

I. - LE VENT

1.1 - Échelles climatiques et phénomènes locaux

Les anticyclones et les dépressions sont à l'origine de mouvements d'air à l'échelle planétaire, notamment entre l'équateur plutôt chaud et les pôles plutôt froids. Ainsi les vents dominants sont des phénomènes observables sur plusieurs centaines de kilomètres et qui fluctuent sur des périodes de l'ordre de la journée (figure 1-1) (Bozonnet, 2005). Mais localement des phénomènes spécifiques peuvent apparaître comme des brises de terre/mer ou de montagne/vallée. Ces brises sont dues à des écarts de température relativement importants sur de faibles distances, elles dépendent de la géographie locale.

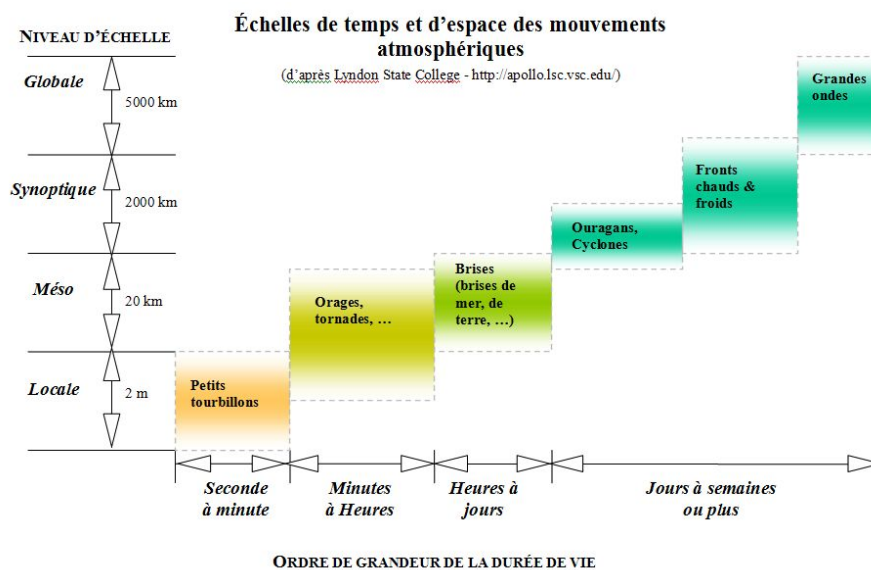


Figure 1-1 - Les différents niveaux d'échelle spatiotemporels des phénomènes climatiques

Tous ces mouvements d'air peuvent être caractérisés localement par les équations de conservation de la quantité de mouvement, de la masse et de l'énergie, mais, étant donnée la complexité du milieu étudié, on s'intéresse tout d'abord à une description plus macroscopique. On peut définir trois échelles d'étude (Allard, 1998) : l'échelle régionale qui couvre des étendues de l'ordre de la centaine de kilomètres, l'échelle locale qui couvre des étendues de l'ordre de la dizaine de kilomètres, et l'échelle micro climatique, objet de la présente étude, qui correspond à quelques centaines de mètres. Pour cette dernière échelle, l'écoulement d'air peut être modifié non seulement par la présence de petits obstacles, de la végétation, mais aussi par des phénomènes thermiques liés notamment à l'ensoleillement.

a) Circulation d'air à l'échelle atmosphérique et vents dominants

Les grands mouvements d'air à l'échelle du globe sont provoqués par des différences de pression et de température dans la couche atmosphérique.

L'atmosphère n'est pas homogène thermiquement, et en fonction de l'altitude différentes couches ont été définies en fonction des mesures de température et de

pressions. Les premières mesures effectuées par Pascal ont montré la variation de la pression atmosphérique en fonction de l'altitude, mais c'est beaucoup plus tard que sa structure verticale a été déterminée à partir de moyens de mesures plus élaborés tels que les ballons sondes notamment. Ainsi plusieurs couches atmosphériques ont été définies, chaque couche correspondant à une inversion de l'évolution de température : la troposphère au niveau de la surface, puis la stratosphère, la mésosphère et la thermosphère (figure 1-2). Au-dessus de la stratopause, limite supérieure de la stratosphère située à environ 40 km (Aubé, 2002), la densité de l'air devient très faible et la limite supérieure de l'atmosphère n'est pas précisément définie. Au-delà d'une certaine altitude, une part des gaz échappe à l'attraction terrestre, et un renouvellement permanent s'effectue à partir des différentes sources terrestres. La tropopause se situe à une altitude variable en fonction notamment de la latitude, de 8 à 17 km des pôles à l'équateur (Aubé, 2002). En effet, la hauteur de celle-ci augmente avec la température moyenne d'air, l'air étant alors moins dense. Au niveau de la tropopause, la température atteint un minimum d'environ -57 °C , la décroissance moyenne de température étant d'environ 6.5 K/km dans la troposphère. La hauteur de la tropopause peut donc varier aussi quotidiennement de part l'influence de la température (Strawbridge et Snyder 2004). Dans la stratosphère cette température remonte jusqu'à environ 0 °C au niveau de la stratopause. Cette augmentation de température est provoquée par la transformation de l'oxygène en ozone sous l'effet du rayonnement solaire ultraviolet.

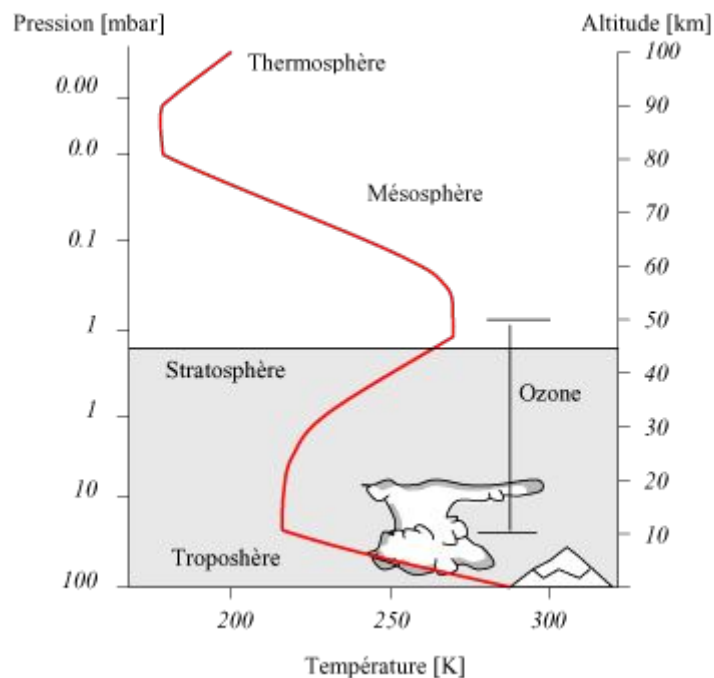


Figure 1-2- Profil de température et définition des différentes couches atmosphériques en fonction de la température (d'après schéma sur nix.nasa.gov)

C'est dans la troposphère que les phénomènes climatiques observés au niveau de la surface terrestre ont principalement lieu, notamment au niveau de la couche limite planétaire (CPL) qui s'étend jusqu'à une limite de 2 km d'altitude.

b) Les mouvements d'air verticaux dans la troposphère

En conditions stables l'air voit sa pression diminuer avec l'altitude et donc avec sa température. Cette variation n'est pas liée à des échanges de chaleur et on définit alors le gradient adiabatique de température G_a (1 °C pour 100 m) qui correspond au gradient de température en conditions neutres. Cependant de nombreux échanges de chaleur ont lieu près du sol et on définit alors trois états de conditions atmosphériques :

atmosphère neutre ou adiabatique : le taux de refroidissement de l'air est égal au gradient adiabatique,

atmosphère instable ou sur-adiabatique : le taux de refroidissement de l'air est supérieur au gradient adiabatique,

atmosphère stable ou sous-adiabatique : le taux de refroidissement de l'air est inférieur au gradient adiabatique.

En condition sous-adiabatique extrême, la température s'accroît avec l'altitude. Ce phénomène, appelé inversion de température, est caractérisé par l'altitude maximum d'inversion et la différence de température entre la partie basse et haute. Il peut être observé lorsque le sol rafraîchit l'air au cours de la nuit alors que l'air en altitude se maintient en température, le plan d'inversion de température peut se trouver entre 100 et 400 mètres. Du fait de la forte stabilité de cette situation, si le réchauffement diurne est faible, le plan d'inversion de température demeure et les échanges entre les deux couches restent très faibles.

À l'échelle du globe et à une même altitude on observe des zones de basse pression, dites dépressions, et des zones de haute pression, appelées anticyclones. L'air descend dans les zones de haute pression, où la «colonne d'air» est plus importante, et remonte dans les zones de basse pression (figure 1-3).

