

## Calcul des débits de ventilation naturelle

I.	Introduction.....	3
II.	Prérequis théoriques .....	3
II.1.	Equations de base .....	3
II.2.	Coefficient de pression.....	5
II.3.	Dilatation, flottabilité .....	6
II.4.	Equation de l’orifice .....	8
III.	Mécanismes de la ventilation naturelle .....	14
III.1.	Ventilation transversante due au vent .....	14
III.2.	Tirage thermique, configuration transversante.....	15
III.3.	Tirage thermique, configuration mono-orienté.....	19
III.4.	Ventilation due au vent, mono-orientée.....	21
IV.	Les Airflow Networks (AFN).....	23
IV.1.	Principe de calcul – vent seul .....	23
IV.2.	Ajout des effets thermiques.....	24
IV.3.	Les AFN .....	25
V.	Le vent et les bâtiments .....	26
V.1.	Profils de vent.....	26
V.2.	Obtention des coefficients de pression.....	30
VI.	Les grandes ouvertures .....	38
VII.	Annexes .....	39
VII.1.	Bibliographie.....	39
VII.2.	Table de coefficients de pression de l’Eurocode 1 .....	42

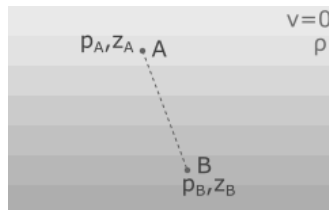
## I. Introduction

Le présent rapport recense les aspects théoriques et pratiques concernant la détermination des débits de ventilation naturelle dans les bâtiments.

## II. Prérequis théoriques

### II.1. Equations de base

#### II.1.a. Statique des fluides



Soient deux points A et B dans un fluide incompressible au repos. Ces deux points peuvent être reliés par une ligne continue qui ne traverse aucune interface (ni fluide-fluide, ni solide-solide). Dans ce cas :

$$p_A + \rho g z_A = p_B + \rho g z_B$$

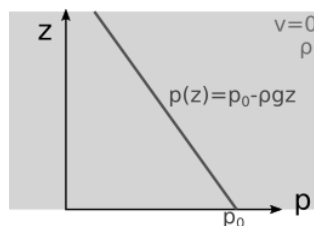
Avec :

- $z_A, z_B$  : la hauteur des points A et B,
- $p_A, p_B$  : la pression aux deux points,
- $\rho$  : la masse volumique du fluide.

On utilise souvent cette relation entre un point de référence de pression  $p_0$  à la hauteur  $z = 0m$  et un point à la pression  $p$  et à la hauteur  $z$  :

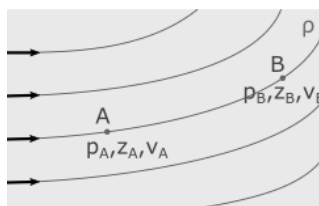
$$p = p_0 - \rho g z$$

Le profil de pression obtenu est illustré dans la figure suivante :



#### II.1.b. Équation de Bernoulli

**Fluide parfait**



L'équation de Bernoulli exprime la conservation de l'énergie le long d'une ligne de courant dans un fluide en écoulement. Soient deux points A et B dans fluide incompressible en écoulement. Les deux points sont sur une même ligne de courant. L'écoulement est supposé stationnaire et le fluide parfait (pas de perte d'énergie par frottement). Dans ce cas :

$$\underbrace{p_A + \rho g z_A + \frac{1}{2} \rho v_A^2}_{P_A} = \underbrace{p_B + \rho g z_B + \frac{1}{2} \rho v_B^2}_{P_B}$$

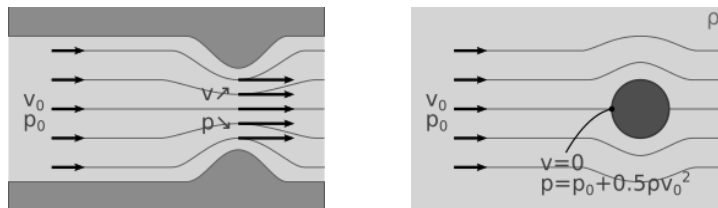
Avec :

- $P_A, P_B$  : la pression totale aux points A et B
- $v_A, v_B$  : la vitesse du fluide aux points A et B
- $1/2 \rho v_A^2, 1/2 \rho v_B^2$  : pression dynamique aux points A et B

### Applications

Les deux images ci-dessous illustrent des applications pratiques de l'équation de Bernoulli pour un écoulement parfait.

La première image montre un écoulement dans un tube de Venturi, c'est-à-dire un écoulement dans une conduite qui présente un rétrécissement de section (à hauteur  $z$  constante). Dans ce rétrécissement de section, la vitesse augmente pour assurer la conservation du débit. D'après l'équation de Bernoulli, la pression doit diminuer pour assurer la conservation de la pression totale.



La deuxième image montre un écoulement autour d'un obstacle cylindrique (à hauteur constante). Au centre de l'obstacle (supposé être à l'altitude  $z=0$ ), c'est-à-dire au point de séparation entre la portion de fluide qui passe au-dessus de l'obstacle et celle qui passe au-dessous de l'obstacle, il existe un point où la vitesse est nulle,  $v = 0$ . Ce point est appelé le point d'arrêt. Si dans la région en amont de l'obstacle, on note  $v_0$  la vitesse du fluide et  $p_0$  la pression statique, l'équation de Bernoulli implique que la pression statique au point d'arrêt est la somme de la pression statique  $p_0$  au loin du fluide et de la pression dynamique  $1/2 \rho v_0^2$  :

$$p = p_0 + \frac{1}{2} \rho v_0^2$$

### Fluide Incompressible non parfait

Pour un fluide incompressible qui perd de l'énergie par frottement le long de son écoulement, la perte d'énergie est exprimée au travers d'un terme de pertes de charge. On suppose que le point B se trouve en aval de l'écoulement par rapport au point A :

$$P_B = P_A - \Delta J_{A \rightarrow B}$$

Avec :

- $\Delta J_{A \rightarrow B}$  : les pertes de charges entre A et B

Généralement, la perte de charge sur une portion de réseau où la vitesse vaut  $v$  s'exprime de la façon suivante :

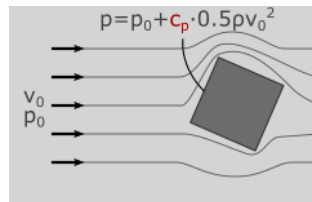
$$\Delta J = \zeta_{pl} \cdot \frac{1}{2} \rho v^2$$

Avec :

- $\zeta_{pl}$  : le coefficient de perte de charge sur le tronçon (*pressure loss coefficient*). Ce coefficient est sans unité.

## II.2. Coefficient de pression

Dans le cas d'application ci-dessus, nous avons calculé la pression statique au point d'arrêt d'un écoulement autour d'un obstacle. Dans la pratique, il peut s'avérer nécessaire de calculer la pression statique exercée par le fluide en tout point des faces d'un obstacle.



On considère la configuration ci-dessus. Un obstacle prismatique est plongé dans un écoulement homogène de vitesse  $v_0$  et de pression statique  $p_0$ . La pression qui s'exerce en chaque point des faces du prisme s'obtient avec l'équation :

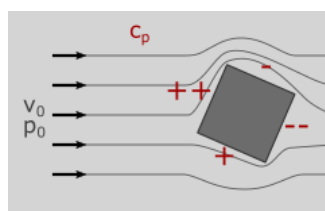
$$p(x, y) = p_0 + c_p(x, y) \cdot \frac{1}{2} \rho v_0^2$$

Avec :

- $c_p$  : coefficient de pression (pressure coefficient), à priori inhomogène sur les parois du prisme.
- $v_0$  : vitesse de référence, prise à un emplacement arbitraire dans l'écoulement (cette définition prend son sens lorsque l'obstacle est plongé dans un écoulement inhomogène). Cet emplacement doit être situé dans une zone de l'écoulement non perturbé par l'obstacle

La valeur des coefficients de pression  $c_p$  dépend du **régime d'écoulement (laminaire / turbulent)**, de la **direction de l'écoulement**, et de la **forme des obstacles** à l'écoulement. Par conséquent, pour une morphologie d'obstacles et un régime d'écoulement donnés, la valeur de  $c_p$  ne dépend pas de la vitesse du fluide, mais uniquement de l'orientation de l'écoulement.

Les coefficients de pression peuvent prendre des valeurs positives ou négatives. Dans le premier cas, l'écoulement crée une surpression. Dans le second cas, il crée une dépression par rapport à la pression de référence  $p_0$ .



## II.3. Dilatation, flottabilité

### II.3.a. Approximation de Boussinesq

Soit un fluide de masse volumique  $\rho_0$  à la température  $T_0$ . Sa densité  $\rho$  évolue en fonction de la température de la manière suivante :

$$\rho(T) = \rho_0(1 - \beta(T - T_0))$$

Avec :

- $\beta$  : le coefficient de dilatation isobare, qui vaut  $1/T$  pour un gaz, avec  $T$  exprimé en Kelvin

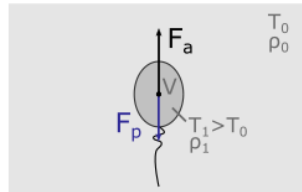
D'après l'équation précédente, si deux portions du même fluide ont des températures  $T_1$  et  $T_2$ , leur différence de densité vaut :

$$\rho_1 - \rho_2 = \rho(T_1) - \rho(T_2) = \rho_0(1 - \beta(T_1 - T_0)) - \rho_0(1 - \beta(T_2 - T_0)) = -\rho_0\beta(T_1 - T_2)$$

Dans la plupart des cas, les variations de température sont modérées, et les variations de densité  $\rho - \rho_0$  sont très faibles par rapport à la densité de référence  $\rho_0$ . On peut alors supposer que les effets des variations densité induites par des gradients thermique est :

- Négligeable sur l'**inertie** du système → on peut garder  $\rho_0$  dans les termes associés des équations de comportement ( $1/2 \rho_0 v^2$  pour Bernoulli)
- Significatif sur les termes de **force gravitationnelle**, c'est la poussée d'Archimède → on ajuste la densité dans les termes associés des équation ( $\rho g z$  pour Bernoulli)

### II.3.b. Poussée d'Archimède



Soit un fluide de densité  $\rho_0$  à la température  $T_0$ . On enferme dans un ballon un volume  $V$  de ce fluide à la température  $T_1$  (dont on néglige la pression induite par les parois du ballon sur le fluide). Dans ce cas, le volume de fluide est soumis à deux forces : son propre poids  $\vec{F}_p$ , et la force d'Archimède  $\vec{F}_a$  qui résulte de la pression exercée par le fluide environnant.

Ces deux forces s'expriment comme suit :

$$\begin{cases} \vec{F}_p = -V \cdot \rho_1 \cdot g \cdot \vec{e}_z \\ \vec{F}_a = V \cdot \rho_0 \cdot g \cdot \vec{e}_z \end{cases}$$

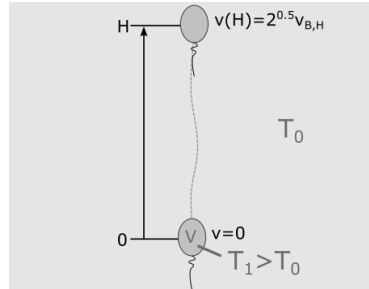
La force résultante vaut alors :

$$\begin{aligned} \vec{F}_p + \vec{F}_a &= V \cdot (\rho_0 - \rho_1) \cdot g \cdot \vec{e}_z = V \cdot [-\rho_0\beta(T_0 - T_1)] \cdot g \cdot \vec{e}_z \\ \vec{F}_p + \vec{F}_a &= V \cdot \rho_0 g \beta (T_1 - T_0) \cdot \vec{e}_z = V \cdot \rho_0 g \beta \Delta T \cdot \vec{e}_z \end{aligned}$$

### II.3.c. Vitesse caractéristique de la convection naturelle

La vitesse caractéristique d'un écoulement en convection naturelle se note  $v_{B,H}$ , avec B pour *Buoyancy*, et H qui représente une hauteur de référence.

On peut retrouver cette vitesse en considérant le parcours d'un ballon immergé dans un fluide au repos à la température  $T_0$ , et contenant le même fluide à la température  $T_1 > T_0$  (configuration similaire à la section précédente). On suppose qu'il n'y a pas de frottement ni d'échange thermique à travers la paroi du ballon. La grandeur  $v_{B,H}$  est représentative de la vitesse atteinte par le ballon une fois qu'il a parcouru une distance verticale  $H$ .



Pour retrouver son expression, on exprime la composante verticale de l'équation de quantité de mouvement pour le volume de fluide contenu dans le ballon :

$$V \cdot \rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} = (\vec{F}_p + \vec{F}_a) \cdot \vec{e}_z = V \cdot \rho_0 g \beta \Delta T \quad \rightarrow \quad v(t) = \int_0^t g \beta \Delta T dt' = g \beta \Delta T \cdot t$$

On intègre la vitesse pour connaître la position de la particule de fluide en fonction du temps :

$$z(t) = \int_0^t v(t') dt' = \int_0^t g \beta \Delta T t' dt' = g \beta \Delta T \left[ \frac{t^2}{2} \right]_0^t = \frac{g \beta \Delta T t^2}{2}$$

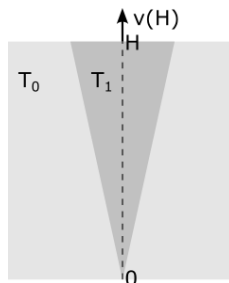
La hauteur H est atteinte au moment  $t_H$  :

$$H = z(t_H) = \frac{g \beta \Delta T t_H^2}{2} \quad \rightarrow \quad t_H = \sqrt{\frac{2H}{g \beta \Delta T}}$$

La vitesse obtenue au temps  $t_H$  vaut :

$$v(t_H) = g \beta \Delta T \cdot t_H = \sqrt{2 g \beta \Delta T H} = \sqrt{2} \cdot v_{B,H} \quad \text{avec} \quad v_{B,H} = \sqrt{g \beta \Delta T H}$$

**Remarque :** L'écoulement du ballon peut être assimilé à l'écoulement d'un panache de température  $T_1$  dans un volume de fluide à la température  $T_0$ .



### II.3.d. Force volumique

La force volumique de gravité sur un fluide vaut  $\vec{f}_g = \rho \vec{g}$ . La composante selon l'axe vertical (+z) de cette force vaut :

$$f_{gz} = -\rho g = -\rho_0 g + \rho_0 \beta (T - T_0)$$

Cette force se décompose en une composante fixe  $f_{gz0} = -\rho_0 g$  responsable de la pression hydrostatique, et une composante dépendant de la variation de température  $f_{gzT} = \rho_0 \beta (T - T_0)$ , qui est responsable du mouvement des fluides chauds vers le haut.

