.
- [7] Observations climatologiques – Partie I. Institut Royal Météorologique de Belgique. Bulletins mensuels 2011
- [8] Parmentier, B., 2003. Les effets du vent sur les toitures inclinées. La recherche au CSTC et ses enseignements (Recherches & Etudes). Revue CSTC, 2003/09/00, n° 3, p. 3-17.
- [9] Santamouris, M., 2004. La ventilation naturelle en zone urbaine. AIVC, VIP n°3, mars 2004.
- [10] Uyttenbroeck, J., Carpentier G., 1984. Problèmes d'humidité dans les bâtiments. Causes des dégradations. Ponts thermiques. Climat intérieur. Données pour la conception et l'exécution des bâtiments. Conditions d'occupation des bâtiments. CSTC, NIT 153, 84 p.