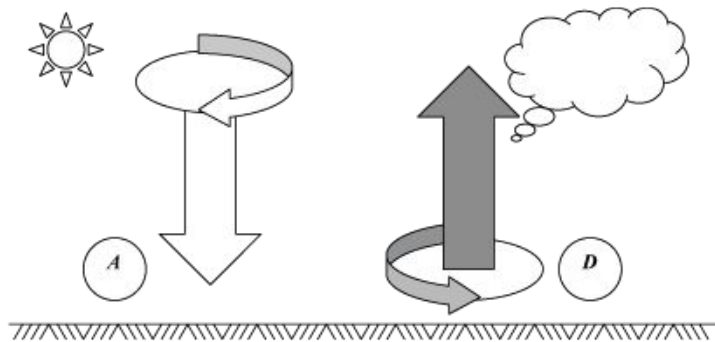


Figure 1-3- Anticyclones (A) et Dépressions (D) et mouvements d'air

L'air descendant lentement, se réchauffe progressivement, ce qui souvent limite la formation de nuages, tandis que dans les zones d'air ascendantes l'air humide se refroidit, favorisant ainsi la condensation et la formation de nuages.

c) Les mouvements d'air horizontaux : le vent

Les vents correspondent aux mouvements d'air entre ces zones, vents d'autant plus forts que les zones sont rapprochées et les écarts de pression importants. Cependant, à l'échelle atmosphérique, ces mouvements d'air ne se font pas directement des zones anticycloniques vers les zones dépressionnaires, car l'effet de la force de Coriolis crée une déviation du mouvement d'air, force vers la droite

dans l'hémisphère nord et vers la gauche dans l'hémisphère sud. Cette force, explicitée par Gustave Gaspard Coriolis en 1835, est très faible et négligeable aux petites échelles. Mais au niveau des vents cette force est déterminante, elle provoque une déviation qui entraîne l'air de l'hémisphère nord d'un mouvement horaire autour des anticyclones vers un mouvement anti-horaire autour des dépressions (figure 1-3), et dans le sens inverse dans l'hémisphère sud. Ainsi, lorsque ces deux seules forces agissent et s'équilibrent, le vent est appelé vent géostrophique et il est alors parallèle aux isobares. Mais le vent est aussi soumis aux frottements dus à la surface terrestre. La force de Coriolis diminue alors fortement proche du sol, le vent n'est donc plus géostrophique et l'air s'écoule plutôt suivant le gradient de pression dominant. Cette zone correspond à la couche limite planétaire définie précédemment.

1.2 – Structure du vent près du sol en site homogène

Loin du sol, à plus de 1000 m, les perturbations sont faibles et le vent est sensiblement parallèle aux isobares. Plus près du sol, les forces de frottement sur le sol rugueux réduisent la vitesse du vent (en valeur moyenne) et sont sources de turbulence, l'effet de cette rugosité est sensible sur plusieurs centaines de mètres. Localement, l'écoulement peut être décrit par les équations de conservation de la masse (ou équation de continuité), de conservation de la quantité de mouvement (Navier Stokes) et de conservation de l'énergie. Ces équations permettent de définir le champ de vitesse d'air U de composantes U_i , U_j , U_k . Cependant, pour simplifier l'étude de l'écoulement, il est courant dans les modèles météorologiques de décomposer les composantes du champ de vitesse d'air $U_i(M,t)$ en une composante moyennée en temps $\bar{u}_i(M)$ et une composante fluctuante $u_i'(M,t)$: Les enregistrements de vitesse de vent près du sol permettent de mettre en évidence le fait que le vent est un phénomène essentiellement instable en intensité et en direction, et variable dans le temps. Un tel caractère aléatoire est désigné sous le nom de turbulence. Dans les couches basses de l'atmosphère, la turbulence est générée par les obstacles au sol ainsi que par des instabilités d'origine thermique. Les taux de turbulence diminuent en général avec l'altitude.

Néanmoins, la vitesse instantanée doit être définie de façon statistique, elle peut être définie comme la somme d'une valeur moyenne et d'un terme fluctuant. Ainsi pour la vitesse longitudinale, on peut écrire :

$$U_i(M,t) = \bar{u}_i(M) + u_i'(M,t)$$

(1,1)

La vitesse moyenne est définie par la valeur moyenne sur le temps d'observation :

$$\bar{u}_i(M) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} U_i(M,t) \cdot dt$$

(1,2)

avec :

$U(M,t)$ la vitesse instantanée,
 $\bar{u} (M)$ la vitesse moyenne,
 $u'(M,t)$ la fluctuation.

L'établissement de la valeur moyenne est supposé indépendant du temps d'observation T dès lors que celui-ci est assez long pour être représentatif : l'opérateur moyenne est alors convergent. Dans la basse atmosphère, le temps d'observation retenu varie typiquement entre 10 minutes et une heure.

Au contact du sol, les composantes verticales et longitudinales des vitesses moyennes d'un écoulement homogène sur une surface plane deviennent nulles du fait de l'imperméabilité et de l'adhérence.

Les composantes instantanées de la vitesse $V(t)$ s'écrivent :

$$\bar{u} + u'(t), \quad \bar{v} + v'(t), \quad \bar{w} + w'(t) \quad (1,3)$$

avec

$u'(t)$ fluctuation longitudinale,
 $v'(t)$ fluctuation transversale,
 $w'(t)$ fluctuation verticale.

Quand on peut négliger les effets de stratification thermique (cas général des applications au bâtiment), on peut alors considérer que l'écoulement a une direction constante au voisinage du sol (pour une couche d'une centaine de mètres d'épaisseur). De ce fait, en orientant l'axe des x dans cette direction principale d'écoulement, la vitesse moyenne longitudinale ne varie alors qu'avec l'altitude z par rapport au sol.

Pour un écoulement permanent, en négligeant le terme de diffusion dû à la viscosité moléculaire, les équations de Navier Stokes conduisent alors à :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1.4)$$

L'équation de continuité pour un fluide incompressible s'écrit :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1.5)$$

En introduisant la décomposition de Reynolds du vecteur vitesse (equ. 1.2) dans les équations de Navier- Stokes, on obtient alors :

$$\frac{\partial (u'w')}{\partial z} = 0 \quad (1.6)$$

On peut noter ici à partir de cette équation que le débit turbulent est constant avec la hauteur. En intégrant l'équation 1.6 entre le sol ($z=0$) et la hauteur z , on obtient :

$$-u'v' = \frac{\tau_0}{\rho} \quad (1.7)$$

Où τ_0 est la contrainte de cisaillement au niveau du sol. Ce terme est généralement pris égal à Δu^2 , u représentant une échelle de vitesse appelée vitesse de friction. La décomposition de Reynolds permet ainsi d'introduire les effets de turbulence directement dans les équations des quantités moyennes. Les contraintes de Reynolds peuvent néanmoins s'exprimer en terme de vitesse moyenne de façon à fermer le système d'équations.

Le principe de fermeture au premier ordre est basé sur l'analogie entre motions turbulente et moléculaire. Localement, la vitesse fluctuante u' varie linéairement avec la vitesse de déplacement l alors que w' est du même ordre de grandeur que u' . Ceci est la théorie de longueur de mélange de Prandtl qui s'exprime par :

$$u' \cong -\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} l \quad \text{et} \quad w' = -c u' \quad (1.8)$$

où :

$$cl^2 \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)^2 = u^{*2} \quad (1.9)$$

et : $\sqrt{cl} = kz$ avec $k = 0,4$ (constante de von Karman).

La vitesse moyenne peut alors être calculée à partir de :

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = \frac{u^*}{kz} \quad (1.10)$$

La vitesse moyenne vaut zéro pour $z = z_0$ où z_0 est la hauteur de rugosité, grandeur qui définit la surface du sol.

On montre ainsi que la vitesse moyenne est une fonction logarithmique de l'altitude :

$$\bar{u}(z) = \frac{u^*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (1.11)$$

u^* et z_0 peuvent être obtenus expérimentalement. En coordonnées semi-logarithmique, le profil de vitesse est donc une droite dont la pente est k/u^* et l'ordonnée à l'origine $\ln z_0$.

Par contre les fluctuations de la vitesse d'air $u'(M,t)$ varient de façon aléatoire et il est plus facile de les étudier de façon statistique. On caractérise ces fluctuations par l'écart type σ en m/s sur la période T choisie, σ dépend de la rugosité et peut s'écrire (Gandemer 1981) :

$$\sigma = K \cdot u_{10} \quad (1.12)$$

Ces fluctuations correspondent à la turbulence déclenchée par la surface rugueuse, et on peut quantifier l'intensité de cette turbulence par un nombre adimensionnel I_z :

$$I_z = \frac{\sigma}{\bar{u}(z)} \quad (1.13)$$

Soit, d'après la loi d'évolution logarithmique de la vitesse moyenne :

$$I_z = \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (1.14)$$

La hauteur de rugosité est une caractéristique aérodynamique de la surface du sol. Pour une vitesse non perturbée identique, et une altitude identique au dessus du sol, la vitesse décroît quand la rugosité augmente. C'est une fonction de la nature du sol et de la géométrie des obstacles existant. La table 1.1 présente des valeurs obtenues pour des sites homogènes de grande extension horizontale (Wieringa, 1991).

Type de surface	Hauteur de rugosité (m)	Classe de rugosité
Mer, neige, sable	0.0005	I
Mer par grand vent	0.005	II
Herbe courte	0.01	III
Champs cultivés ouverts	0.05	IV
Plantations hautes, campagne ouverte	0.10	V
Campagne et habitat dispersé	0.25	VI
Zone urbaine périphérique	0.50	VII
Centre ville, forêt	1.00	VIII
Centre de métropoles, forêt tropicale	4.00	IX

Table 1.1: Classes et hauteur de rugosité

Une variation logarithmique de la vitesse du vent avec la hauteur au dessus du sol n'est applicable qu'à partir d'une certaine hauteur z^* où l'écoulement peut voir les irrégularités du sol. z^* correspond à l'épaisseur effective de la sous couche turbulente qui est généralement prise égale à 1,5 fois h_0 , où h_0 est la hauteur moyenne des obstacles (Sacre, 1988).

De plus, si la densité des obstacles est importante (s'ils occupent plus de 25% de la surface du sol), le niveau apparent du sol par rapport à l'écoulement doit être remonté. Ce problème est résolu en introduisant le concept de hauteur de déplacement dans la formulation du profil vertical de vitesse.

$$\bar{u}(z) = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z - d_0}{z_0}\right) \quad (1.15)$$

En première approximation, on peut prendre $d_0 = (0.7) h_0$.