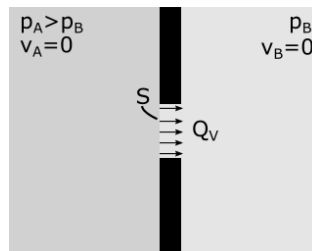
On introduit parfois la notion de gravité réduite  $g'$ . Cette gravité représente la variation de gravité équivalente à la variation de densité du fluide avec la température. Ce qui donne :

$$f_{gzT} = \rho_0 g' \quad \text{avec} \quad g' = g \frac{(\rho_0 - \rho)}{\rho_0} = g \beta (T - T_0)$$

## II.4. Equation de l'orifice

### II.4.a. Description de la configuration

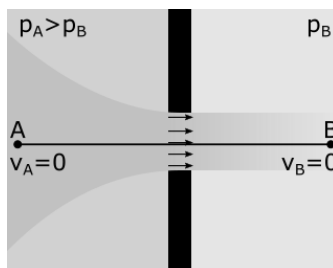
On considère deux cavités A et B, séparées par une paroi qui comporte une ouverture de surface  $S$ . Cette ouverture peut être un défaut de perméabilité du mur, un espace situé en-dessous d'une porte, une bouche qui permet de laisser passer un passage de l'air entre les deux cavités, une fenêtre, etc.



La différence de pression entre les deux cavités  $\Delta p = p_A - p_B$  entraîne un écoulement au travers de l'ouverture. Le débit volumique de cet écoulement est noté  $Q_V$ . L'équation qui relie le débit  $Q_V$  à la différence de pression  $\Delta p$  est appelée l'équation de l'orifice.

### II.4.b. Considérations théoriques

L'hypothèse forte derrière l'équation de l'orifice est que, dans les deux cavités A et B, le fluide (l'air) est au repos. Il n'y a pas de mouvement privilégié au sein des cavités. Si on place deux points A et B suffisamment éloignés de l'ouverture, leur vitesse est nulle  $v_A = v_B = 0$ .

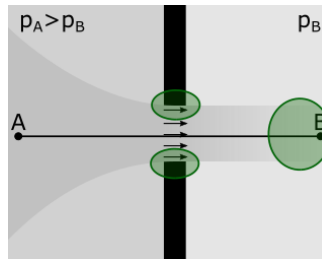


On considère que les deux points sont à la même hauteur,  $z_A = z_B$ . On ne peut pas appliquer l'équation de Bernoulli en considérant l'écoulement parfait entre A et B car sinon, on aurait :



$$p_A + \rho g z_A + \frac{1}{2} \rho v_A^2 = p_B + \rho g z_B + \frac{1}{2} \rho v_B^2 \rightarrow p_A = p_B \rightarrow \text{FAUX !}$$

Il y a donc de la dissipation de l'énergie entre le point A et le point B : l'écoulement est rendu instable, il génère des structures turbulentes, l'énergie des structures de plus grande taille se transfère vers des structures plus petites tailles, les structures plus petites dissipent l'énergie cinétique sous forme de chaleur.



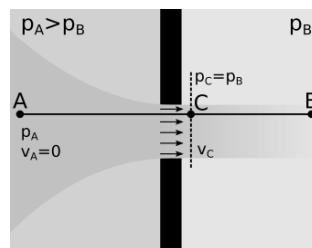
La dissipation turbulente se concentre en deux endroits identifiés par des ellipses vertes sur le schéma ci-dessus. Le premier lieu de dissipation est le bord d'attaque de l'ouverture, qui génère de la turbulence dans l'écoulement, et cette turbulence se dissipe en chaleur. Plus le bord d'attaque est saillant, plus il y a de dissipation. Dans la cavité B, l'écoulement a la forme d'un jet. Le second lieu de dissipation est la dilution du jet dans la cavité B.

## II.4.c. Obtention de l'équation de l'orifice

### II.4.c.a Méthode 1 : découpage de l'écoulement

#### Découpage de l'écoulement

On introduit le point C qui se situe juste à la sortie de l'orifice.



Cette méthode consiste, dans un premier temps, à considérer que l'écoulement est parfait entre les points A et C :

$$p_A + \rho g z_A + \frac{1}{2} \rho v_A^2 = p_C + \rho g z_C + \frac{1}{2} \rho v_C^2 \rightarrow p_A = p_C + \frac{1}{2} \rho v_C^2$$

Ensuite, on applique **l'hypothèse du grand volume** : lorsqu'un jet s'écoule dans un grand volume, la pression sur la section transversale du jet est constante et vaut la pression dans le grand volume :

$$p_C = p_B$$

On en déduit la vitesse de l'air au point C :

$$p_A = p_B + \frac{1}{2} \rho v_C^2 \rightarrow v_C = \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}}$$

On en déduit une première estimation du débit volumique :

$$Q_V = S \cdot v_C = S \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}}$$

**Remarque :** dans (Ghiaus et Allard 2005), le passage au travers d'un orifice est analysé comme une perte de pression d'amplitude  $1/2 \rho v^2$ . Ce point de vue permet de suivre l'évolution de la pression statique au travers du bâtiment

#### Dissipations sur le bord d'attaque de l'orifice : coefficient de décharge

Pour prendre en compte les dissipations qui ont lieu sur le bord d'attaque de l'orifice, on introduit un coefficient d'atténuation à l'équation du débit :

$$Q_V = c_D \cdot S \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

Avec :

- $c_D$  : coefficient de décharge [-] (*discharge coefficient*)

Le coefficient de décharge est nécessairement inférieur ou égal à 1. Des mesures empiriques ont montré que  $c_D \approx 1$  pour des ouvertures profilées, et que  $c_D \approx 0.6$  pour des ouvertures saillantes de type fenêtres.

Les **ouvertures profilées** limitent la génération de structures turbulentes au niveau des bords d'attaque de l'ouverture, mais n'empêchent pas la dissipation visqueuse dans le volume de réception du jet. Pour ce type d'ouvertures, le fait d'avoir  $c_D \approx 1$  semble valider les hypothèses du calcul précédent : pas de dissipation entre A et C, et validation de l'hypothèse des grands volumes.

La réduction du coefficient de décharge pour des **ouvertures saillantes** pourrait être interprétée comme étant le résultat des structures turbulentes qui sont générées au niveau des bords d'attaque des ouvertures. Ces structures turbulentes occasionneraient des pertes de charge entre les bords du jet et le volume de réception. Ces pertes de charges invalideraient, en quelque sorte, l'hypothèse des grands volumes.

Une revue des coefficients de décharge est fournie par (Karava et al. 2004).

#### Section efficace de passage

En regroupant le produit de la section de passage de l'ouverture et du coefficient de décharge, on obtient une grandeur appelée section efficace de passage :

$$S^* = c_D \cdot S$$

L'équation donnant le débit volumique au travers de l'ouverture s'écrit maintenant comme le simple produit de la section efficace de passage et d'une vitesse basée sur la différence de pression :

$$Q_V = \underbrace{S^*}_{c_D \cdot S} \cdot \underbrace{v}_{\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}}$$

#### II.4.c.b Méthode 2 : Bernoulli généralisée

L'autre méthode permettant d'obtenir l'équation de l'orifice est d'utiliser le théorème de Bernoulli généralisé entre les points A et B :

$$P_B = P_A - \Delta J_{A \rightarrow B} \quad \rightarrow \quad p_B = p_A - \Delta J_{A \rightarrow B}$$

Les pertes de charges entre A et B sont calculées à partir de la vitesse au point C :

$$\Delta J_{A \rightarrow B} = \zeta_{pl} \cdot \frac{1}{2} \rho v_C^2$$

On obtient :

$$p_B = p_A - \zeta_{pl} \cdot \frac{1}{2} \rho v_C^2 \quad \rightarrow \quad v_C = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho \zeta_{pl}}}$$

En multipliant par la section de passage, on obtient :

$$Q_V = \frac{S}{\sqrt{\zeta_{pl}}} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = \frac{S^*}{\sqrt{\zeta_{pl}}} \cdot \underbrace{v_C}_{\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}}$$

#### II.4.c.c Relation entre les coefficients de décharge et de perte de charge

On a directement :

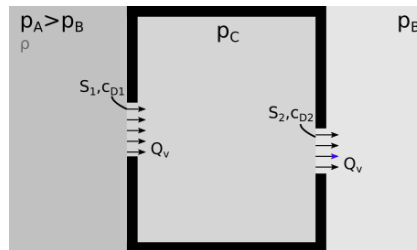
$$c_D = \frac{1}{\sqrt{\zeta_{pl}}} \quad \text{ou} \quad \zeta_{pl} = \frac{1}{c_D^2}$$

Comme  $c_D \in [0; 1]$ , on a  $\zeta_{pl} \in [1; \infty]$

**Remarque :** C'est à ce point du raisonnement que vient une contradiction conceptuelle. Une valeur  $c_D \rightarrow 0$  entraîne  $\zeta_{pl} \rightarrow \infty$ . Ce cas ne défie pas le sens physique : les pertes de charge à l'ouvertures sont tellement élevées que l'écoulement ne peut plus s'établir. Par contre,  $c_D \rightarrow 1$  entraîne  $\zeta_{pl} \rightarrow 1$ . Ce cas est surprenant car, à priori, rien ne justifie dans le raisonnement précédent le fait que la valeur du coefficient de perte de charge ait une valeur minimale égale à  $\zeta_{pl} = 1$ .

#### II.4.d. Ecoulement au travers de plusieurs ouvertures placées en série

On considère maintenant la configuration ci-dessous. Deux cavités A et B sont séparées par une troisième cavité C. Un écoulement se crée au travers du système. Cet écoulement passe au travers des orifices 1 et 2. Son débit est constant et vaut  $Q_V$ .



L'hypothèse la plus importante qui doit être posée pour réaliser le calcul du débit de fluide dans le système est la suivante : on suppose que le jet en sortie de l'orifice 1 est entièrement dissipé dans la cavité C. Cette hypothèse permet d'appliquer l'équation de l'orifice pour les deux ouvertures.

On note  $S_1^* = S_1 \cdot c_{D1}$  et  $S_2^* = S_2 \cdot c_{D2}$  les sections efficaces de passage des ouvertures 1 et 2. Le débit volumique  $Q_V$  est identique dans les deux ouvertures :

$$Q_V = S_1^* \cdot \sqrt{\frac{2(p_A - p_C)}{\rho}} = S_2^* \cdot \sqrt{\frac{2(p_C - p_B)}{\rho}} \quad \rightarrow \quad Q_V^2 = S_1^{*2} \cdot \frac{2(p_A - p_C)}{\rho} = S_2^{*2} \cdot \frac{2(p_C - p_B)}{\rho}$$

$$S_1^{*2} \cdot (p_A - p_C) = S_2^{*2} \cdot (p_C - p_B) \quad \rightarrow \quad p_C = \frac{S_1^{*2} \cdot p_A + S_2^{*2} \cdot p_B}{S_1^{*2} + S_2^{*2}}$$

En introduisant cette expression dans l'équation de l'orifice pour l'une des deux ouvertures, on obtient :

$$Q_V = \left[ \frac{1}{S_1^{*2}} + \frac{1}{S_2^{*2}} \right]^{-0.5} \cdot \sqrt{\frac{2(p_A - p_B)}{\rho}} = S_{1+2}^* \cdot v$$

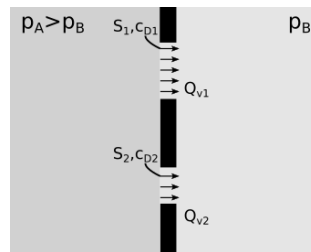
On retrouve une équation qui a la forme du produit d'une section efficace de passage et d'une vitesse basée sur la différence de pression aux extrémités du système. La section efficace équivalente de passage est obtenue par l'équation :

$$\frac{1}{S_{1+2}^{*2}} = \left[ \frac{1}{S_1^{*2}} + \frac{1}{S_2^{*2}} \right]$$

**Remarque :** Dans l'équation ci-dessus si  $S_1^{*2} \ll S_2^{*2}$ , on obtient  $S_{1+2}^{*2} \approx S_1^{*2}$ . La section efficace équivalente est fortement limitée par la plus petite des sections efficaces en série.

#### II.4.e. Ecoulement au travers de plusieurs ouvertures placées en parallèle

On considère maintenant la configuration ci-dessous. Deux cavités A et B sont séparées par une paroi contenant 2 ouvertures. Un écoulement se crée au travers du système. Cet écoulement passe au travers des orifices 1 et 2. Son débit est constant et vaut  $Q_V$ .



On note  $S_1^* = S_1 \cdot c_{D1}$  et  $S_2^* = S_2 \cdot c_{D2}$  les sections efficaces de passage des ouvertures 1 et 2. Les débits volumiques au travers des deux ouvertures valent :

$$Q_{V1} = S_1^* \cdot \sqrt{\frac{2(p_A - p_B)}{\rho}}$$

$$Q_{V2} = S_2^* \cdot \sqrt{\frac{2(p_A - p_B)}{\rho}}$$

Le débit volumique total vaut :

$$Q_V = Q_{V1} + Q_{V2} = (S_1^* + S_2^*) \cdot \sqrt{\frac{2(p_A - p_B)}{\rho}}$$

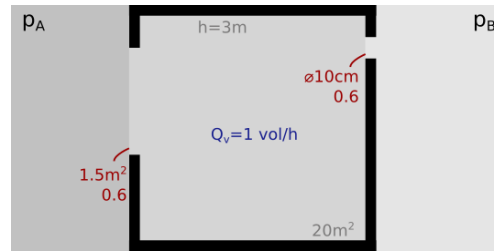
La section efficace de passage équivalente vaut alors :

$$S_{1+2}^* = S_1^* + S_2^*$$

#### II.4.f. Exemple – Ordre de grandeur

Cet exemple permet de fixer des ordres de grandeurs du différentiel de pression nécessaire pour obtenir un écoulement de ventilation naturel suffisant dans un local.

Soit un local de volume  $60m^3$  (surface au sol  $20m^2$ , hauteur  $3m$ ), séparé du milieu extérieur par deux ouvertures : une fenêtre de  $1.5m^2$  d'un côté et un orifice de diamètre  $10cm$  de l'autre. Quel doit être le différentiel de pression  $\Delta p = p_A - p_B$  pour obtenir un renouvellement d'air  $ach = 1 Vol/h$ ?



Débit volumique cible :

$$Q_V = 60 \times \frac{1}{3600} = 0.0167 \text{ m}^3/\text{s} (= 60 \text{ m}^3/\text{h})$$

Section de passage efficace équivalente :

$$S_1^* = 0.00471 \text{ m}^2, \quad S_2^* = 0.9 \text{ m}^2 \rightarrow S_{1+2}^* = 0.00471 \text{ m}^2$$

On retrouve bien  $S_{1+2}^* \approx S_1^*$ , la section efficace équivalente est limitée par la plus petite section équivalente. On inverse l'équation de débit pour obtenir la différence de pression :

$$Q_V = S_{1+2}^* \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \rightarrow \Delta p = \frac{1}{2} \rho \left( \frac{Q_V}{S_{1+2}^*} \right)^2 = 7.5 \text{ Pa}$$

En pratique, (Ghiaus et Allard 2005) retiennent une valeur de 10 Pa pour assurer un débit suffisant de ventilation naturelle.

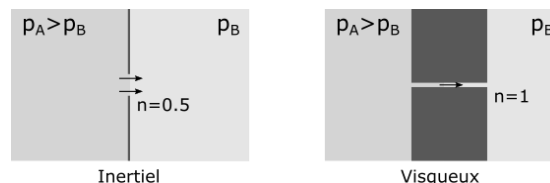
#### II.4.g. Equation générale de l'orifice

Voici la formule générale qui régit l'évolution du débit volumique  $Q_V$  au travers d'une ouverture qui sépare deux ambiances dont la différence de pression est égale à  $\Delta p$  :

$$Q_V = K \cdot \Delta p^n$$

D'après le développement réalisé dans les sections précédentes, on devrait avoir  $K = c_D \cdot S \cdot \sqrt{2/\rho}$  et  $n = 0.5$ . C'est vrai dans le cas d'un **écoulement purement inertiel**, pour lequel l'ouverture agirait comme un diaphragme d'épaisseur quasi-nul.

Or on peut rencontrer un autre type d'écoulement dans une ouverture : **l'écoulement purement visqueux**. C'est typiquement l'écoulement qui se produirait dans une fissure. L'espace de la fissure agirait alors comme une conduite, l'écoulement serait semblable à un écoulement de Poiseuille pour lequel  $n = 1$ .



Dans la réalité, particulièrement si on doit prendre une multitude d'ouvertures en parallèle, on observe souvent une valeur de  $n$  située entre 0.5 et 1. Les valeurs de  $K$  et de  $n$  peuvent s'obtenir expérimentalement, soit lors d'un test d'infiltrométrie (perméabilité de la façade), soit lors de tests normés pour les bouches de ventilation (ancienne norme NF E 51-700).

### III. Mécanismes de la ventilation naturelle

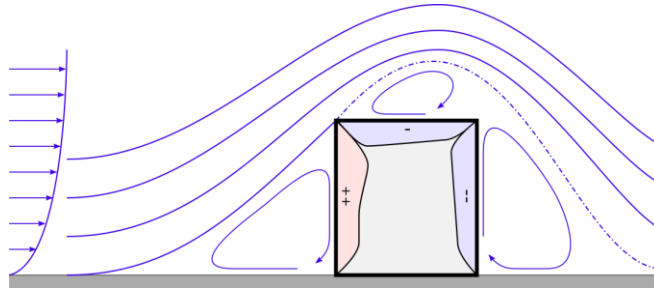
Dans cette section, nous allons nous intéresser à l'application des équations définies précédemment à des configurations de ventilation naturelle très simplifiées. La simplicité des cas présentés ici tient du fait que les bâtiments ventilés seront exclusivement des volumes non partitionnés (pièces uniques).

On distingue 4 configurations de ventilation naturelle, selon :

- La nature de la force motrice de l'écoulement : le vent (ventilation due au vent) ou les effets thermique (tirage thermique)
- Le nombre d'ouvertures : 1 ouverture (mono-orienté) ou plusieurs ouvertures (traversant).

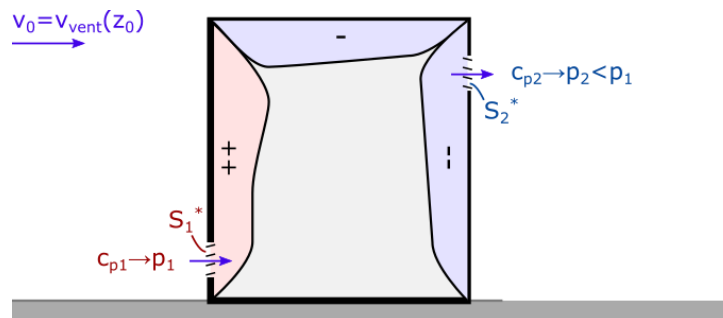
#### III.1. Ventilation transversante due au vent

Dans cette configuration, le vent exerce une pression inhomogène entre les différentes parois du bâtiment. En plaçant des ouvertures sur deux parois, on profite du différentiel de pression exercé par le vent pour mettre en mouvement un écoulement.



##### III.1.a. Calcul du débit de ventilation

Soit la configuration ci-dessous :



Les pressions exercées par le vent sur les parois sont calculées partir des coefficients de pression  $c_{p1}$  et  $c_{p2}$  :

$$\begin{cases} p_1 = p_0 + c_{p1} \cdot \frac{1}{2} \rho v_0^2 \\ p_2 = p_0 + c_{p2} \cdot \frac{1}{2} \rho v_0^2 \end{cases}$$

La différence de pression entre les deux ouvertures (hors effets thermiques) vaut :

$$\Delta p = p_1 - p_2 = c_{p1} \cdot \frac{1}{2} \rho v_0^2 - c_{p2} \cdot \frac{1}{2} \rho v_0^2 = (c_{p1} - c_{p2}) \cdot \frac{1}{2} \rho v_0^2$$

On est en présence d'une configuration comprenant deux ouvertures en série, soumis à une différence de pression  $\Delta p$ . Cette configuration a été vue en prérequis. Dans ce cas,  $Q_v = S^* \cdot v$  avec :

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = \sqrt{c_{p1} - c_{p2}} \cdot v_0$$

$$\frac{1}{S^{*2}} = \left[ \frac{1}{S_1^{*2}} + \frac{1}{S_2^{*2}} \right]$$

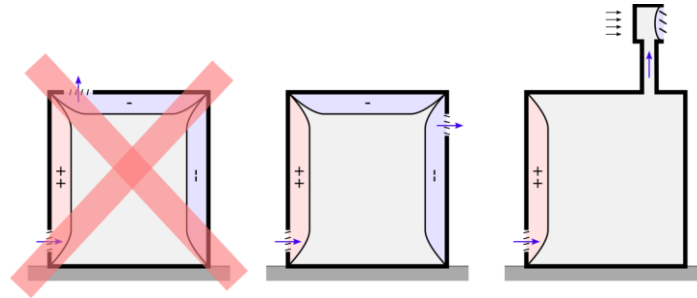
Le débit de ventilation dans la cavité a la forme suivante :

$$Q_v = S^* \cdot v = \left[ \frac{1}{S_1^{*2}} + \frac{1}{S_2^{*2}} \right]^{-0.5} \cdot \sqrt{c_{p1} - c_{p2}} \cdot v_0$$

On notera que le débit de ventilation est **proportionnel à la vitesse du vent**.

### III.1.b. Considérations pratiques

Pour assurer un débit de ventilation stable et maximal, il faut s'assurer que les ouvertures soient situées dans des zones où il y a peu de fluctuation du vent, et l'écoulement du vent est peu obstrué par les obstacles aux alentours.



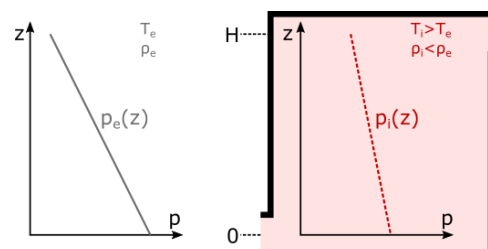
Ainsi, dans l'image ci-dessus, la première configuration ne sera pas favorable pour la ventilation naturelle car la bouche de sortie se situe proche du bord d'attaque du toit du bâtiment, c'est-à-dire à l'endroit où les fluctuations sont maximales. La troisième configuration sera préférée, car elle dispose d'un système de tour à vent qui cherche à créer une dépression en hauteur, là où le vent est le moins obstrué par les bâtiments environnants.

## III.2. Tirage thermique, configuration traversante

La plupart des développements théoriques exposés ci-dessous sont issus de l'ouvrage (Chenvidyakarn 2013).

### III.2.a. Description de la configuration étudiée

Pour le tirage thermique, une configuration traversante est une configuration pour laquelle il existe deux ouvertures donnant sur l'extérieur à des hauteurs nettement différentes :



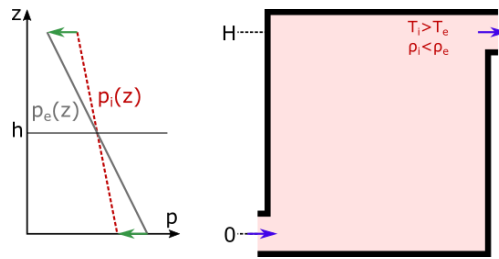
On suppose que l'air dans la cavité est plus chaud ( $T_i$ ) qu'à l'extérieur ( $T_e$ ). L'air extérieur est donc plus lourd :

$$\begin{cases} \rho_e = \rho_0 \cdot [1 - \beta(T_e - T_0)] \\ \rho_i = \rho_0 \cdot [1 - \beta(T_i - T_0)] \end{cases} \quad \text{donc} \quad \rho_e - \rho_i = \rho_0 \beta(T_i - T_e) > 0$$

L'équation de l'hydrostatique donne :

$$\begin{cases} p_i(0) - p_i(H) = \rho_i g H \\ p_e(0) - p_e(H) = \rho_e g H \end{cases}$$

Les gradients de pression verticaux sont plus élevés dans le milieu extérieur. Si on trace ces gradients de pression sur un seul graphique, on obtient le graphique suivant :



Le profil de pression à l'intérieur du local s'ajuste de telle sorte qu'il existe une hauteur  $z = h$  à laquelle les pressions à l'intérieur et à l'extérieur du local sont identiques :  $p_e(h) = p_i(h)$ . Ce niveau est appelé le « neutral level ».

### III.2.b. Calcul du débit de ventilation

La différence de pression totale aux bornes des deux bouches  $\Delta p_{tot}$  est la somme de la différence de pression à la hauteur  $H$  et à la hauteur  $0$  :

$$\Delta p_{tot} = \Delta p(0) + \Delta p(H) = [p_e(0) - p_i(0)] + [p_i(H) - p_e(H)] = (\rho_e - \rho_i) \cdot gH = \rho_0 g \beta (T_i - T_e) H$$

Le système se comporte comme un système composé de deux bouches arrangées en série et soumises à une différence de pression  $\Delta p_{tot}$ . Le débit de ventilation dans la cavité a la forme :

$$Q_v = S^* \cdot v$$

Avec :

- $v = \sqrt{\frac{2\Delta p_{tot}}{\rho_0}} = \sqrt{2g\beta(T_i - T_e)H} = \sqrt{2} \cdot v_{B,H}$
- $\frac{1}{S^{*2}} = \left[ \frac{1}{S_1^{*2}} + \frac{1}{S_2^{*2}} \right]$

On retrouve dans cette expression la vitesse de flottabilité  $v_{B,H}$  définie dans les prérequis. Le débit de renouvellement d'air est ici proportionnel à la racine carrée de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur, et à la racine carrée de la distance verticale entre les deux ouvertures.

### III.2.c. Effet de la section des bouches sur la position du niveau neutre

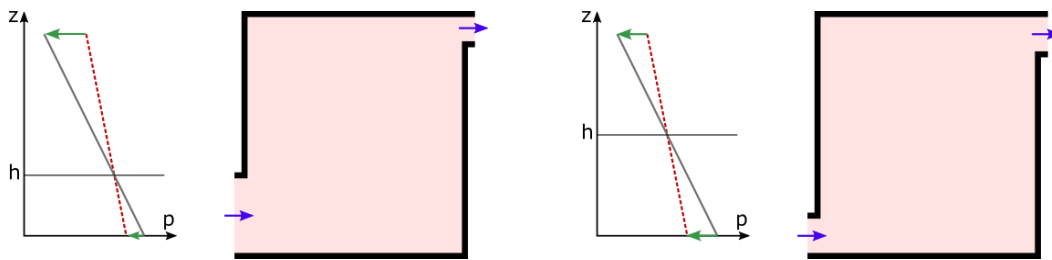
La conservation du débit impose l'équation suivante :

$$\sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot Q_v = S_H^* \cdot \sqrt{\Delta p(H)} = S_0^* \cdot \sqrt{\Delta p(0)}$$

Dans la configuration schématisée dans la section précédente, on avait  $S_0^* = S_H^*$ , donc  $\Delta p(0) = \Delta p(H)$ . Le niveau neutre était situé au centre de la pièce.



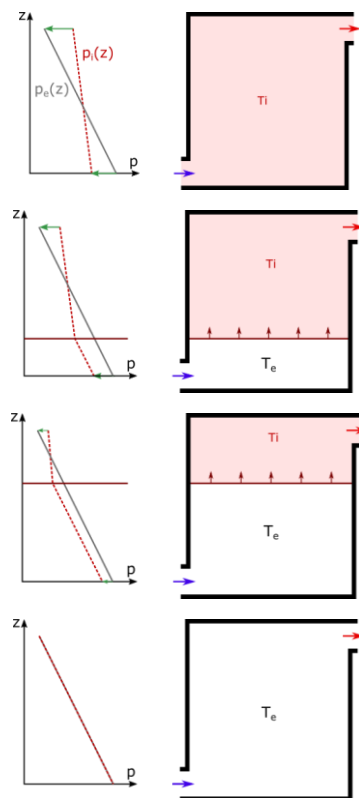
Dans l'image ci-dessous à gauche, on a  $S_0^* \gg S_H^*$ . Pour assurer la conservation du débit, on doit avoir  $\Delta p(0) \ll \Delta p(H)$ . Le niveau neutre est déplacé vers le bas. Dans l'image à droite, on a  $S_0^* \ll S_H^*$ , ce qui implique  $\Delta p(0) \gg \Delta p(H)$ . Le niveau neutre est déplacé vers le haut.



**Remarque :** ces considérations ne sont valables que si les températures à l'intérieur et à l'extérieur du local sont relativement homogènes, assurant des variations linéaires de pression entre 0 et H.

### III.2.d. Comportement dynamique, ventilation par déplacement

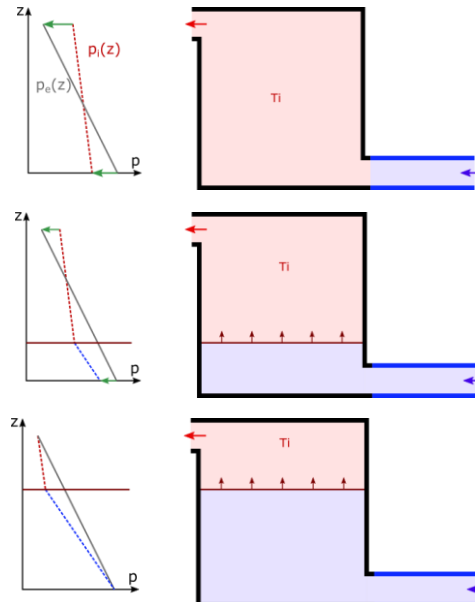
Dans la configuration présentée ci-dessus, de l'air à la température extérieure  $T_e$  entre par le dessous du local. Cet air froid occupe un volume qui croît progressivement. Il existe une interface assez nette entre l'air froid et l'air chaud qui n'a pas encore été évacué. C'est de la ventilation par déplacement.