Ainsi, la vitesse horizontale est usuellement décomposée en une vitesse moyenne sur une période de dix minutes à une heure et une vitesse correspondant aux fluctuations. La composante moyenne est mesurée à dix mètres du sol par les stations météorologiques qui donnent aussi l'orientation et la fréquence du vent dominant pour un site donné. La figure 1- 4 fournit un exemple de relevé.

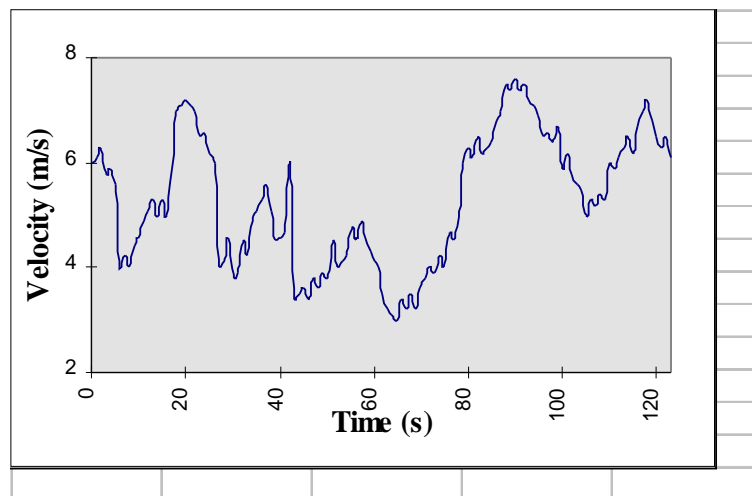


Figure 1- 4: Relevé de vitesse horizontale instantanée

La composante verticale de la vitesse dépend plutôt de phénomènes locaux et puisque la hauteur de la stratopause est faible à l'échelle du globe terrestre ce sont plutôt les mouvements horizontaux qui sont étudiés. Cependant les effets thermiques et la géométrie de surface peuvent entraîner localement des vitesses ascendantes ou descendantes non négligeables.

Les relevés de mesures météorologiques présentent les résultats sous forme d'une rose des vents (figure 1-5) qui donnent l'orientation, la vitesse et la fréquence du

vent pour un site donné et à dix mètres du sol.

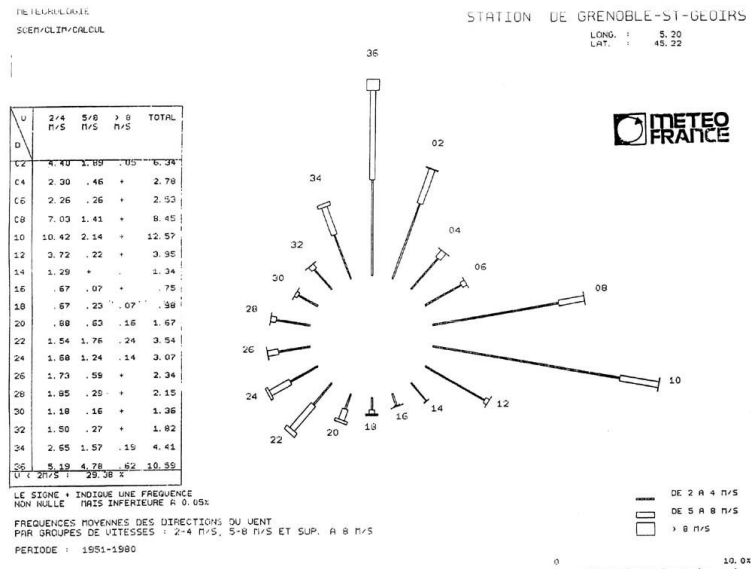


Figure 1-5 - Exemple d'une rose des vents établie à partir de relevés d'une station météorologique (Météo France)

Sur un site régulier, la rugosité est identique en tout point et la vitesse ne dépend a priori que de l'altitude du point considéré.

1.3 Le vent en site urbain

En site urbain, du fait de la rugosité variable, il se forme une couche limite urbaine (Oke, 1987) ou Urban Boundary Layer ou UBL (figure 1-6).

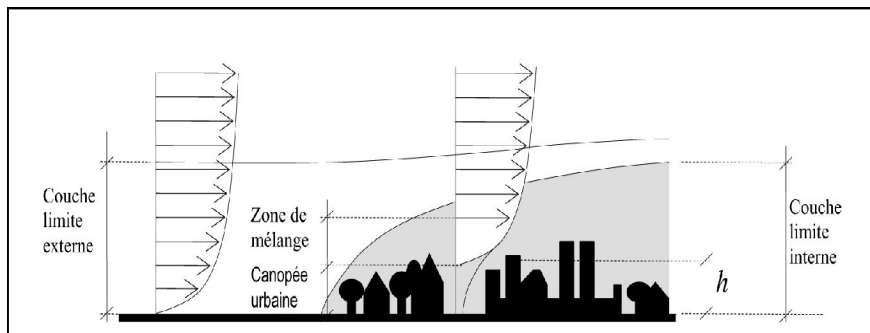


Figure 1-6: Profil moyen de la vitesse horizontale du vent dominant en site homogène et en site urbain (Plate et Kiefer, 2001)

1.4 - Les sous-couches atmosphériques en milieu urbain

Le profil moyen de vitesse d'air dû au vent dominant est différent du profil de type logarithmique généralement défini en site homogène. L'écoulement est fortement perturbé aux abords des bâtiments, mais, au-delà d'une zone appelée zone de

mélange, le profil de l'écoulement est similaire au profil moyen constaté en site homogène. Des lois empiriques établissent alors ce profil de vitesse en fonction de la rugosité du site, souvent sous forme logarithmique (Nicholson, 1975). D'après (Rotach, 1999), ce profil dépend beaucoup des axes dominants des rues canyon, même loin du sol.

De façon plus précise on peut définir plusieurs sous-couches d'écoulement à partir de cette zone de mélange, de la même façon que pour un écoulement de paroi. Cette zone d'écoulement perturbé est aussi appelée couche limite de surface, ou «surface layer» (figure 1-7), et s'étend sur plusieurs dizaines de mètres au-dessus des bâtiments. En partie haute, on définit la couche limite inertielle qui s'apparente à l'ensemble de la couche limite de surface pour les zones rurales (Rotach, 1999). Dans la partie basse de la couche limite, l'écoulement est perturbé par des turbulences et des écoulements secondaires verticaux ou transversaux, par rapport à l'écoulement principal, cette zone est appelée sous couche limite rugueuse ou «Roughness Sublayer» et sa limite est notée z_R . En pratique, cette limite est mal définie en zone urbaine ou périurbaine du fait de l'écoulement tridimensionnel et fortement variable provoqué par la forte irrégularité de la rugosité, z_R est donc difficile à définir en échelle réelle.

Dans la couche limite sous la «canopée urbaine» ou Urban Canopy Layer (UCL), de hauteur moyenne z_H , la vitesse moyenne de l'écoulement dominant diminue fortement. La hauteur z_d est définie pour une vitesse moyenne horizontale quasiment nulle. La vitesse de référence u_{10} est alors définie pour une hauteur de 10 mètres au-dessus de cette hauteur de déplacement nul z_d .

Près de ce plan de déplacement nul, de manière analogue à l'écoulement sur un site homogène, on définit une sous-couche limite visqueuse dont la limite se situe à une hauteur $z_0 + z_d$. Le «nombre de Jensen» associé z_H / z_0 est l'un des paramètres d'échelle principaux dans les études aérauliques.

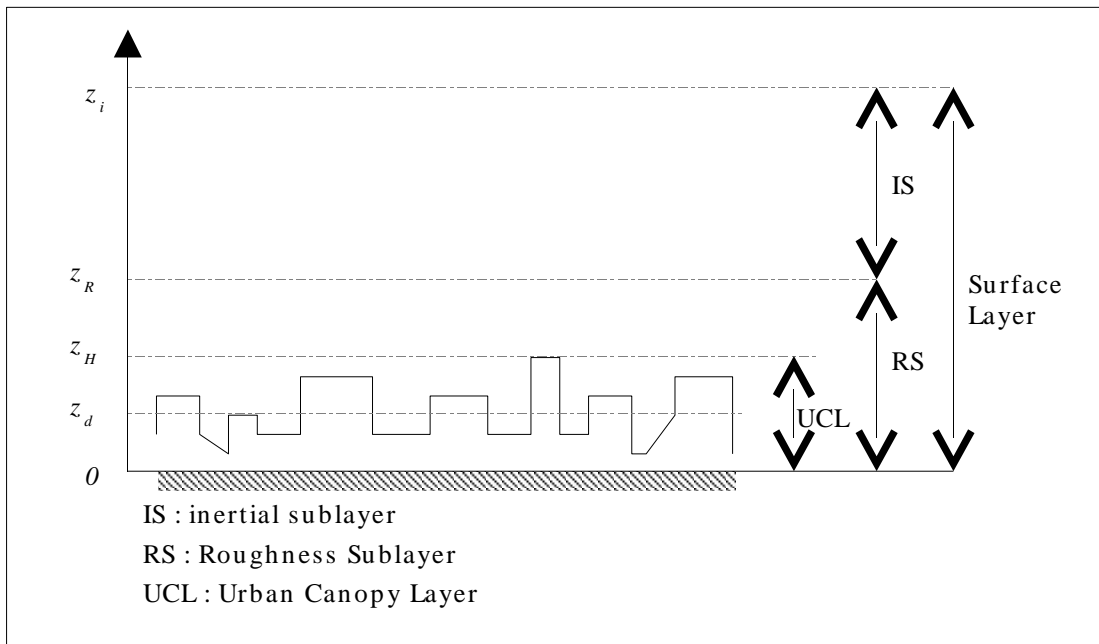


Figure 1-7: Répartition verticale des différentes couches de circulation d'air au-dessus d'un milieu urbain, d'après (Rotach, 1999)

Pour la zone qui correspond à notre étude, au niveau des bâtiments, beaucoup de phénomènes interviennent et une étude thermo- aéraulique locale plus détaillée est alors nécessaire.