La croissance du volume occupé par l'air froid entraîne une diminution du débit de ventilation. En effet, comme on le voit sur la figure ci-dessus, c'est la portion occupée par l'air chaud qui est responsable du différentiel de pression cumulé  $\Delta p_{tot}$  au niveau des deux bouches. Comme cette portion d'air chaud diminue, le différentiel de pression diminue aussi.

### III.2.e. Comportement dynamique, puits canadien

Lorsque le bâtiment est équipé d'un puits canadien, ce dernier refroidit l'air qui rentre dans le local à une température  $T_{pc}$  inférieure à la température extérieure. L'air entrant est donc plus lourd que l'air extérieur.

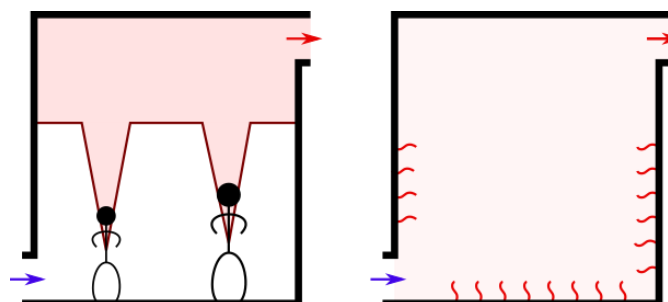


Le renouvellement de l'air de la pièce se fait toujours par déplacement. Mais contrairement à la configuration précédente, le débit décroît plus rapidement, jusqu'à ce qu'il existe un équilibre entre la portion d'air chaud (en haut du local) et d'air froid (en bas). Lorsque cet équilibre est atteint, la différence de pression cumulée sur les deux bouches est nulle.

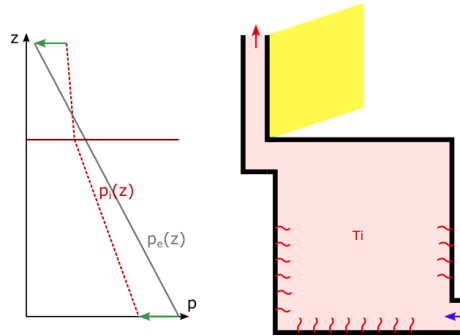
En réalité, la frontière entre l'air froid et l'air chaud ne stoppe pas sa progression à la hauteur d'équilibre, mais oscille autour de cet état d'équilibre avant de se stabiliser.

### III.2.f. Maintenir un débit de ventilation en tirage thermique

Pour maintenir le différentiel cumulé de pression assurant la ventilation dans le local, il faut qu'il y ait une source de chaleur qui réchauffe l'air durant son trajet dans le bâtiment. La source de chaleur peut provenir de la structure du bâtiment (figure en dessous à droite), dans ce cas la température dans le volume reste homogène. La source de chaleur peut provenir des usagers, dans ce cas la source est plus ponctuelle. Des sillages verticaux se forment au-dessus des usagers pour alimenter le volume d'air chaud qui reste piégé dans un volume limité au-dessus du local.



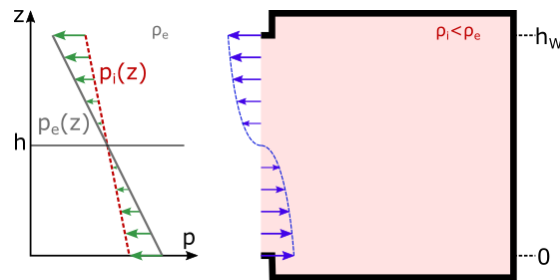
Un autre moyen de maintenir le débit de ventilation est d'utiliser une cheminée solaire. L'air passe derrière un collecteur solaire vertical (ou incliné) situé en toiture.



### III.3. Tirage thermique, configuration mono-orienté

#### III.3.a. Description de la configuration étudiée

Dans cette section, on considère que la ventilation se fait au travers d'une seule ouverture. Cette ouverture a une hauteur  $h_w$  et une largeur  $W$ . L'air entre et sort du local en passant par la même ouverture.



Comme dans le cas précédent, l'air à l'intérieur de la pièce est plus chaud (donc plus léger) que l'air à l'extérieur de la pièce :

$$\rho_e - \rho_i = \rho_0 \beta (T_i - T_e) > 0$$

Il existe toujours un « neutral level » à la hauteur  $z = h$ , et où  $p_e(h) = p_i(h) = p_{nl}$ . Les profils de pression intérieure et extérieure suivent les équations suivantes :

$$\begin{cases} p_e(z) = p_{nl} - \rho_e g(z - h) \\ p_i(z) = p_{nl} - \rho_i g(z - h) \end{cases} \text{ pour } z \in [0; h_w]$$

#### III.3.b. Estimation du débit

Pour estimer le débit de ventilation, on exprime les débits volumiques sur la zone supérieure et sur la zone inférieure au neutral level en fonction de  $h$ , puis on trouve  $h$  en exprimant l'égalité des débits.

##### III.3.b.a Zone supérieure

Dans la zone située au-dessus du neutral level, la pression interne est supérieure à la pression externe. La différence de pression locale vaut :

$$\Delta p(z) = p_i(z) - p_e(z) = (\rho_e - \rho_i) \cdot (z - h) \quad \text{pour } z \in [h; h_w]$$

On en déduit une vitesse locale idéale  $v(z)$ . C'est la vitesse qu'on obtiendrait en un point B à l'extérieur du local (pression  $p_e(z)$ ), en partant d'un point A à vitesse nulle dans le local (pression  $p_i(z)$ ) sans qu'il y ait de frottement entre A et B. Pour cela, on applique l'équation de Bernoulli :

$$p_i(z) = p_e(z) + \frac{1}{2}\rho v^2 \quad \text{donc} \quad v(z) = \sqrt{\frac{2\Delta p(z)}{\rho_0}} = \sqrt{2\frac{\rho_e - \rho_i}{\rho_0}} \sqrt{z - h}$$

On intègre cette vitesse locale sur toute la surface de la zone supérieure :

$$Q^+(h) = W \cdot \int_h^{h_w} v(z) dz = W \cdot \sqrt{2\frac{\rho_e - \rho_i}{\rho_0}} \cdot \int_h^{h_w} \sqrt{z - h} dz$$

Pour résoudre l'intégrale, on effectue le changement de variable  $z' = z - h$  :

$$dz = dz' \quad z = h \rightarrow z' = 0 \quad z = h_w \rightarrow z' = h_w - h$$

Cela donne :

$$\int_h^{h_w} \sqrt{z - h} dz = \int_0^{h_w - h} \sqrt{z'} dz' = \left[ \frac{2}{3} z'^{3/2} \right]_0^{h_w - h} = \frac{2}{3} (h_w - h)^{3/2}$$

Le débit dans la zone supérieure vaut :

$$Q^+(h) = W \cdot \sqrt{2\frac{\rho_e - \rho_i}{\rho_0}} \cdot \frac{2}{3} (h_w - h)^{3/2}$$

#### a) Zone inférieure

Avec un raisonnement similaire, on obtient dans la zone inférieure :

$$Q^-(h) = W \cdot \sqrt{2\frac{\rho_e - \rho_i}{\rho_0}} \cdot \frac{2}{3} (h)^{3/2}$$

### III.3.b.b Conservation du débit

On exprime l'égalité entre le débit sortant et le débit entrant :

$$Q^+(h) = Q^-(h) \quad \rightarrow \quad (h_w - h)^{3/2} = (h)^{3/2} \quad \rightarrow \quad h = \frac{h_w}{2}$$

Le débit volumique (sans frottement) vaut :

$$Q_V = Q^-\left(\frac{h_w}{2}\right) = W \cdot \sqrt{2\frac{\rho_e - \rho_i}{\rho_0}} \cdot \frac{2}{3} \left(\frac{h_w}{2}\right)^{3/2} = \frac{W \cdot h_w}{3} \sqrt{\frac{\rho_e - \rho_i}{\rho_0}} \cdot h_w$$

$$Q_V = \frac{S}{3} \cdot \sqrt{g\beta(T_i - T_e)h_w} = \frac{S}{3} \cdot v_{B,h_w}$$

On retrouve une formule ayant la forme du produit d'une surface  $S/3$  et d'une vitesse égale à la vitesse de flottabilité  $v_{B,h_w}$  vue en prérequis.

### III.3.b.c Prise en compte des dissipations

Pour prendre en compte le ralentissement de l'écoulement dû aux dissipations visqueuses, on procède d'une manière similaire à l'équation de l'orifice. On introduit un coefficient de décharge  $c_D$ , on définit la section efficace de passage  $S^*$  comme étant le produit  $c_D \times S$ . On obtient :

$$Q_V = c_D \cdot S \cdot v_{B,h_w} = S^* \cdot v_{B,h_w}$$

On aura ici nécessairement  $c_D < 1/3$ .

### III.3.b.d Remarques

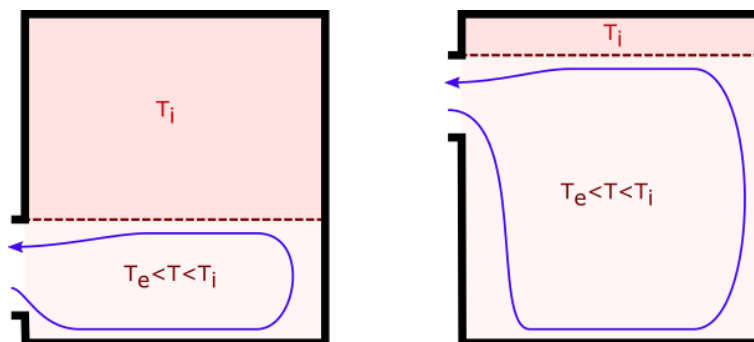
La hauteur du neutral level trouvée ici en exprimant l'égalité des débits volumiques est égale à la moitié de la hauteur de la fenêtre. Si on avait exprimé l'égalité des débits massiques en considérant que l'air entre avec une densité  $\rho_e$  et sort avec une densité  $\rho_i$ , on aurait trouvé une valeur

légèrement différente (Allard et al. 1992). Aussi, cette hauteur est modifiée lorsqu'on considère un mix entre ventilation traversante du au vent et tirage thermique mono-orienté.

### III.3.c. Considérations pratiques en conception / Simulation

Le débit de ventilation est ici **proportionnel à la racine carrée de la hauteur de l'ouverture**  $h_w$ . Ainsi, pour une surface d'ouverture donnée, on maximisera le débit de ventilation si la forme de l'ouverture est plutôt allongée verticalement que si elle est allongée horizontalement. La dépendance du débit à la hauteur explique pourquoi, dans les modèles « grandes ouvertures » des AFN, il soit demandé de spécifier la hauteur des ouvrants.

Aussi, lorsque l'**air frais** entre dans un local chaud, il va avoir **tendance à « tomber »** : il ne va s'écouler que dans la zone du local située en dessous du bord d'attaque supérieur de l'ouverture. Pour assurer une certaine homogénéité du balayage de la pièce par l'écoulement, il est alors conseillé de placer l'ouverture plutôt en haut des parois.

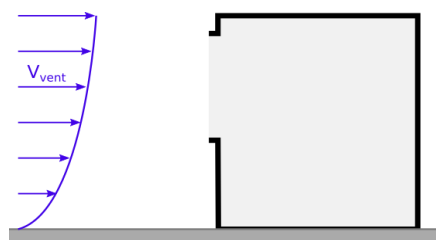


Les débits générés en tirage thermique mono-ouverture sont généralement assez élevés : la température de l'air à l'intérieur des locaux s'ajuste alors très rapidement avec la température extérieure. La rapidité du phénomène peut mener à des **instabilités numériques** s'il est prédit par un modèle qui couple AFN et STD avec un pas de temps long. Pour illustrer : si le débit généré permet un ajustement de la température intérieure en quelques minutes, une résolution avec un pas de temps d'une heure risquerait d'être incapable de capturer cette convergence.

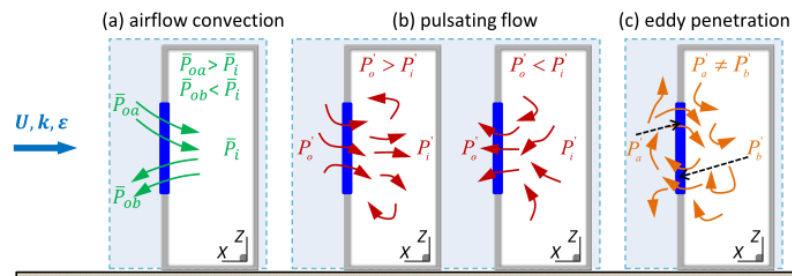
Nous n'avons ici couvert que le cas où la température était homogène dans les deux milieux qui séparent l'ouverture. Pour aller plus loin, il existe des modèles qui permettent de prendre en compte des **stratifications verticales de température** dans les deux milieux (Allard et al. 1992). Cette stratification peut mener à trois zones d'écoulement au travers de l'ouverture : deux zones dans un sens, et une zone dans l'autre.

Enfin, toujours pour aller plus loin, il existe des modèles analytiques qui permettent de décrire la manière dont l'écoulement externe se répand **spatialement** dans le local (Lafaye de Micheaux et al. 2015; Lu et al. 1997b, 1997a).

### III.4. Ventilation due au vent, mono-orientée



Cette configuration est de loin la configuration la plus complexe à aborder, car les mécanismes qui permettent à l'air de rentrer dans le local dépendent l'inhomogénéité locale du champ de vitesse ainsi que de son degré de fluctuation.



L'image ci-dessus représente trois mécanismes probables :

- Airflow convection : les hétérogénéités de l'écoulement moyen extérieur se couplent avec le volume intérieur de la pièce
- Pulsating flow : la pièce agit comme un système piston-ressort, de l'air entre et ressort alternativement
- Eddy Penetration : les tourbillons instables du milieu extérieur, dès lors qu'ils ont une taille caractéristique inférieure à la taille de l'ouverture, peuvent entrer dans la pièce, assurant ainsi un renouvellement d'air extérieur.

### III.4.a. Modèle de De Gids and Phaff

De Gids and Phaff ont développé une équation empirique à partir de données de mesure in-situ :

$$Q_V = \frac{1}{2} S v_{eff}$$

$$v_{eff} = \sqrt{c_1 v_{vent}^2 + c_2 H \cdot \Delta T + C_3}$$

Avec :

- $S$  : la surface de l'ouverture
- $v_{eff}$  : la vitesse effective
- $v_{vent}$  : vitesse du vent (locale ou à 10m?)
- $c_1 = 0.001, c_2 = 0.0035, c_3 = 0.01$  : des coefficients empiriques.