2 – Effet du vent sur les bâtiments

Les écoulements d'air autour des bâtiments peuvent affecter la sécurité des travailleurs, le confort des usagers ainsi que le bon fonctionnement des équipements, notamment les systèmes de ventilation et de protection contre les nuisances des ambiances extérieures. L'effet direct du vent sur un bâtiment est lié à la structure même des écoulements principaux et secondaires qui vont créer des champs de pression hétérogènes et variables autour des bâtiments. Ces écoulements peuvent causer des désordres dans le bon fonctionnement des systèmes couplés au bâtiment, notamment ceux qui assurent son contrôle climatique et sa ventilation.

L'écoulement dans la sous-couche visqueuse est dominé par la viscosité. Si l'écoulement frappe un angle tel que le coin d'un bâtiment, un phénomène de séparation a lieu aussi tôt. Pour les bâtiments rectangulaires, l'effet du nombre de Reynolds sur ce phénomène est extrêmement faible car il n'est plus le paramètre qui pilote la séparation (Aynsley, Melbourne & Vickery 1977).

2.1 - Distribution de pression sur les bâtiments

a) Notion de pression dynamique ou pression d'arrêt

Pour un écoulement libre, la relation entre la pression et la vitesse d'une ligne de courant peut être obtenue simplement par l'équation de Bernouilli. Si la masse volumique est constante, on obtient :

$$P_{\text{stat}} + 0.5 \rho v^2 = \text{Cste.} \quad (2.1)$$

Le terme $0.5 \rho v^2$ est appelé pression dynamique P_{dyn} ou pression d'arrêt et représente la pression qui serait exercée par la ligne de courant sur un obstacle infiniment petit qui s'opposerait à celle ci sans perturber l'écoulement.

b) Définition des coefficients de pression

Si l'obstacle n'est pas infiniment petit, on constate expérimentalement que la pression réelle $P(M)$ exercée par l'écoulement sur un point $M(x,y,z)$ de celui-ci est directement proportionnelle à la pression dynamique du fluide :

$$P(M) - P_0 = C_p P_{\text{dyn}} \quad (2.2)$$

où P_0 est la pression atmosphérique de référence au niveau du sol.

P_{dyn} étant choisi comme pression dynamique pour une certaine hauteur de référence z_{ref} , pour une direction donnée de vent on obtient :

$$P_{\text{dyn}}(z_{\text{ref}}) = 0.5 \rho v^2(z_{\text{ref}}) \quad (2.3)$$

par façade ou sur la verticale centrale d'une façade, mais est encore trop limitée pour répondre à la diversité des situations architecturales.

Durant le projet COMIS et le projet PASCOOL, une analyse de régression des coefficients C_p a été réalisée et un code appelé CPCALC+ (Grosso, 1994) a été développé. On a utilisé à l'époque des données fournies par la littérature et des expérimentations spécifiques réalisées à cet effet (Saraiva and Da Silva 1993,1994). Toute cette base de données a alors été analysée pour définir les paramètres de corrélation étudiés, leur variation, la reproductibilité des tests, etc....

La régression proposée alors pour les C_p conduit à une formulation en fonction de paramètres caractérisant l'environnement, l'incidence du vent et le bâtiment lui-même. En procédant ainsi on a obtenu un utilitaire CPCALC+ qui permet de fournir les coefficients de pression pour une large base de configurations. Cependant, ce travail ne peut prétendre à l'exhaustivité, et dans des circonstances spécifiques, les coefficients de pression ne peuvent bien souvent être obtenus que par des essais en soufflerie.

3 – Prédiction des transferts aérauliques dans les bâtiments

Dans l'étude des phénomènes de transfert de masse ou de chaleur dans les bâtiments, les transferts aérauliques jouent un rôle essentiel. L'air étant souvent le vecteur principal d'énergie ou de pollution dans les bâtiments, les transferts aérauliques à l'intérieur d'un bâtiment vont souvent conditionner la gestion énergétique réelle de celui-ci, mais aussi la qualité de l'air et le confort des occupants. Leur prédiction devient de ce fait un des problèmes principaux et on est alors confronté à deux problèmes complémentaires, la prédiction des transferts aérauliques entre le bâtiment et son environnement d'une part, et de façon plus détaillée, la prévision des transferts aérauliques entre les différentes pièces ou zone d'un bâtiment d'autre part.

De façon à décrire ces transferts de masse à l'intérieur d'un bâtiment, on va définir une variable d'état, la pression, qui sera une caractéristique de chaque zone comme sa température ou sa concentration en un élément polluant, et on va exprimer les transferts aérauliques entre zones sur la base de relations empiriques fournissant le débit en fonction des écarts de pression entre zones connexes.

3.1 - Les phénomènes moteurs

Pour un fluide incompressible et non visqueux en écoulement permanent, l'équation de conservation de quantité de mouvement longitudinale, intégrée le long d'une ligne de courant se réduit à expression simple appelée équation de Bernouilli :

$$1/2 \rho V^2 + P + \rho g z = Cste \quad (3.1)$$

Cette formulation est celle qui est en général retenue pour modéliser les transferts aérauliques dans les bâtiments. L'étape suivante consiste à définir précisément les phénomènes moteurs qui vont générer les transferts aérauliques. Outre les systèmes mécaniques de ventilation ou de climatisation, les transferts aérauliques résultent essentiellement des effets du vent sur les bâtiments et des effets de tirage thermiques résultant des hétérogénéités des masses volumiques au sein d'un bâtiment.

a) Effet du vent

Comme nous l'avons déjà décrit dans le paragraphe précédent, le vent va générer sur les bâtiments des champs de pression non uniformes qui vont varier avec son intensité et sa direction. On calcule ces pressions locales en corrigeant la pression dynamique du vent à l'aide d'un coefficient multiplicateur, le coefficient de pression C_p qui, en toute rigueur, dépend de la position sur le bâtiment, des caractéristiques du vent approchant, mais aussi de la définition de la pression dynamique de référence :

$$P_s = C_p P_v \quad (3.2)$$

avec :

$$P_v = 0,5 \rho V_H^2 \quad (3.3)$$

où V_H est la vitesse moyenne du vent non perturbé par la présence du bâtiment prise à une hauteur de référence (souvent la hauteur du bâtiment) et ρ la masse volumique de l'air extérieur qui dépend essentiellement de la pression atmosphérique, de la température et de l'humidité de l'air. On peut ainsi construire, pour toutes les surfaces extérieures du bâtiment, le champ de pression fluctuant avec le vent, qui va représenter l'effet de celui-ci sur le bâtiment.

b) Effet de tirage thermique

Un autre phénomène physique qui influence les infiltrations et les transferts aérauliques entre zones d'un bâtiment est le phénomène de tirage thermique dû aux différences de densité de l'air entre deux zones voisines liées à leur différence de température ou de teneur en eau.

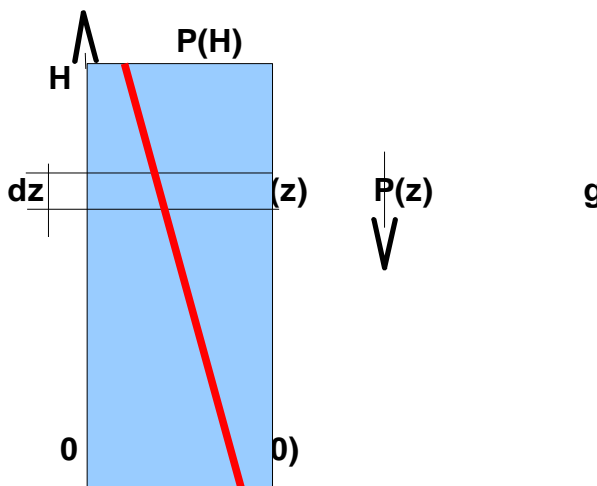


Figure 3-1 : Variation de pression hydrostatique au sein d'un fluide

Le phénomène physique de base est ici la pression hydrostatique due à l'air. Dans un fluide au repos, soumis à un champ de gravité g , la pression élémentaire due à une couche de fluide d'épaisseur dz s'écrit :

$$dP = -\rho g dz \quad (3.4)$$

d'où:

$$P(z) = -\rho g \left[z \right]_0^z \quad (3.5)$$

ou encore

$$P(z) = P_0 - \rho g z \quad (3.6)$$

c) Différence de pression hydrostatique entre deux milieux M et N

La figure 3-2 représente un orifice reliant deux ambiances à pressions hydrostatiques différentes.