### III.4.b. Autres modèles

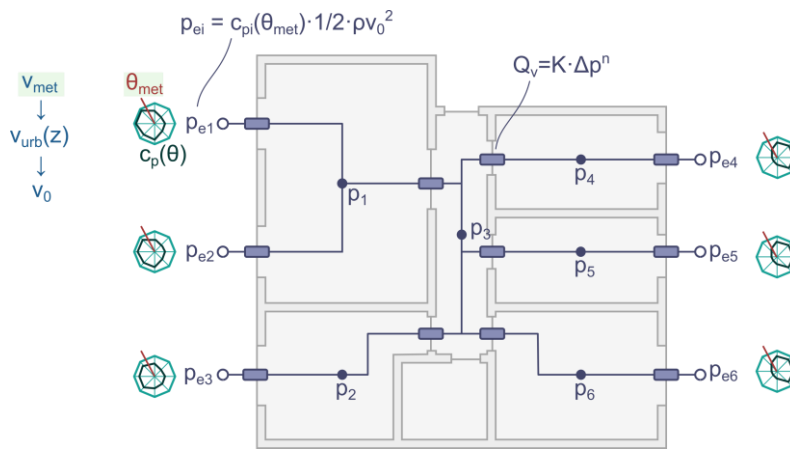
D'autres modèles sont décrits dans (Allard et al. 1992).

## IV. Les Airflow Networks (AFN)

Les Airflow Network sont les modèles nodaux dédiés à la prédiction des écoulements dans les bâtiments. Ces modèles peuvent être utilisés en mode « stand-alone », ou être couplés à des modèles de simulation thermique dynamique (STD). Ils mettent à profit la plupart des équations développées dans les chapitres précédents.

### IV.1.Principe de calcul – vent seul

LA structure d'un AFN peut être représentée par un réseau électrique équivalent : avec des nœuds de pressions  $p_i$  (tensions) aux centres des pièces, et des résistances au niveau des ouvertures. Le débit volumique  $Q_v$  (intensité) se conserve sur chaque chemin. Les conditions limites sont les pressions aux nœuds extérieurs  $p_{ei}$ .



#### Pressions sur les nœuds extérieurs

Chaque nœud extérieur est paramétré avec des valeurs de coefficient de pression en fonction de la direction du vent  $c_{pi}(\theta)$ .

Les données d'entrée du calcul sont direction  $\theta_{met}$  et la vitesse  $v_{met}$  du vent fournis par le fichier météo. La vitesse du vent est traitée de telle sorte à obtenir un profil de vitesse de vent  $v_{urb}(z)$  en milieu « urbain », c'est-à-dire au-dessus du bâtiment considéré. C'est sur ce profil qu'est sélectionnée la vitesse de référence  $v_0$ . L'emplacement exact de la sélection dépend de la manière dont ont été calculés les coefficients de pression (voir chapitre dédié).

Enfin, la pression sur un nœud extérieur est calculée avec la valeur du coefficient de pression du nœud à la direction du vent  $\theta_{met}$  :

$$p_{ei} = c_{pi}(\theta_{met}) \cdot \frac{1}{2} \rho v_0^2$$

#### Pressions dans les locaux, débits

Ici, chaque ouverture est paramétrée avec un coefficient  $K$  et un exposant  $n$  de l'équation de l'orifice généralisée  $Q_v = K \cdot \Delta p^n$ . Le développement ci-dessous a été élaboré en suivant la documentation technique de l'outil de simulation AFN CONTAM (Dols et polidoro 2015).

On construit un système d'équation en exprimant la conservation de la masse dans chaque local :

$$\frac{\partial m_i}{\partial t} = 0 = \sum_j Q_{m,j \rightarrow i}$$

Dans ces équation, les débits massiques sont exprimés selon l'équation générale suivante :

$$Q_{m,j \rightarrow i} = \begin{cases} \rho_j \cdot K \cdot (p_j - p_i)^n & \text{si } p_j > p_i \\ -\rho_i \cdot K \cdot (p_i - p_j)^n & \text{si } p_j < p_i \end{cases}$$

On obtient alors un système d'équation non linéaire, avec pour inconnu le vecteur formé par les valeurs de pression intérieur  $\vec{p}$ . Ce système d'équation prend la forme  $\vec{F}(\vec{p}) = \vec{0}$ . Il est possible de le résoudre en utilisant la méthode de Newton-Raphson. Pour cela, on estime itérativement des valeurs du vecteur  $\vec{p}$  en suivant la procédure suivante :

$$\vec{p}^* = \vec{p} - \vec{C}$$

$$[J] \cdot \vec{C} = \vec{F}(\vec{p})$$

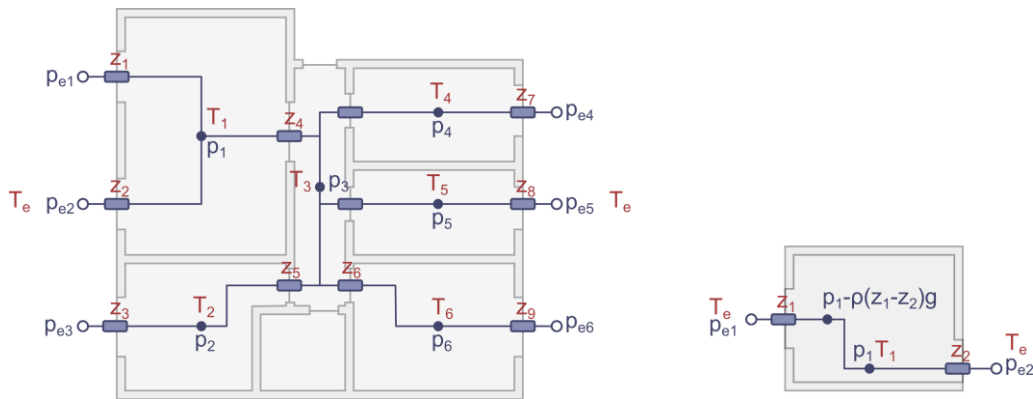
Avec :

- $\vec{p}^*, \vec{p}$  : nouvelle et ancienne estimation du vecteur  $\vec{p}$
- $\vec{C}$  : vecteur de correction
- $[J]$  : matrice Jacobienne définie par  $J_{ij} = \frac{\partial F_i(\vec{p})}{\partial p_j}$

On applique cette procédure jusqu'à obtenir la convergence des valeurs de pression. Les débits de ventilation sont ensuite obtenus en utilisant la formule du débit à partir des pressions prédites.

## IV.2. Ajout des effets thermiques

### Tirage thermique simple



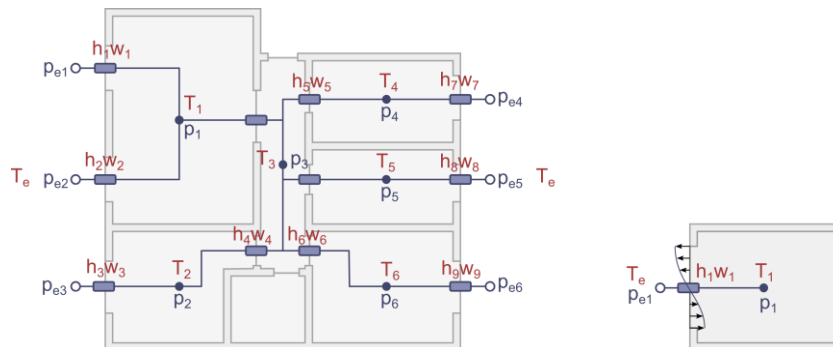
On ajoute maintenant aux équations précédentes le calcul du tirage thermique « simple » (dans le sens où la relation débit-pression s'exprime toujours selon une équation du type  $K \cdot \Delta p^n$ ). Pour réaliser ce calcul, il faut connaître les températures dans les locaux  $T_i$ . Un couplage avec un outil STD est alors nécessaire.

En plus des paramètres  $K$  et  $n$ , les ouvertures sont maintenant caractérisées par leur hauteur médiane  $z$ . Cela permet de calculer les variations de pression, dans les locaux et à l'extérieur, entre les différentes ouvertures. Ces variations de pression sont prises en compte dans le schéma de résolution précédent pour ajuster les débits avec les effets du tirage thermique.



### Modèle de « grandes ouvertures »

Dans la terminologie des AFN, les modèles de « grandes ouvertures » sont des modèles avec lesquels il est possible de simuler les écoulements bidirectionnels dus au tirage thermique dans des ouvertures.



Nous n'entrerons pas dans le détail de l'interaction entre les modèles de grandes ouvertures avec le calcul global de débits dus à l'effet du vent et du tirage thermique simple. Avec ce type de modèle, deux débits sont calculés par menuiserie : un débit par sens d'écoulement.

## IV.3. Les AFN

Ci-dessous une liste d'AFN existants

### CONTAM

C'est un outil gratuit développé par le NIST. Il a été développé spécifiquement pour évaluer les débits de concentration de polluants dans les bâtiments. Il peut être utilisé en mode « stand-alone », ou il peut être couplé aux logiciels de simulation thermique dynamique EnergyPlus ou TrnSys.

<https://www.nist.gov/services-resources/software/contam>

### LoopDA

C'est aussi un outil gratuit développé par le NIST.

<https://www.nist.gov/services-resources/software/loopda>

### CoolVent

C'est un outil gratuit développé par le MIT

<http://coolvent.mit.edu/>

### TrnFlow

C'est le successeur direct de COMIS pour TrnSys. Ce plugin permet d'intégrer directement le calcul des débits de ventilation au Type56. Il est payant (environ 1900€)

[http://trnsys.de/docs/trnflow/trnflow\\_demoversion\\_en.htm](http://trnsys.de/docs/trnflow/trnflow_demoversion_en.htm)

### EnergyPlus

Le modèle de simulation thermique dynamique EnergyPlus intègre un AFN. Il est gratuit (c'est l'interface DesignBuilder qui est payante). Il semble que cet AFN soit une implémentation de CONTAM.

## V. Le vent et les bâtiments

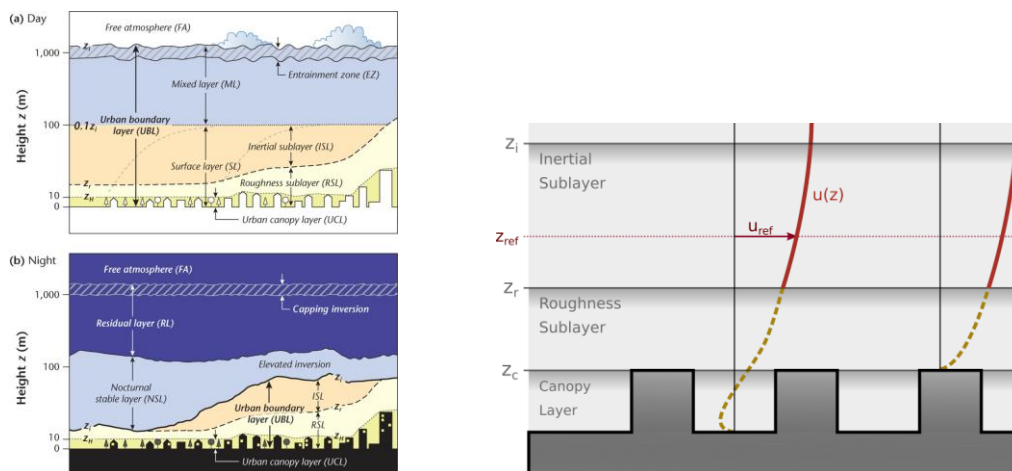
Dans cette section, des bases théoriques concernant la caractérisation des profils de vent et l'obtention des champs de pression sur les façades sont explicités.

### V.1. Profils de vent

#### V.1.a. Structure de l'atmosphère au-dessus d'un milieu urbain

L'image ci-dessous (à gauche) est tirée de (Oke et al. 2017). Elle montre comment les différentes couches de l'atmosphère proche du sol ont été définies et classifiées. Les caractéristiques de ces différentes couches sont décrites dans le tableau suivant, pour une structure d'atmosphère en journée. Dans ce tableau, le terme « vitesse » désigne la valeur moyenne de la vitesse du vent (hors fluctuations).

Couche	Limite supérieure	Caractéristiques
<b>Canopy Layer</b>	Hauteur des bâtiments $z_H = H$	Champ de vitesse tridimensionnel et très inhomogène
<b>Roughness SubLayer</b>	Hauteur de rugosité $z_r \approx 2.5 \text{ à } 4 \times H$	Variations horizontales de la vitesse due à des obstacles individuels du tissu urbain. Homogénéisation progressive lorsqu'on s'éloigne du sol.
<b>Inertial SubLayer</b>		Profils de vent homogènes horizontalement, mais dépendant des caractéristiques du tissu urbain en dessous
<b>Mixed Layer</b>	Hauteur d'inversion $z_i$	Vitesse de vent homogène dans toutes les directions de l'espace, indépendante des caractéristiques du tissu urbain.



Dans cette section, nous nous intéressons principalement aux profils de vent dans la **Inertial SubLayer**. C'est le profil de vent en rouge dans l'image ci-dessus à droite. Pour chaque profil, on supposera que l'on connaît une valeur de vitesse  $v_{ref}$  à une hauteur de référence  $z_{ref}$ .

#### V.1.b. Expressions des profils de vent

##### V.1.b.a Profil logarithmique

Le profil logarithmique est obtenu en résolvant les équations de couche limite turbulente. Il apparaît dans la zone de l'écoulement où le transport vertical de quantité de mouvement est majoritairement dû aux effets turbulents  $\langle u'w' \rangle$ , par rapport aux effets visqueux.

Dans des conditions atmosphériques neutres, le profil logarithmique prend la forme de l'équation suivante :

$$v(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left( \frac{z-d}{z_0} \right)$$

Avec :

- $u_*$  : vitesse de friction
- $\kappa \approx 0.41$  : constante de Von Karman
- $d$  : hauteur de déplacement
- $z_0$  : hauteur de rugosité (quantifie la trainée exercée par les éléments de rugosité)

La vitesse de friction  $u_*$  est obtenue en exprimant l'égalité  $v(z_{ref}) = v_{ref}$ . Les valeurs de  $d$  et  $z_0$  dépendent des caractéristiques géométriques du terrain. Ces valeurs peuvent être issues de valeur tabulées, comme dans le tableau ci-dessous (Oke et al. 2017). Elles peuvent aussi être issues de corrélations, dont une compilation est proposée par (Grimmond et Oke 1999).