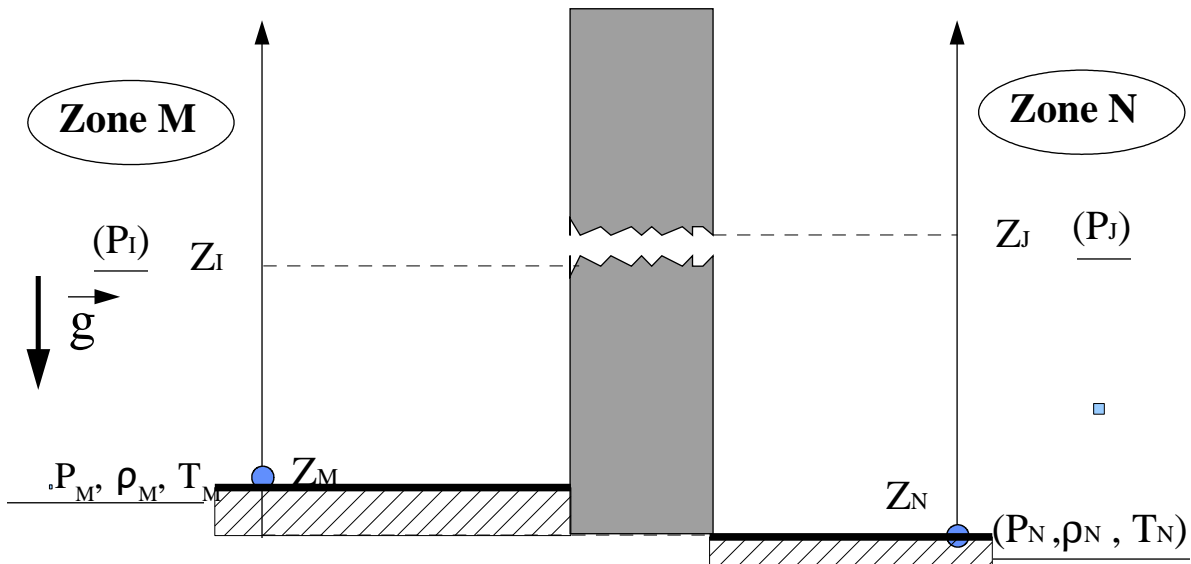


Figure 3-2: Tirage thermique entre deux milieux à travers un orifice

Les altitudes de référence de chaque milieu sont respectivement z_M et z_N , les pressions, températures et masse volumiques de référence sont P_M , T_M , ρ_M et P_N , T_N , ρ_N . Les altitudes relatives dans chaque milieu de l'orifice sont z_i et z_j .

La différence de pression entre les deux milieux au niveau de l'orifice est donnée directement par $P_i - P_j$ qui peut s'écrire en utilisant la pression de référence de chaque zone :

$$P_i - P_j = P_M - P_N + P_{st} \quad (3.7)$$

où P_{st} représente la différence de pression due au tirage thermique :

$$P_{st} = \rho_M g (z_M - z_i) - \rho_N g (z_N - z_j) \quad (3.8)$$

En général, la variation de la masse volumique est due à la température :

$$\rho(T) = \rho(T_0) (1 - \beta(T - T_0)) \quad (3.9)$$

Cependant dans certaines applications, la variation de masse volumique peut aussi être due à la présence d'une espèce chimique (par exemple la vapeur d'eau) dont la

concentration va influencer de façon significative sur la masse volumique de l'air.

3.2 - Les équations de débit

a) Cas d'un orifice théorique ne perturbant pas l'écoulement

Ce premier cas correspond au cas général des petits orifices où l'air ne peut circuler que dans un seul sens.

En considérant tout d'abord un tube de courant en état stationnaire, la chute de pression est proportionnelle au carré de la vitesse du fluide :

$$P_i - P_j = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (3.10)$$

A partir de cette expression, on obtient aisément le débit dans le tube de courant :

$$m' = \rho A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (3.11)$$

Où A représente la section droite du tube de courant.

b) Débit dans un orifice réel

En fait le débit est objectivement affecté par les caractéristiques géométriques de l'orifice et les effets visqueux au sein du fluide. Pour une configuration géométrique simple, il est possible d'introduire un coefficient de décharge C_d qui est relatif à l'orifice lui-même et qui permet d'obtenir le débit réel traversant l'orifice à partir du débit théorique qui passerait à travers un tube de courant théorique de même section :

$$m' = C_d \rho A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (3.12)$$

De plus, on constate que pour les fissures ou des orifices de géométrie complexe (ou pour des groupes de fissures), la dépendance du débit à la chute de pression est encore plus complexe. On a l'habitude de représenter cette dépendance par une loi empirique en puissance de la chute de pression. On écrit alors :

$$m' = K \Delta P^n \quad (3.13)$$

L'exposant n varie entre 0.5 (écoulement turbulent développé à travers un orifice unique) et 1 (écoulement laminaire dans un milieu poreux).

Le coefficient K inclut dans sa définition les caractéristiques géométriques de

l'orifice, les pertes de charge ainsi que la modification des lignes de courant au passage de celui-ci. Il peut être interprété physiquement comme le débit dû à une chute de pression unitaire. Il est défini par la mesure.

c) Cas particulier des grandes ouvertures verticales

Les grandes ouvertures se caractérisent essentiellement par le fait qu'elles peuvent être le siège de deux écoulements de sens opposé simultanément.

Pour représenter le comportement aérodynamique des grandes ouvertures, nous pouvons utiliser directement les modèles proposés précédemment pour prendre en compte les effets dynamiques du vent et les effets de tirage thermique de part et d'autre de l'ouverture. Pour intégrer le comportement de telles ouvertures, il convient alors d'évaluer les champs de pression de part et d'autre de celles-ci. On peut ainsi représenter une grande ouverture par une discrétisation en ouvertures élémentaires de hauteur h suffisamment petites pour que les hypothèses utilisées précédemment pour les ouvertures simples demeurent admissibles. Cette méthode a été utilisée par le passé dans plusieurs codes aérodynamiques (Walton, 1982, Roldan, 1985).

La deuxième solution a été de chercher une solution analytique qui permette, comme pour les ouvertures simples, de définir une loi d'écoulement pour les grandes ouvertures. Nous considérerons dans un premier temps le problème de référence d'une grande ouverture verticale reliant deux zones d'un bâtiment (nous ne prendrons en compte que les effets de poussée). De nombreux auteurs (Allard & Utsumi, 1992) ont traité ce problème représenté par la figure 3-3.

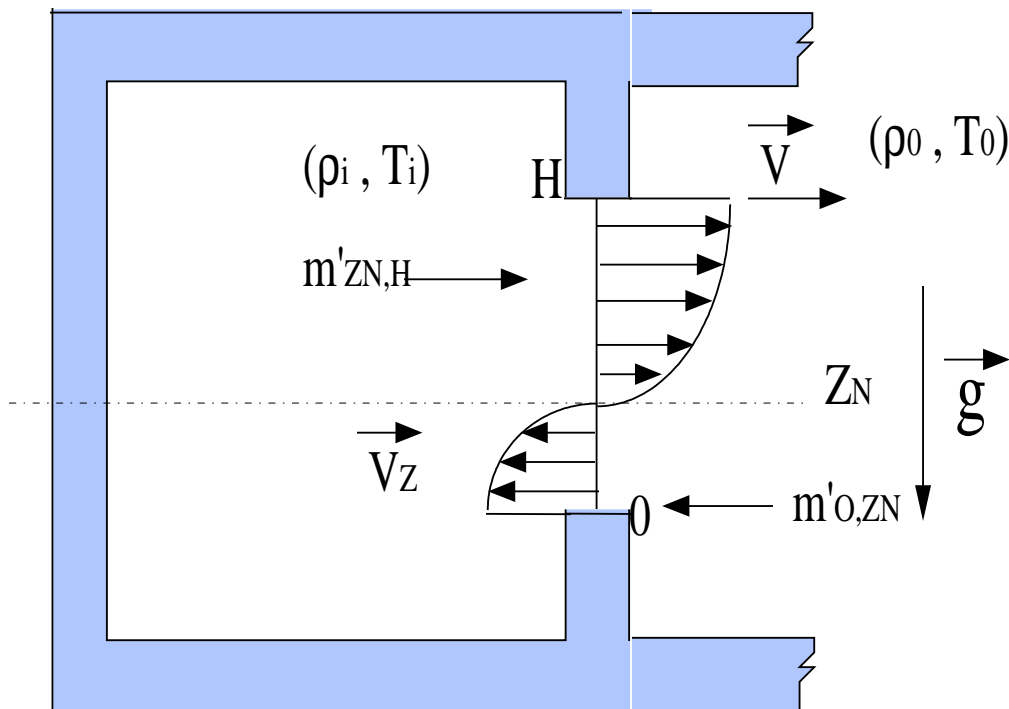


Figure 3-3: Problème de référence d'écoulement gravimétrique à travers une grande

ouverture verticale

Pour un fluide incompressible, non visqueux et pour un écoulement permanent, en utilisant l'équation de Bernoulli, et en prenant comme origine des pressions l'axe neutre, la vitesse horizontale V_z le long d'une ligne de courant située à une hauteur z par rapport à l'axe neutre est donnée par :

$$V_z = \left[2 \left(\frac{\rho_0 - \rho_i}{\rho_0} \right) g z \right]^{0,5} \quad (3.13)$$

Si Z_n est la position de l'axe neutre, le débit massique entrant en dessous de l'axe neutre peut alors être calculé en intégrant ce profil de vitesse entre 0 (position de l'axe neutre) et Z_n (position du bas de l'ouverture par rapport à l'axe neutre) :

$$m'_{0,Z_n} = Cd \int_0^{-Z_n} \rho_0 V_z W dz \quad (3.14)$$

Dans cette équation, Cd représente le coefficient de décharge de l'ouverture, coefficient empirique qui prend en compte la contraction des lignes de courant ainsi que les effets de frottements visqueux provoqués par la présence de l'ouverture.

De même le débit massique sortant au dessus de l'axe neutre serait donné par :

$$m'_{Z_n, H-Z_n} = Cd \int_{Z_n}^{H-Z_n} \rho_i V_z W dz \quad (3.15)$$

Pour trouver la position de l'axe neutre, il suffit d'écrire le bilan de masse. Dans le cas de la cavité supposée ici fermée, on obtient alors :

$$\frac{Z_n}{H - Z_n} = \left(\frac{\rho_i}{\rho_0} \right)^{1/3} \quad (3.16)$$

Finalement l'intégration conduit au débit sortant :

$$m'_{0,Z_n} = Cd \frac{W}{3} (8 g H^3 \rho_i \Delta \rho)^{0,5} \quad (3.17)$$

$$\text{avec } \rho'_i = \frac{\rho_i}{\left[1 + \left(\frac{\rho_i}{\rho_0} \right)^{1/3} \right]^3} \quad (3.18)$$

3.3 – Equation de conservation de la masse

Dans des conditions stationnaires, l'équation de conservation de la masse doit alors s'écrire dans chaque zone ou pièce du bâtiment définie par une pression de référence.

$$m'_{vent} + \sum_{k=1}^{Nk} m'_k = 0 \quad (3.19)$$

où Nk représente le nombre total de liaisons aérauliques de la pièce avec les environnements voisins, m'_{vent} représente un débit massique extrait résultant par exemple d'un extracteur mécanique et m'_k est le débit massique perdu par la zone à travers l'orifice k .