Surface or terrain	Mean height of roughness elements $z_H$ (m)	Roughness length $z_0$ (m)	Zero-plane displacement $d$ (m)	Power law Exponent $\alpha$	Normalized friction velocity $u^*/u_{ref}$
<b>Rural</b>					<b><math>u_{ref}</math> at 10 m</b>
Mud flats, ice, tarmac		0.001–0.01 mm		0.08	0.03
Snow, water (average state)		0.1–1 mm		0.09	0.03
Desert sand		0.3–0.5 mm		0.10	0.04
Bare soil, cut grass,	0.02–0.05	0.01–0.02 m		0.10–0.11	0.04–0.06
Grass, stubble field	0.2–0.5	0.05–0.15 m	0.1–0.3	0.11–0.13	0.06–0.07
Farmland, crops	0.4–1	0.05–0.15 m	0.2–0.7	0.14–0.18	0.07–0.10
Bushland, orchards, Savannah	2–4	0.4–1 m	1.3–2.5	0.18–0.24	0.1–0.17
Forest – range from temperate to tropical	12–30	0.8–2 m	9–24	0.23–> 0.27	> 0.16
<b>Urban</b>					<b><math>u_{ref}</math> at 30 m</b>
Low height and density — houses, gardens, trees; warehouses	5–8	0.3–0.8 m	2–4	0.2–0.25	0.09–0.12
Medium height and density—row and close houses, town centres	7–14	0.7–1.5 m	3.5–8	0.23–0.27	0.11–0.14
Tall and high density — less than six floors, row and block buildings	11–20	0.8–2 m	7–15	0.26–0.29	0.13–0.16
High-rise — office and apartment tower clusters	> 20	> 2 m	> 12	0.29–0.35	> 0.16

Les variations des valeurs des coefficients  $d$  et  $z_0$  listées dans le tableau ci-dessus sont uniquement dues à des variations des caractéristiques géométriques (rugosité) du terrain. Dans des conditions atmosphériques instables ou stables, des termes correctifs d'ajoutent dans le logarithme de l'équation du profil de vent. Ces termes correctifs empiriques dépendent de la longueur de Monin-Obukhov, qui elle-même dépend du flux de chaleur sensible dégagé au niveau du sol.

### V.1.b.b Loi en puissance (Power Law)

La loi en puissance exprime le profil de vent selon l'expression suivante :

$$v(z) = v_{ref} \left( \frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha$$

Avec :

- $\alpha$  : exposant de la loi en puissance

La loi en puissance n'est qu'une approximation du profil logarithmique. Bien qu'il soit généralement recommandé de préférer les profils de vent logarithmiques, l'utilisation du profil puissance reste courante dans les calculs de ventilation naturelle. Deux raisons à cela. Tout d'abord, EnergyPlus utilise des profils en puissance pour calculer la pression due au vent aux nœuds extérieurs. Ensuite, la plupart des mesures de coefficients de pression réalisées en soufflerie ont utilisé des lois puissance pour caractériser les profils de vent (voir la suite).

Ci-dessous les valeurs d'exposant fournies par la documentation EnergyPlus (**U.S. Department of Energy 2014, 1438**). Le tableau de la section précédente indique les valeurs d'exposant fournies par (**Oke et al. 2017**).

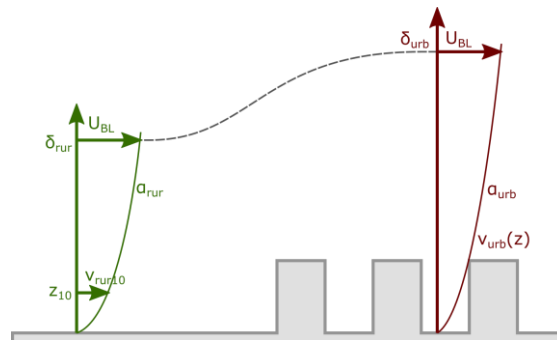
	Terrain	$\alpha$	$\delta$ [m]
1	Flat, open country	0.14	270
2	Rough, wooded country	0.22	370
3	Towns and cities	0.33	460
4	Ocean	0.10	210
5	Urban, industrial, forest	0.22	370

### V.1.c. Obtention d'un profil de vent en milieu urbain

Les fichiers météorologiques fournissent une valeur de vitesse de vent  $v_{rur,10}$  mesurée à une hauteur  $z_{rur,10} = 10m$  du sol, dans un terrain dégagé situé en zone rurale. Dans cette section nous recensons les méthodes permettant d'obtenir, à partir de ces données, un profil de vent en zone urbanisée  $v_{urb}(z)$ .

#### V.1.c.a Modèle colonne avec des profils puissance (EnergyPlus)

C'est la méthode utilisée par EnergyPlus. Un profil puissance est établi dans le milieu rural à partir de  $v_{rur,10}$  et  $z_{rur,10}$ , pour calculer la vitesse  $U_{BL}$  à une hauteur de couche limite rurale  $\delta_{rur}$ . On suppose que cette vitesse ne varie pas jusqu'au milieu urbain, à la hauteur de couche limite  $\delta_{urb}$ , ce qui permet d'établir le profil de vent dans le milieu urbain.



On a alors :

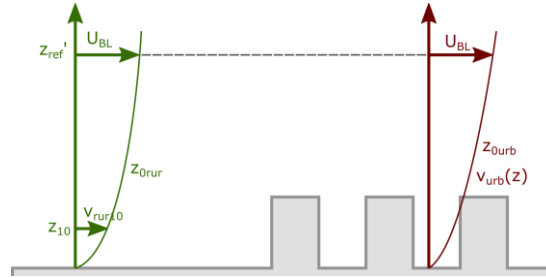
$$v_{rur}(z) = v_{rur10} \cdot \left(\frac{z}{z_{rur10}}\right)^{\alpha_{rur}} \rightarrow U_{BL} = v_{rur10} \cdot \left(\frac{\delta_{rur}}{z_{rur10}}\right)^{\alpha_{rur}}$$

$$v_{urb}(z) = U_{BL} \cdot \left(\frac{z}{\delta_{urb}}\right)^{\alpha_{urb}} = v_{rur10} \cdot \left(\frac{\delta_{rur}}{z_{rur10}}\right)^{\alpha_{rur}} \cdot \left(\frac{z}{\delta_{urb}}\right)^{\alpha_{urb}}$$

Les valeurs de  $\alpha$  et  $\delta$  sont sélectionnées dans le tableau présenté dans la section précédente. Pour le milieu rural, EnergyPlus préconise  $\alpha_{rur} = 0.14$  et  $\delta_{rur} = 270 \text{ m}$ .

### V.1.c.b Modèle colonne avec des profils logarithmiques

C'est la méthode employée par Urban Weather Generator (outil de simulation de l'îlot de chaleur urbain). Cette fois-ci, ce sont des profils logarithmiques qui sont utilisés dans les sites urbains et ruraux. Mais la reconnexion des profils se fait à une hauteur  $z'_{ref}$  arbitrairement définie par l'utilisateur (valeur par défaut 150m), qui ne varie pas entre le milieu rural et le milieu urbain. Aussi, dans les équations des profils, la hauteur de rugosité  $d$  est laissée nulle, pour que ces équations puissent définir des vitesses de vent jusqu'au sol.



On obtient à l'issue de la résolution du système d'équation associé, la formule suivante :

$$v_{urb}(z) = v_{rur10} \cdot \frac{\ln\left(\frac{z'_{ref}}{z_{0rur}}\right)}{\ln\left(\frac{z_{rur10}}{z_{0rur}}\right)} \cdot \frac{\ln\left(\frac{z}{z_{0urb}}\right)}{\ln\left(\frac{z'_{ref}}{z_{0urb}}\right)}$$

### V.1.c.c Eurocode 1

L'Eurocode 1 (AFNOR 1991) est dédié à l'évaluation de l'action du vent sur les structures. Il définit une vitesse de référence  $v_b$  par zone géographique. Cette vitesse de référence représente la valeur maximale de la vitesse de vent, atteignable à une hauteur de 10m, dans un terrain dégagé, en zone rurale. C'est à partir de cette vitesse de référence qu'il obtient des profils de vent en zone urbaine.

Ici, nous allons assimiler la vitesse de référence de la norme à notre vitesse mesurée par la station météo :  $v_{rur,10} = v_b$ . Le profil de vitesse urbaine préconisé par la norme serait le suivant :

$$v_{urb}(z) = v_{rur,10} \cdot k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{pour} \quad z_{\min} < z < z_{\max}$$

$$v_{urb}(z) = v_{urb}(z_{\min}) \quad \text{pour} \quad z < z_{\min}$$

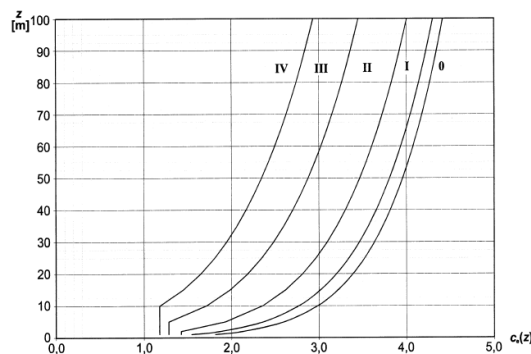
Avec :

- $z_0$  : longueur de rugosité
- $k_r$  : facteur de terrain
- $z_{\max} = 200 \text{ m}$
- Les valeurs de  $z_0$ ,  $k_r$ , et  $z_{\min}$  dépendent de la nature du terrain considéré.

Le tableau ci-dessous reprend les valeurs fournies par la norme :

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 (villages, zones suburbaines, 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 15m	1.0	10	0.2343

La morphologie des profils obtenus est illustrée par l'image ci-dessous.



## V.2. Obtention des coefficients de pression

On rappelle l'équation dans laquelle est défini le coefficient de pression  $c_p$  :

$$p = c_p \cdot \frac{1}{2} \rho v_0^2$$

Avec :

- $p$  : pression relative exercée par l'écoulement sur la paroi d'un obstacle à l'emplacement considéré
- $v_0$  : vitesse de référence.

La valeur du coefficient de pression  $c_p$  dépend du régime d'écoulement (laminaire / turbulent), de la direction de l'écoulement, et de la forme des obstacles à l'écoulement. Pour une morphologie d'obstacles et une direction d'écoulement données, si la vitesse de l'écoulement varie sans affecter le régime d'écoulement, les valeurs de  $c_p$  ne sont pas supposées varier.

En milieu extérieur, l'écoulement c'est le vent, et les obstacles ce sont les éléments qui constituent le tissu urbain (bâtiments, arbres, etc.). La vitesse de référence  $v_0$  doit être représentative de la vitesse du vent, soit en amont soit dans le tissu urbain. On considère généralement que le régime d'écoulement du vent est pleinement turbulent, quelle que soit sa vitesse. Donc pour une géométrie de tissu urbain donnée, le coefficient de pression  $c_p$  sur une portion de paroi d'un bâtiment dépend uniquement que de la direction du vent.

Dans cette section, on va explorer les différents moyens utilisés pour obtenir des valeurs de coefficient de pression sur des parois de bâtiment : les essais en soufflerie, et l'utilisation de codes CFD.

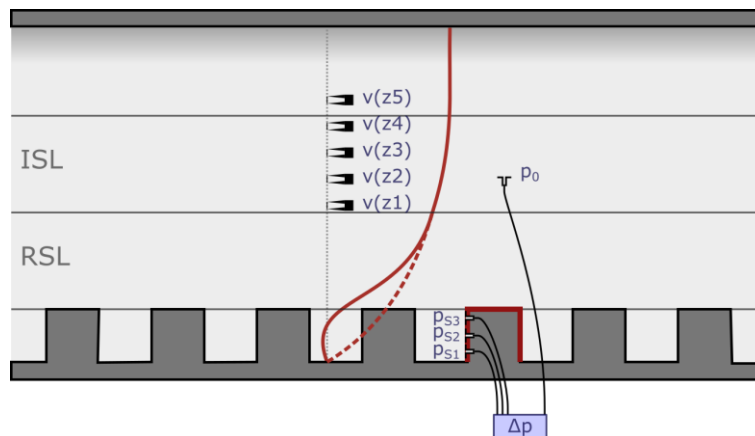
### V.2.a. Essais en soufflerie

Il s'agit ici de réaliser une maquette en échelle réduite du tissu urbain considéré, de la placer dans une soufflerie, et de mesurer les champs de pression le long des parois du bâtiment cible afin d'obtenir des valeurs de  $c_p$ .

#### Métrologie

Lors d'une mesure en soufflerie, la métrologie comprend généralement :

- Des **anémomètres** qui mesurent la vitesse de l'air  $v(z_i)$  à différentes hauteurs  $z_i$  au-dessus de la maquette de tissu urbain. On mesure les vitesses dans la Inertial Sublayer (ISL) (aussi appelée le « free flow »), pour éviter de capturer des perturbations de vitesse liées aux effets individuels des différents éléments de la maquette.
- Un **manomètre différentiel multivoies**. Il est relié, d'un côté, à un réseau de prises de pression distribuées sur les façades du bâtiment cible, et de l'autre côté à une prise de pression de référence commune. Pour chaque prise de pression, le manomètre fournit la différence  $p_{Si} - p_0$  avec  $p_0$  la pression de référence, et  $p_{Si}$  la pression pariétale.



Avec ce type dispositif, les modèles réduits des bâtiments sont hermétiques : l'air n'y rentre pas. Des petits orifices sont opérés sur les parois du bâtiment cible pour pouvoir mesurer la pression pariétale. La maquette est généralement placée sur un disque mobile afin de pouvoir faire varier la direction du vent relativement au tissu urbain modélisé.

#### Modèle réduit, analogie de Reynolds, profils de vent, etc.

Lors des essais en soufflerie, il faut s'assurer d'avoir un régime d'écoulement turbulent pleinement développé. Pour cela, on vérifie que le nombre de Reynolds  $Re$  de l'écoulement dans la soufflerie est supérieur à 5000. On rappelle que  $Re = v_0 L / \nu$ , avec  $L$  la longueur caractéristique de l'écoulement (généralement la hauteur des bâtiments  $H$ ),  $v_0$  la vitesse de référence de l'écoulement, et  $\nu$  la viscosité dynamique ( $15.6 \cdot 10^{-6} m^2/s$  pour l'air).

Des précautions doivent aussi être prises pour s'assurer d'avoir, au-dessus de la maquette, un profil de vent similaires au profil de vent observé au-dessus de la zone urbaine modélisée. C'est la raison pour laquelle des ailettes (fetch) sont disposées dans l'entrée de la soufflerie, et des blocs parallélépipédiques sont distribués au sol, en amont de la maquette pour générer de la rugosité.

Enfin, il est nécessaire qu'aux environs immédiats du bâtiment d'intérêt, l'écoulement soit similaire à à l'écoulement dans le tissu urbain réel. Il faut pour cela que la maquette s'étende suffisamment autour du bâtiment d'intérêt afin de reproduire tous les masques à l'écoulement. Tous ces aspects sont largement discutés dans (Hussain 1979).

### Calcul des coefficients de pression

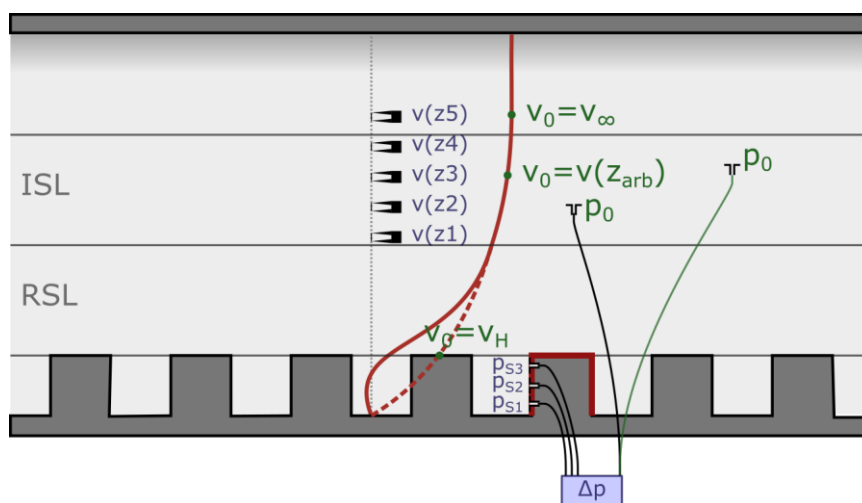
Le coefficient de pression à un point  $i$  est obtenu en calculant le rapport :

$$c_{pi} = \frac{p_{si} - p_0}{\frac{1}{2} \rho v_0^2}$$

La vitesse de référence  $v_0$  est généralement déterminée à partir du profil de vitesse mesuré au-dessus de la maquette. Mais la hauteur à laquelle cette vitesse de référence est prise peut varier. Selon les articles, cette vitesse peut être prise :

- Dans la zone où le profil est supposé devenir homogène :  $v_0 = v_\infty$
- A une hauteur arbitraire :  $v_0 = v(z_{arb})$
- A la hauteur des bâtiments  $v_0 = v_H = v(H)$

Dans les deux premiers cas, la vitesse de référence peut être mesurée directement par un anémomètre. Dans le dernier cas, le profil de vitesse doit être reconstitué à partir des mesures de vitesse, et la vitesse  $v_H$  correspond à la valeur de ce profil à la hauteur  $z = H$ .



### Précaution à prendre lors de l'utilisation des $c_p$ , dues au choix de la vitesse de référence

Lorsque les coefficients de pression  $c_p$  sont utilisés par un AFN pour évaluer des niveaux de pressions à la surface des bâtiments, il faut que la vitesse de référence  $v_0$  utilisée pour convertir les  $c_p$  en pression soit prise sur un profil local de vent : celui au-dessus du tissu urbain considéré (pas dans le milieu rural environnant). Il faut aussi qu'elle soit prise **à la même hauteur que celle qui a été utilisée lors du calcul des  $c_p$  à partir des mesures.**

Ce point peut s'avérer particulièrement problématique lorsqu'on paramétrise l'AFN d'EnergyPlus avec DesignBuilder (avec la V6). En effet, DesignBuilder utilise des données issues de (Liddament 1986) pour paramétrer les coefficients de pression sur les façades. Ce sont des coefficients de pression moyens sur les façades, qui ont été calculés avec une vitesse de référence à la hauteur des bâtiments  $v_H$ . Or, DesignBuilder paramétrise l'AFN d'EnergyPlus de telle sorte que ce soit la vitesse d'air à la hauteur des fenêtres qui soit utilisée pour calculer les niveaux de pression. Ce paramétrage



est à priori erroné. Il mène à une diminution des niveaux de pression avec la hauteur qui est purement artificiel.

### Limitations dues à la pression de référence

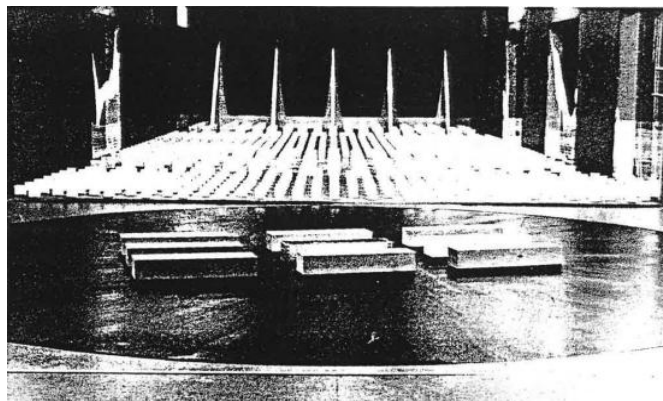
La pression de référence  $p_0$  est un autre aspect des mesures en soufflerie qui implique des précautions dans l'utilisation des coefficients de pression. Cette pression est généralement mesurée en hauteur, au-dessus de la maquette de tissu urbain. Mais l'emplacement exacte de cette mesure peut varier d'une campagne de mesure à l'autre. La valeur de la pression peut aussi varier selon les caractéristiques de la soufflerie. Dans ce cas, la référence de pression utilisée pour calculer les coefficients de pression peut être différentes d'une campagne de mesure à l'autre. Il est alors déconseillé de « panacher » lors d'une même simulation des coefficients de pression issus de campagnes de mesure différentes.

### Les campagnes de mesure emblématiques

Certaines campagnes de mesures en soufflerie revêtent un caractère emblématique, parce qu'elles ont produit des valeurs de coefficients de pression qui ont été grandement utilisées par la suite.

Les objets de ces campagnes de mesure étaient des **morphologies urbaines académiques** : des blocs parallélépipédiques, souvent arrangés en grilles, avec parfois des formes de toits en pente. Différentes dimensions et différentes densités de blocs ont été testées. L'objectif de ces campagnes de mesure était de couvrir une diversité de configurations urbaines qui se rapproche de la diversité de configurations urbaines rencontrées dans les tissus urbains existants.

On notera que les coefficients de pression mesurés n'étaient pas destinés exclusivement au calcul des débits de ventilation : ils étaient aussi destinés à des calculs de structure. Ils apparaissent ainsi dans les normes qui définissaient la manière de calculer les charges du vent sur les bâtiments.



Le tableau ci-dessous liste quelques campagnes de mesure emblématiques. Ci-dessus, l'image de la soufflerie de (Wiren 1987). On voit, dans le tableau, que l'emplacement auquel a été prélevée la vitesse de référence  $z(v_0)$  pour le calcul des  $c_p$  a varié d'une campagne à l'autre, avant d'aboutir à un consensus sur la hauteur des bâtiments  $H$  au milieu des années 80.

Toutes les campagnes de mesure fournissent des distributions de valeurs de  $c_p(x, y)$  sur les parois. Mais lorsqu'il a été observé que ces distributions étaient relativement homogènes (généralement pour des blocs de petite taille), des valeurs moyennes par façade ont aussi été fournies.

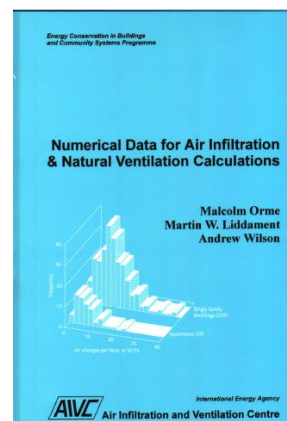
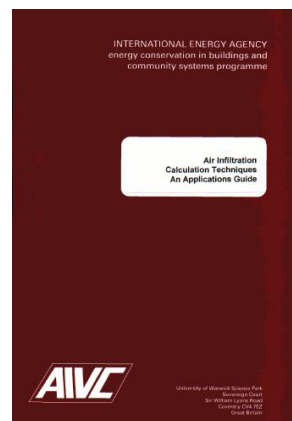
	$z(v_0)$	$\theta_w$	$c_p$	Configurations testées
(Akins et Cermak 1976)	$z_{win}$ (amont)	0 - 90	Distribution	Blocs parallélépipédiques sans entourage, ratios de forme différents
(Hussain 1979)	$\infty$	0	Distribution	Essentiellement des mesures pour définir des bonnes pratiques pour la reproduction d'écoulements en soufflerie (ailettes, nombres de rangées, etc) Assemblage de blocs cubiques variés
(Bowen 1976)	$H$	0-90	Distribution	Bâtiment de grande hauteur par rapport aux bâtiments environnants
(Wirén 1983)	$H$	0-90	Distribution + Moyen	Maison individuelle, en réseau plus ou moins resserré. Publication extraite d'un rapport plus détaillé inaccessible.
(Wirén 1987)	$H$	0-90	Distribution	Parallélépipèdes allongés : morphologie similaire à des barres de logement de faible hauteur

### Bases de données – modèles de régression

Les campagnes de mesures emblématiques ont permis très tôt de constituer des bases de données de coefficient de pression qui couvrent une gamme assez large de morphologies de bâtiments et d'environnements urbains.

Ces bases de données ont été intégrées dans des guides qui proposent des ensembles complets d'outils pour le calcul des débits de ventilation naturelle. En plus de lister des valeurs de coefficient de pression, les guides fournissent des règles de sélection des valeurs de  $c_p$  en fonction des caractéristiques morphologiques du bâtiments étudié.

Parmi ces guides, on peut citer les guides de l'AICV (**Liddament 1986; Orme et al. 1998**) et l'Eurocode 1 (**AFNOR 1991**), qui proposent des valeurs de  $c_p$  issues de (**Bowen 1976; Wirén 1987, 1983**). On peut aussi citer le guide ASHRAE (**ASHRAE 2021**).



Les valeurs de coefficient de pression issues des campagnes de mesure emblématiques ont aussi fait l'objet de modèles de régression dont voici les spécificités :

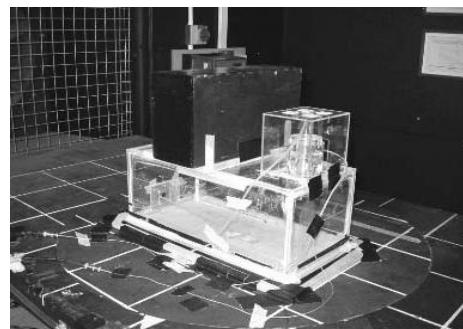
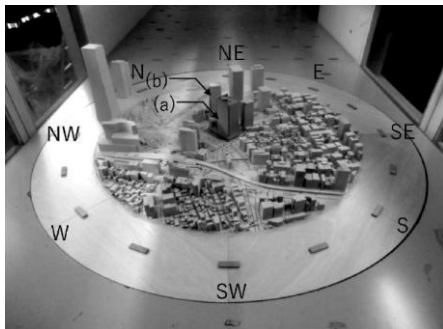
- (**Swami et Chandra 1987**) : modèles pour bâtiment bas et haut. Prise en compte de la direction du vent et du masquage du vent par les bâtiments environnants
- Cp-calc (**Grosso 1992**) : modèle donnant les champs de coefficient de pression pour des façades de bâtiments urbains. Les configurations urbaines explorées sont des configurations de blocs parallélépipédiques régulièrement arrangés.
- Cp-generator (**Knoll et al. 1995**) : modèle permettant a priori de calculer des champs de coefficients de pression pour des configurations urbaines aléatoires. Le modèle est supposé

être accessible sous forme d'une application en ligne, mais le lien ne fonctionne plus. De plus, aucune publication n'a été trouvée concernant la manière dont fonctionne le modèle.

Les bases de données de référence et les modèles de régression ont été synthétisés par (Cóstola et al. 2009).

### Autres campagnes de mesure

D'autres campagnes de mesures en soufflerie ont été réalisées par la suite, avec des objectifs variés. Certaines campagnes ont eu pour objectif d'affiner la compréhension de l'effet de certains paramètres sur les coefficients de pression (Quan et al. 2007). D'autres campagnes ont été réalisées afin de produire des données de référence pour valider des modèles CFD, ou pour confronter les coefficients de pression mesurés en souffleries avec ces données de mesure échelle 1 (Esber 2022; Kikuchi et al. 2024).



Pour sortir un peu du cadre de la mesure de coefficients de pression, des mesures en soufflerie ont aussi été réalisées avec des **modèles de bâtiments perméables**, avec pour objectif de visualiser les écoulements générés à l'intérieur des bâtiments (Etheridge 2004; Ikegaya et al. 2019). Pour ces mesures, il est beaucoup plus difficile de reproduire un régime d'écoulement similaire au régime d'écoulement observé à l'échelle 1. En effet, la taille caractéristique  $L$  de l'écoulement devient la taille des ouvertures. La diminution de cette taille caractéristique doit être compensée par une augmentation de la vitesse dans la soufflerie pour maintenir  $Re > 5000$ .

Enfin, pour revenir à la mesure de coefficients de pression, mais pour sortir de la soufflerie : des campagnes de mesures ont aussi été réalisées dans des bâtiments taille réelle, ou dans des modèles de bâtiments à l'échelle 1 (Esber 2022; Kikuchi et al. 2024; King et al. 2017). Ces mesures présentent elles aussi des défis techniques à lever : il est impossible de maîtriser les conditions de vent extérieures (vitesse et orientation), il faut trouver un bâtiment dans lequel il est autorisé d'effectuer des percements pour placer les sondes de pression, les sondes de pression doivent être connectées à un manomètre différentiel unique pour capturer les différences de pression de quelques Pascals, les longueurs de câbles peuvent alors être contraignantes, etc.

### V.2.b. Les outils CFD

S'il arrive que l'on puisse vouloir évaluer des débits de ventilation naturelle dans un bâtiment donné, on dispose rarement d'une soufflerie et des moyens associés pour, au préalable, déterminer les coefficients de pression le long des parois de ce bâtiment. On pourrait alors se tourner vers des règles de sélection de coefficients de pression dans des bases de données dédiées, ou vers des modèles de régression. Mais pour des formes de bâtiment qui s'écartent un peu trop du parallélépipède simple (bâtiments en L, avec un patio, etc.), on aura du mal à se convaincre de la pertinence de l'usage de ces outils.

Que faire dans ce cas ? Comment obtenir, sans mobiliser des moyens expérimentaux disproportionnés, des valeurs de coefficients de pression qui soient un tant soit peu adaptées aux caractéristiques morphologiques de notre bâtiment ? Une solution est possible : l'usage de la CFD.

### Principe général des calculs

Il s'agit ici de réaliser des simulations d'écoulement du vent dans le tissu urbain considéré.

Chaque simulation est une simulation stationnaire, à partir de laquelle on extrait les champs de pression  $p_s(x, y)$  qui s'exercent sur les parois du bâtiment cible. On réalise plusieurs simulations pour obtenir ces valeurs de champs de pression pour différentes directions du vent. Par contre, pour chaque direction de vent, une seule simulation est nécessaire. La vitesse du vent incidente doit juste être réaliste, afin d'obtenir un écoulement pleinement turbulent.

Une fois que l'on a collecté les champs de pression pariétale pour différentes directions du vent, on adimensionne les valeurs de pression afin d'obtenir les coefficients de pression :

$$c_p(x, y) = \frac{p_s(x, y) - p_0}{\frac{1}{2} \rho v_0^2}$$

De la même manière qu'avec les mesures en soufflerie, l'adimensionnement nécessite une vitesse de référence  $v_0$  qu'il faudra déterminer à partir du champ de vitesse simulé. Le mode de sélection de cette vitesse de référence devra être documenté afin qu'il puisse être reproduit lors des calculs AFN.