4 - Modélisation des transferts aérauliques

4.1 – Modélisation par les méthodes nodales

Pour résoudre des problèmes concrets tels que les effets combinés du vent et du tirage thermique, on utilise fréquemment une représentation des champs de pression à l'aide de modèles analogiques tels que représentés figure 4-1 (Ghiaus et alii, 2004) où chaque zone est caractérisée par une pression de référence et un gradient hydrostatique de pression.

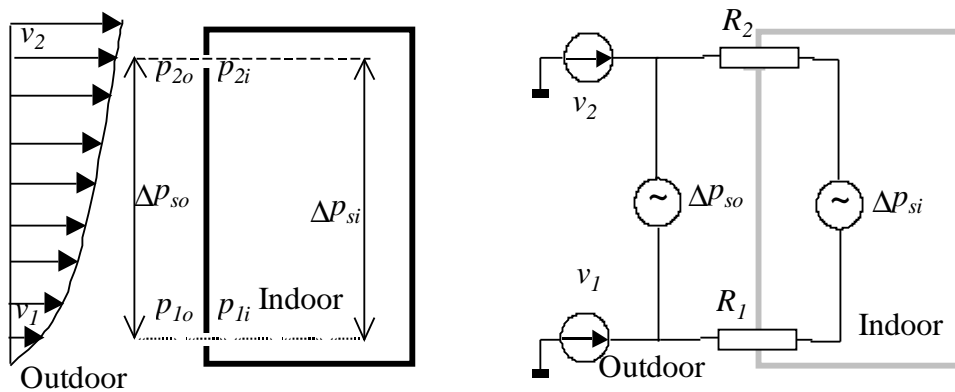


Figure 4-1 : Modélisation des effets combinés du vent et du tirage thermique a) Bâtiment, b) Schéma analogique

Par convention, la chute de pression est positive de l'intérieur vers l'extérieur :

$$\Delta p_s = p_i - p_o \quad (4.1)$$

où p_i et p_o sont les pressions à l'intérieur du local et à l'extérieur au niveau de chaque orifice. A partir de 4.1, et en introduisant la variation de pression hydrostatique dans chaque ambiance, on peut écrire :

$$\Delta p_s = (p_{ri} - p_{ro}) + \rho_o \left(1 - \frac{T_o}{T_i} \right) gh \quad (4.2)$$

Dans l'expression 4.2, les indices i et o correspondent respectivement aux ambiances intérieures et extérieures. Compte tenu des différences de température des deux ambiances, la variation de pression hydrostatique sera différente pour chacune d'entre elles, ainsi que les pressions de référence p_r . De plus, à l'extérieur, l'effet du vent sur le bâtiment peut conduire à une pression additionnelle proportionnelle à la pression dynamique. Sans considérer dans un premier temps l'effet du vent, on peut déterminer à partir des profils de pression statique, le niveau où la différence de pression entre les deux ambiances sera nulle. Ce niveau est appelé axe neutre. En exprimant alors les pressions intérieures et extérieures par rapport à la position de l'axe neutre h_{NPL} , on obtient une nouvelle expression de la

différence de pression :

$$\Delta p_s = \rho_o \left(1 - \frac{T_o}{T_i} \right) g (h - h_{NPL}) \quad (4.3)$$

La figure 4-2 montre la variation de Δp_s avec la hauteur pour différentes configurations de pression statique intérieure et extérieure qui conduisent à différentes positions de l'axe neutre.

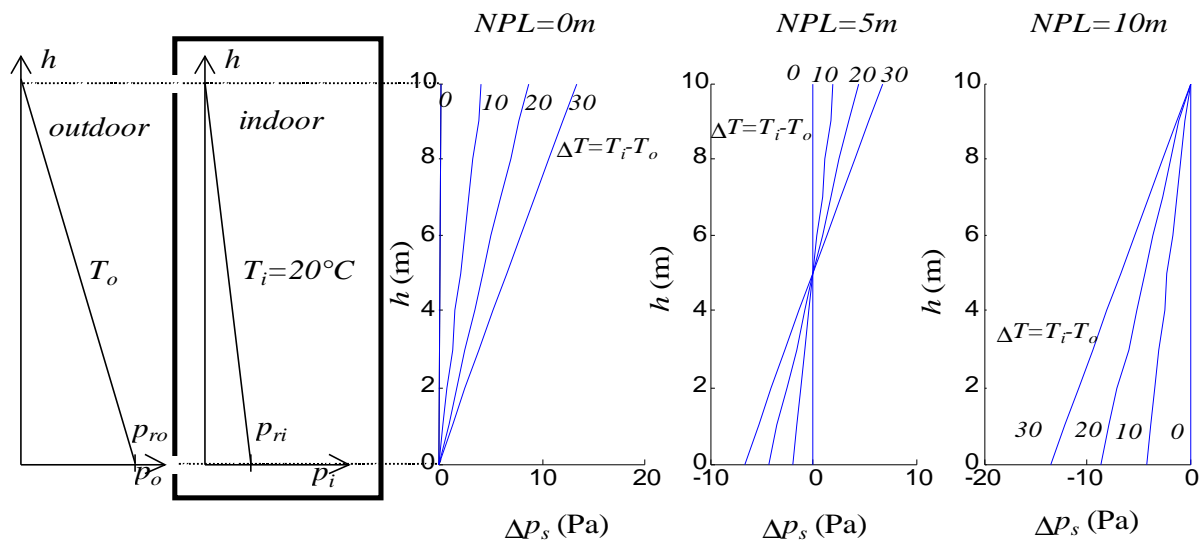


Figure 4-2: Variation de pression hydrostatique et positionnement de l'axe neutre

De nombreux modèles basés sur cette définition des pressions de référence par zone, des variations hydrostatiques de pression et des lois d'écoulements présentées au chapitre 3 ont été développés, on peut citer :

COMIS <http://www-epb.lbl.gov/comis/>
 CONTAM <http://www.bfrl.nist.gov/IAQanalysis/>
 AIOLOS http://www.jxj.com/catofpub/natural_ventilation_buildings.html
 ESP-r <http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm>

Tous ces modèles utilisent finalement les mêmes types d'hypothèses : ils modélisent le bâtiment en un certain nombre de zones pour lesquelles les variables d'état telles que la température, l'humidité relative et la masse volumique de l'air sont connues à chaque pas de calcul. Chaque orifice ou élément perméable séparant deux ambiances de caractéristiques distinctes est alors représenté par une équation de débit du type de celles développées au chapitre 3. La définition des profils de pression dans chaque zone conduit alors à exprimer les équations de débit en fonction des pressions de référence de chaque zone. Par la suite, l'écriture pour chaque zone de la conservation de la masse conduit alors à l'écriture d'un système non linéaire en pression où les inconnues sont les pressions de référence. Une fois

résolu, ce système fournit pour l'ensemble du bâtiment les pressions de référence de chaque zone qui permettent alors le calcul explicite des transferts aérauliques instantanés pour l'ensemble de l'édifice.

4.2 Modèles empiriques

Les modèles que nous avons introduits précédemment sont toutefois un peu lourds à utiliser, aussi de nombreux auteurs ont-ils par le passé développé des modèles empiriques pour évaluer les débits d'air traversant divers orifices. Nous fournissons dans le tableau suivant un certain nombre de ces modèles.

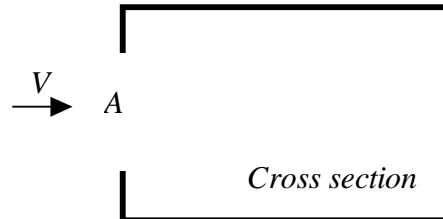
Tableau 1 Modèles empiriques pour la ventilation naturelle (BS_5925 1980; Allard 1998)

Ventilation à simple exposition

Effet du vent:

$$Q = 0.025AV$$

Où A est la surface de l'ouvrant et V la vitesse du vent incident.