### Les recommandations pour la simulation

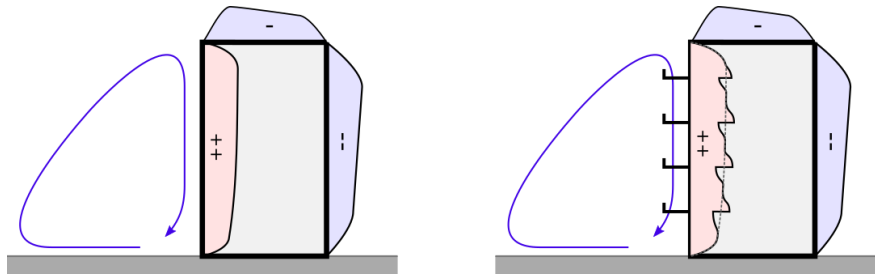
La réalisation de simulations d'écoulement en milieu urbanisé nécessite de prendre un certain nombre de précautions, dont voici une liste non exhaustive : le domaine simulé doit comprendre des volumes en amont et en aval du tissu urbain simulé afin que le champ de vitesse puisse se stabiliser, les conditions limites en haut du domaine doivent correspondre à des conditions limites ouvertes, les conditions limites en entrée de domaine doivent correspondre à des profils de vent réalistes, la taille de la portion de tissu urbain modélisé doit être suffisamment grande pour reproduire correctement l'écoulement aux abords du bâtiment cible, etc.

Ces recommandations ont été compilées dans des publications scientifiques dédiées (Franke et al. 2011; Tominaga et al. 2008; Yoshie et al. 2007).

### Niveau de détail des représentations géométriques

Lorsqu'on réalise des simulations CFD pour prédire des coefficients de pression, il se pose aussi la question du niveau de détail avec lequel on représente la géométrie des bâtiments. Doit-on aller jusqu'à représenter les balcons, les ornements de façade ?

Le schéma ci-dessous permet d'illustrer la réflexion. On souhaite prédire les coefficients de pression autour d'un bâtiment de forme parallélépipédique, avec des balcons sur la façade principale. A gauche, les résultats qu'on obtiendrait sans prendre en compte la géométrie des balcons : le vent « pousse » la façade principale. A droite, les résultats qu'on obtiendrait en prenant en compte la géométrie des balcons : le vent continue globalement à « pousser » la façade principale, mais les balcons induisent des perturbations locales du champ de pression. Lorsque l'écoulement s'engouffre dans le balcon, il y a une surpression. Sur la face des balcons opposée à l'écoulement, il y a des dépressions.



Le choix de ne pas modéliser la géométrie des balcons revient à supposer que la perturbation qu'ils induisent n'aura qu'un effet limité sur les résultats des simulations STD/AFN qui seront réalisés par la suite avec les coefficients de pression produits. La pertinence de cette hypothèse dépendra donc du type de l'étude, et de l'ampleur estimée de l'effet de ces détails de façade sur les champs de pression.

### Les outils CFD

Tous les outils CFD conventionnels (Fluent, StarCCM, openFOAM) peuvent être utilisés pour déterminer des champs de pression aux abords des parois des bâtiments. L'utilisation de ces outils nécessite cependant un travail de paramétrage conséquent pour que les recommandations de simulations en espace extérieurs urbains puissent être suivies (profils de vent, volume simulé, etc.). Aussi, l'une des difficultés liées à ce type de simulation est la génération des maillages : en effet, pour limiter les volumes à simuler, un maillage spécifique doit être réalisé pour chaque direction du vent.

Pour faciliter la mise en œuvre des calculs, il existe des outils CFD spécifiquement dédiés à la simulation des espaces urbains extérieurs. Ces outils génèrent automatiquement les maillages, et paramétrisent automatiquement les simulations. C'est notamment le cas de l'outil UrbaWind (<https://meteodyn.com/>).

### Les études CFD

On recense quelques études CFD sur la ventilation naturelle dans la littérature scientifique. A titre d'exemple, (Badas et al. 2017) ont étudié l'effet de toitures en pente sur les coefficients de pression le long de bâtiments formant des rues canyon, (Ikegaya et al. 2019) ont étudié la partie fluctuante des coefficients de pression dans des réseaux de blocs cubiques.

## VI. Les grandes ouvertures

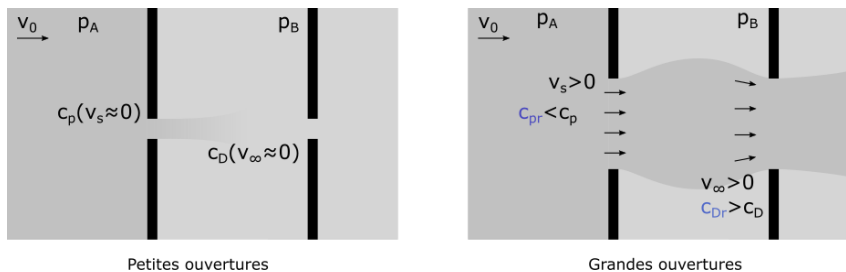
Soit une ouverture entre une ambiance extérieure A et une ambiance B. Avec les outils développés dans ce cours, la pression devant l'ouverture devrait s'exprimer comme suit :

$$p_A = c_p \cdot \frac{1}{2} \rho v_0^2$$

Et le débit au travers de l'ouverture :

$$Q_V = c_D \cdot S \sqrt{\frac{2(p_A - p_B)}{\rho}} = c_D \cdot S \sqrt{c_p \cdot v_0^2 - \frac{2p_B}{\rho}}$$

Les valeurs de  $c_p$  et de  $c_D$  utilisées dans ces équations ont été obtenues en reproduisant (expérimentalement ou numériquement) des conditions de **petites ouvertures**. Le coefficient de pression a été obtenu sur un modèle de paroi hermétique, avec une vitesse résiduelle  $v_s$  nulle à la paroi. Le coefficient de décharge a été obtenu en supposant que toute l'énergie cinétique de l'écoulement transitant au travers de l'orifice était dissipée dans le local B.



Avec les **grandes ouvertures** (attention, la signification de « grande ouverture » est plus générale ici que dans le vocabulaire des AFN), ces hypothèses ne sont plus vraies.

On ne peut plus négliger la vitesse résiduelle  $v_s$  au niveau de l'orifice. L'écoulement extérieur n'y a pas perdu toute son énergie cinétique. De ce fait, la « vraie » pression devrait y être moins élevée, le « vrai » coefficient de pression  $c_{pr}$  devrait être plus faible qu'avec une paroi hermétique.

L'écoulement dans le local B forme un tube de courant. Ainsi, à la sortie du local, il persiste une vitesse résiduelle  $v_\infty$ . L'énergie cinétique injectée dans le local ne s'est pas dissipée. Le « vrai » coefficient de décharge  $c_{Dr}$  devrait être alors plus élevé que le coefficient de décharge initial.

Si l'on revient à l'équation précédente, comme  $c_{pr} < c_p$  et  $c_{Dr} > c_D$ , on peut considérer qu'au premier ordre les variations de coefficients se compensent :

$$Q_V = c_{Dr} \cdot S \sqrt{c_{pr} \cdot v_0^2 - \frac{2p_B}{\rho}} \approx c_D \cdot S \sqrt{c_p \cdot v_0^2 - \frac{2p_B}{\rho}}$$

Exprimé autrement : dans une grande ouverture, la pression, qui est le moteur de l'écoulement est plus faible, mais il y a moins de résistance à cet écoulement. L'un dans l'autre, il n'est pas impossible que le débit soit similaire au débit calculé avec les hypothèses des petites ouvertures.

## **VII. Annexes**

### **VII.1. *Bibliographie***

- AFNOR. 1991. *NF EN 1991-1-4, Eurocode 1: actions sur les structures*. Norme.
- Akins, R. E., et E. Cermak. 1976. *Wind Pressures on Buildings*. Fluid Dynamics an diffusion laboratory, College of engineering, Colorado State University.
- Allard, Francis, Dominique Bienfait, Fariborz Haghighat, et al. 1992. *Air flow through large openings in buildings, An Annex 20 Technical Report*. J. Van der Maas.
- ASHRAE. 2021. *2021 ASHRAE Handbook: Fundamentals*. ASHRAE.
- Badas, Maria Grazia, Simone Ferrari, Michela Garau, et Giorgio Querzoli. 2017. « On the effect of gable roof on natural ventilation in two-dimensional urban canyons ». *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 162 (mars): 24-34. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.01.006>.
- Bowen, A. J. 1976. *A Wind Tunnel Investigation Using Simple Building Models to Obtain Surface Wind Pressure Coefficient for Air Infiltration Estimates*. LTR-LA-209. National Aeronautical Establishment, National Research Council Canad.
- Chenvidyakarn, Torwong. 2013. *Buoyancy Effects on Natural Ventilation*. Cambridge University Press.
- Cóstola, D., B. Blocken, et J. L. M. Hensen. 2009. « Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs ». *Building and Environment* 44 (10): 2027-36. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.02.006>.
- Dols, Stuart, et brian polidoro. 2015. *CONTAM User Guide and Program Documentation Version 3.2*.
- Esber, Ali. 2022. « Impact de la turbulence en ingénierie de ventilation sur les bâtiments ».
- Etheridge, D. W. 2004. « Natural Ventilation through Large Openings - Measurements at Model Scale and Envelope Flow Theory ». *International Journal of Ventilation* 2 (4): 325-42. <https://doi.org/10.1080/14733315.2004.11683676>.
- Franke, Jorg, Antti Hellsten, K. Heinke Schlunzen, et Bertrand Carissimo. 2011. « The COST 732 Best Practice Guideline for CFD simulation of flows in the urban environment: a summary ». *International Journal of Environment and Pollution* 44 (1-4): 419-27. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2011.038443>.
- Ghiaus, Christian, et Francis Allard. 2005. *Natural Ventilation In the Urban Environment - Assessment and Design*. Earthscan.
- Grimmond, C. S. B., et T. R. Oke. 1999. « Aerodynamic Properties of Urban Areas Derived from Analysis of Surface Form ». *Journal of Applied Meteorology* 38 (9): 1262-92. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1999\)038%253C1262:APOUAD%253E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1999)038%253C1262:APOUAD%253E2.0.CO;2).
- Grosso, Mario. 1992. « Wind pressure distribution around buildings: a parametrical model ». *Energy and Buildings* 18 (2): 101-31. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(92\)90041-E](https://doi.org/10.1016/0378-7788(92)90041-E).



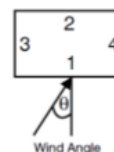
- Hussain, M. 1979. « A Study of the Wind Forces on Low Rise Building Arrays and Their Application to Natural Ventilation Design Methods ». University of Sheffield.
- Ikegaya, N., S. Hasegawa, et A. Hagishima. 2019. « Time-resolved particle image velocimetry for cross-ventilation flow of generic block sheltered by urban-like block arrays ». *Building and Environment* 147 (janvier): 132-45. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.015>.
- Karava, P., T. Stathopoulos, et A. K. Athienitis. 2004. « Wind Driven Flow through Openings – A Review of Discharge Coefficients ». *International Journal of Ventilation* 3 (3): 255-66. <https://doi.org/10.1080/14733315.2004.11683920>.
- Kikuchi, Takuro, Kazuo Ohtake, Yoshimi Takahashi, et al. 2024. « Comparison of wind pressure coefficients between wind tunnel experiments and full-scale measurements using operational data from an urban high-rise building ». *Building and Environment* 252 (mars): 111244. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111244>.
- King, Marco-Felipe, Hannah L. Gough, Christos Halios, et al. 2017. « Investigating the influence of neighbouring structures on natural ventilation potential of a full-scale cubical building using time-dependent CFD ». *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 169 (octobre): 265-79. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.07.020>.
- Knoll, B., J. C. Phaff, et W. F. de Gids. 1995. « Implementing the Results of Ventilation Research ». *16th AIVC Conference* (Palm Spring USA).
- Lafaye de Micheaux, T., M. Ducoulombier, J. Moureh, V. Sartre, et J. Bonjour. 2015. « Experimental and Numerical Investigation of the Infiltration Heat Load during the Opening of a Refrigerated Truck Body ». *International Journal of Refrigeration* 54 (juin): 170-89. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.02.009>.
- Liddament, Martin W. 1986. *IEA-ECB. Annex V: Air Infiltration and Ventilation Centre Air Infiltration Calculation Techniques: An Applications Guide*. Avec Internationale Energieagentur et International Energy Agency. Air Infiltration and Ventilation Centre.
- Lu, Jie, S. Pal Arya, William H. Snyder, et Robert E. Lawson. 1997a. « A Laboratory Study of the Urban Heat Island in a Calm and Stably Stratified Environment. Part I: Temperature Field ». *Journal of Applied Meteorology and Climatology. Journal of Applied Meteorology and Climatology* 36 (10): 1377-91. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1997\)036%253C1377:ALSOTU%253E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1997)036%253C1377:ALSOTU%253E2.0.CO;2).
- Lu, Jie, S. Pal Arya, William H. Snyder, et Robert E. Lawson. 1997b. « A Laboratory Study of the Urban Heat Island in a Calm and Stably Stratified Environment. Part II: Velocity Field ». *Journal of Applied Meteorology and Climatology. Journal of Applied Meteorology and Climatology* 36 (10): 1392-402. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1997\)036%253C1392:ALSOTU%253E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1997)036%253C1392:ALSOTU%253E2.0.CO;2).
- Oke, T. R., G. Mills, A. Christen, et J. A. Voogt. 2017. *Urban Climates*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>.
- Orme, Malcolm, Martin W. Liddament, et Andrew Wilson. 1998. *Numerical Data for Air Infiltration and Natural Ventilation Calculations*. AIVC.
- Quan Yong, Tamura Yukio, Matsui Masahiro, CAO Shuyang, Yoshida Akihito, et Xu Sen. 2007. « Interference Effect of A Surrounding Building Group on Wind Loads on Flat Roof of Low-rise Building: Part I, Distribution of local wind pressure coefficients ». 57-57. <https://doi.org/10.14887/jaweam.2007.0.57.0>.



- Swami, Muthusamy V., et Subrato Chandra. 1987. *Procedures for calculating natural ventilation airflow rates in building*. Florida Solar Energy Center.
- Tominaga, Yoshihide, Akashi Mochida, Ryuichiro Yoshie, et al. 2008. « AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings ». *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 4th International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2006), vol. 96 (10): 1749-61. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.02.058>.
- U.S. Department of Energy. 2014. « EnergyPlus Version 8.9.0 Documentation - Engineering Reference ».
- Wirén, B. G. 1983. « Effects of surrounding buildings on wind pressure distributions and ventilative heat losses for a single-family house ». *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 15 (1): 15-26. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(83\)90173-3](https://doi.org/10.1016/0167-6105(83)90173-3).
- Wirén, B. G. 1987. *Effects of surrounding buildings on wind pressure distributions and ventilative heat losses for a single-family house Part2: 2-storey terrace houses*. National Swedish Institute for Building Research.
- Wiren, Bengt G. 1987. *Effects of surrounding buildings on wind pressure distributions and ventilation losses for single-family houses*. The National Swedish Institute for Building Research.
- Yoshie, R., A. Mochida, Y. Tominaga, et al. 2007. « Cooperative project for CFD prediction of pedestrian wind environment in the Architectural Institute of Japan ». *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 95 (9): 1551-78. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2007.02.023>.

## VII.2. Table de coefficients de pression de l'Eurocode 1

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