Tirage thermique du à la présence de deux ouvertures sur la même façade:

$$Q = C_d A \left[\frac{\varepsilon \sqrt{2}}{(1 + \varepsilon)(1 + \varepsilon^2)^{1/2}} \right] \left(\frac{\Delta T g H_1}{\bar{T}} \right)^{1/2}$$

où $\varepsilon = A_1 / A_2$,

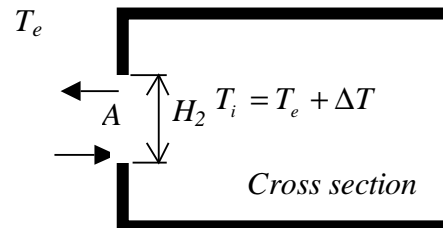
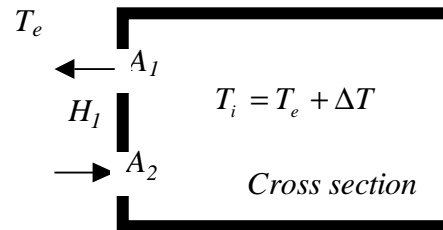
$$A = A_1 + A_2,$$

$$\bar{T} = (T_i + T_e) / 2$$

Cd est le coefficient de décharge de l'ouverture

Ventilation due au tirage thermique pour une seule ouverture en façade:

$$Q = C_d \frac{A}{3} \sqrt{\frac{\Delta T g H_2}{\bar{T}}}$$



Ventilation traversante

Ventilation due au vent

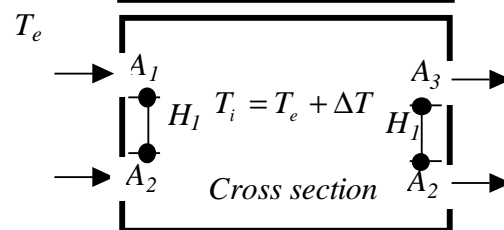
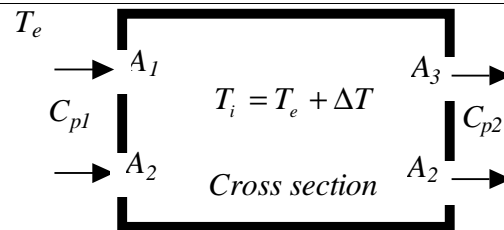
$$Q_w = C_d A_w V \sqrt{\Delta C_p}$$

avec $\frac{1}{A_w^2} = \frac{1}{(A_1 + A_2)^2} + \frac{1}{(A_3 + A_4)^2}$

Ventilation due au tirage thermique

$$Q_b = C_d A_b \left(\frac{2 \cdot \Delta T \cdot g \cdot H_1}{\bar{T}} \right)$$

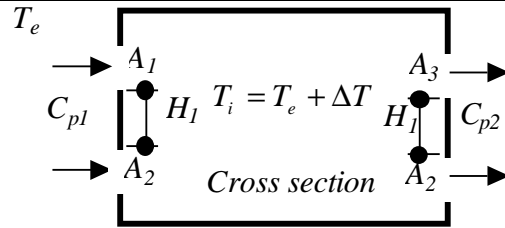
avec $\frac{1}{A_b^2} = \frac{1}{(A_1 + A_3)^2} + \frac{1}{(A_2 + A_4)^2}$



Effets combinés du vent et du tirage thermique:

$$Q = Q_b \text{ pour } \frac{V}{\sqrt{\Delta T}} < 0.26 \sqrt{\frac{A_b}{A_w} \frac{H_1}{\Delta C_p}}$$

$$Q = Q_w \text{ pour } \frac{V}{\sqrt{\Delta T}} > 0.26 \sqrt{\frac{A_b}{A_w} \frac{H_1}{\Delta C_p}}$$


4.3 Stratégies pour la ventilation naturelle

Les deux forces motrices principales utilisables pour la ventilation naturelle sont l'effet du vent sur les bâtiments et des effets de tirage thermique dus aux différences de masse volumiques engendrées dans un bâtiment, le plus souvent par des champs thermiques hétérogènes soumis à l'action de la pesanteur. Ces deux forces motrices peuvent être utilisées de façon couplée, mais le plus souvent les concepteurs essaient par la définition du bâtiment de privilégier l'une ou l'autre d'entre elles. Le choix dépend beaucoup du type de bâtiment, de sa compacité, mais aussi des conditions locales de climat et de vent, du site d'implantation du bâtiment. Sans prétendre être exhaustifs, nous présentons à la suite différentes stratégies de ventilation naturelle.

a) Ventilation à simple exposition

Pour la plupart des gens, la ventilation naturelle est associée à l'ouverture des fenêtres de façon à laisser l'air pénétrer naturellement dans les pièces. Ce mode de ventilation est d'ailleurs le plus naturel et demeure encore aujourd'hui certainement le plus utilisé, notamment dans les pays à climat tempéré et chaud où la ventilation naturelle est le premier mode de conditionnement des espaces (figure 4-3 a). Le débit d'air circulant à travers l'ouvrant est dû aux effets combinés du vent et du tirage thermique. Le vent se caractérise comme nous l'avons dit précédemment par une composante moyenne de vitesse et des fluctuations. Dans le cas de la simple exposition, ce sont essentiellement les fluctuations qui interviennent pour créer un effet de pompage, mais l'effet dominant est souvent le tirage thermique. Si la température intérieure est supérieure à l'extérieure, l'effet de tirage thermique entraîne l'air extérieur plus froid (et donc plus lourd) dans les parties basses des ouvrants alors que l'air intérieur plus chaud (et donc plus léger) va sortir en partie supérieure des ouvrants. Un modèle empirique permettant l'évaluation des débits de renouvellement d'air dans cette configuration a été proposé par De Gidds et Phaff (deGidds and Phaff 1982) :

$$v_{eff} = (c_1 v_r^2 + c_2 H \cdot \Delta T + c_3)^{1/2} \quad (4.4)$$

où c_1 ($c_1 \approx 0.001$) est un coefficient adimensionnel fonction du type d'ouvrant, c_2 et c_3 sont des coefficients affectant le tirage thermique et l'effet du vent ($c_2 \approx 0.0035$, $c_3 = 0.01$), v_r (m/s) est la vitesse moyenne du vent, H (m) est la hauteur de l'ouvrant et ΔT (K) est l'écart moyen de température entre l'intérieur et l'extérieur.

Le débit volumique d'air à travers l'ouvrant est :

$$Q = 0.5A_w v_{eff} \quad (4.5)$$

où A_w est l'aire effective de l'ouvrant

Les recommandations du BRE (Building Research Establishment) conduisent pour cette configuration à une surface d'ouvrant correspondant à 1/20 de la surface du plancher, une hauteur d'ouvrant d'au moins 1.5 m, et une profondeur maximum de la pièce à ventiler de 2.5 fois la hauteur sous plafond (BRE_Digest_399 1994).

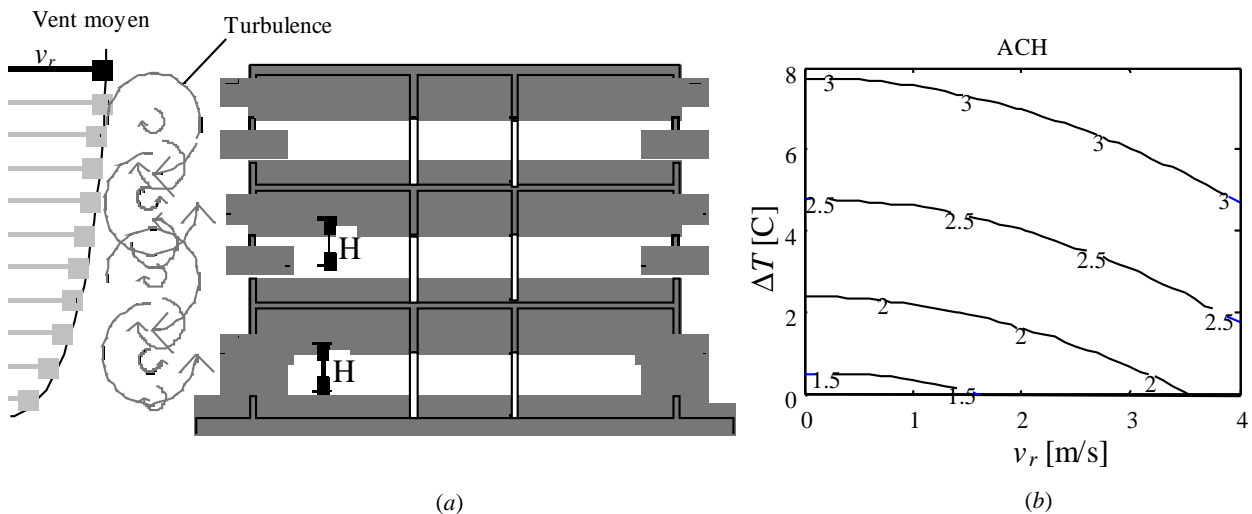


Figure 4-3 a) Ventilation à simple exposition due au vent (Axley 2001). b) Taux de renouvellement d'air pour une pièce de 2.7m de hauteur avec des fenêtres ouvertes de 1.5m de hauteur et une surface d'ouvrant représentant 1/20 de la surface de plancher

Considérons un bureau de hauteur $h = 2.75m$, comprenant une fenêtre de hauteur $H = 1.5m$, et une surface total d'ouvrant de 1/20 de la surface de plancher, $A_w = A/20$. Le volume de la pièce est alors: $V = whl = 2.5h \cdot A$. Le débit de renouvellement d'air à travers la fenêtre est de: $Q = 0.5A_w v_{eff}$. Le taux de renouvellement d'air ACH est alors de : $Q = ACH / 3600 \cdot V$

$$ACH = \frac{3600}{V} \cdot 0.5A_w v_{eff} = \frac{3600}{2.5h} \cdot \frac{0.5}{20} \cdot v_{eff} \quad (4.5)$$

La dépendance de ACH vis à vis de la vitesse du vent v_{eff} et de l'écart moyen de température ΔT est montré figure 4-3-b. Si la différence de température entre l'ambiance intérieure et l'extérieur est faible, le débit de renouvellement d'air demeure faible. La ventilation à simple exposition est donc une stratégie peut

dépendante du vent moyen et elle ne sera pas très efficace si l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur demeure limité (cas des périodes chaudes) ou alors cette stratégie nécessitera de grandes surfaces d'ouvrants. C'est souvent cette dernière solution qui est appliquée dans les climats relativement chauds pour des immeubles de compacité importante ne permettant pas l'utilisation de la ventilation traversante.

La figure 4- 4 présente un bâtiment de ce type construit dans une zone tropicale.



Figure 4- 4: Solution de ventilation naturelle à simple exposition en climat tropical

b) Ventilation traversante

L'effet du vent sur un bâtiment se traduit par des pressions positives sur les façades au vent et au contraire des dépressions sur les façades sous le vent, créant ainsi un écart de pression significatif à travers l'ensemble du bâtiment qui conduit à l'établissement d'un débit d'air traversant dès lors que les façades sont perméables. On appelle ventilation traversante le scénario d'écoulement résultant de cette configuration, où l'air entre par une façade, traverse l'ensemble du bâtiment et ressort par une façade opposée (Figure 4- 5- a).

La pression positive exercée sur la façade au vent p_{ww} et la dépression subie par la façade sous le vent p_{bw} sont en fait des différences de pression par rapport à la pression extérieure de référence qui sont proportionnelles à la pression dynamique du vent et aux coefficients de pression correspondant au scénario d'exposition considéré. Bien que le vent varie très rapidement en vitesse et en intensité, on utilise en général des valeurs moyennes sur des périodes d'une dizaine de minutes pour caractériser ces phénomènes. On obtient alors directement :

$$p_{ww} = C_{p-ww} \left(\frac{\rho v_r^2}{2} \right) \quad p_{wl} = C_{p-lw} \left(\frac{\rho v_r^2}{2} \right) \tag{4.6}$$

où ρ est la masse volumique de l'air extérieur, $\rho v_r^2 / 2$ est la pression dynamique où pression d'arrêt, et $C_{p-ww} > 0$, $C_{p-lw} < 0$ sont les coefficients de pression applicables à la façade au vent et à la façade sous le vent pour le scénario considéré. La pression de référence du vent moyen est souvent prise à une hauteur de 10 m correspondant à des mesures météorologiques usuelles. La chute de pression entre les deux façades s'écrit alors :

$$\Delta p_w = p_{ww} - p_{wl} = (C_{p-ww} - C_{p-lw}) \frac{\rho v_r^2}{2} \tag{4.7}$$

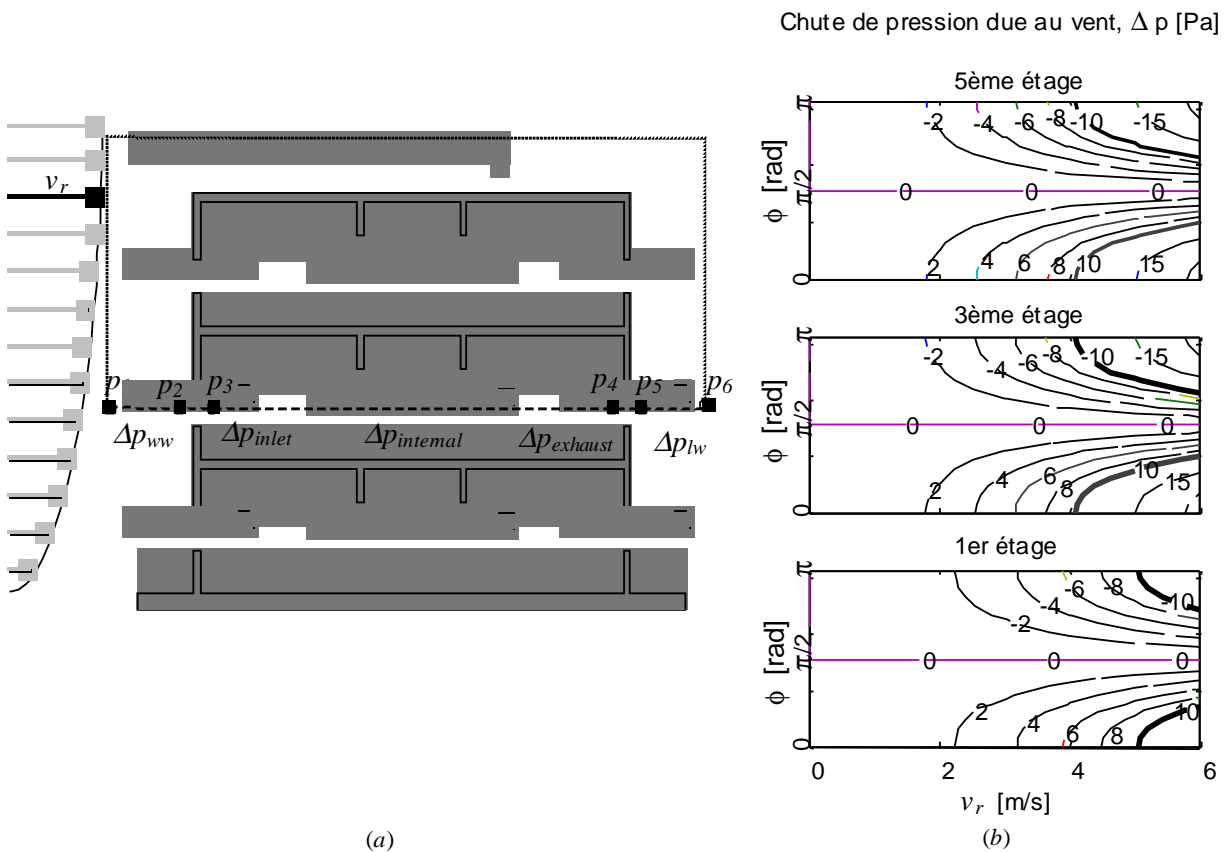


Figure 4- 5: Ventilation traversante. a) Chute de pression associée à la ventilation traversante, (Axley 2001). b) Chute de pression pour un bâtiment cubique isolé

Considérons par exemple la chute de pression le long d'un tube de courant d'air traversant le bâtiment de la figure 4- 5- a :

$$\Delta p_w = \Delta p_{inlet} + \Delta p_{interval} + \Delta p_{exhaust} \tag{4.8}$$

Dans des conditions classiques de dimensionnement, la vitesse moyenne de référence pour le vent est prise égale à 4 m/s, le coefficient de pression de la façade au vent est pris égal à +0.5, et -0.5 pour la façade sous le vent. La masse volumique de l'air à température ambiante (environ 20°C) est prise égale à 1.2 kg/m³. Ainsi, on peut attendre dans cette configuration une chute de pression à travers le bâtiment d'environ 10 Pa :

$$\Delta p_w = (C_{p-wv} - C_{p-sv}) \frac{\rho U_{ref}^2}{2} \approx ((+0.5) - (-0.5)) \frac{1.2 \text{ kg/m}^3 (4 \text{ m/s})^2}{2} = 9.6 \text{ Pa} \quad (4.9)$$

Evidemment, une chute de pression de 10 Pa peut paraître faible par rapport aux différences de pression procurées par des ventilateurs ou autres systèmes mécaniques qui sont parfois supérieures de un ou deux ordres de grandeurs. C'est une des raisons pour lesquelles il sera nécessaire de réduire les pertes de charges intérieures au bâtiment pour favoriser cette stratégie en prévoyant également de larges communications entre les espaces intérieurs. On réservera ainsi cette stratégie à des bâtiments de faible épaisseur totale. Cette technique est de ce fait tout à fait appropriée aux maisons individuelles ou aux petits immeubles tertiaires ou d'habitation.

Ce schéma très simple de ventilation naturelle est cependant très dépendant des ressources locales en vent. Le vent étant très variable en intensité et en direction, cette stratégie est pénalisée dans des sites où la direction de vent n'est pas stable. L'exemple de la figure précédente (figure 4.5- b) pour un bâtiment R+5 illustre bien ce phénomène : on n'atteint $\Delta p \approx 10 Pa$ que pour un nombre limité d'orientations. La variabilité directionnelle du vent peut conduire à l'installation de dispositifs spécifiques telles que des bouches autoréglables, des systèmes de captage du vent ou au contraire une conception qui rende le comportement global du bâtiment indépendant de la direction du vent (double façades par exemple). Par contre, cette stratégie est particulièrement bien adaptée aux zones géographiques qui connaissent des vents réguliers en direction telles que les zones tropicales bénéficiant des alizés.

En dépit de ces difficultés apparentes d'utilisation, cette technique a largement été utilisée dans les architectures vernaculaires de nombreux pays. Aujourd'hui, des exemples d'application récente peuvent être donnés tels que le Queen's Building of De Montfort University, Leicester, England conçu par Short Fort Associates architects et Max Fordham Associates environmental engineers ainsi qu'un nombre important d'immeubles de grande hauteur conçus par l'architecte Ken Yeang de TR Hamzah & Yeang Sdn Bhd, Malaysia.

Bien évidemment, même avec les modèles de simulation utilisant des hypothèses basées sur des valeurs moyennes en temps, il persiste ici de nombreux domaines d'incertitude dont on doit être conscient. Les valeurs même des coefficients de pression sont incertaines et dépendent énormément de l'environnement du bâtiment, et varient également en fonction de la position précise de l'ouvrant sur la façade. Les caractéristiques locales du vent sont également difficiles à connaître

avec précision. Elles sont en général bien connues sur les sites dégagés des stations météorologiques, mais souvent difficiles à transposer au site de construction. Cependant, les méthodes de prédimensionnement que nous avons décrites permettent de mettre en évidence un potentiel qui devra être conforté par des études de site détaillées, et des modélisation en soufflerie ou à l'aide d'outils numériques puissants.

c) Ventilation naturelle par tirage thermique

Sous l'effet de la poussée d'Archimède, l'air chaud tend à s'élever alors que l'air froid tend à descendre. C'est ce principe simple qui peut être utilisé efficacement pour ventiler des bâtiments. La figure 4- 6 présente un principe de ce type appliqué à un bâtiment .

$$\rho_o g \cdot \Delta z - \Delta p_{\text{inlet}} - \Delta p_{\text{internal}} - \rho_i g \cdot \Delta z - \Delta p_{\text{exhaust}} = 0 \quad (4.10)$$

La poussée $p_s = (\rho_o - \rho_i)g \cdot \Delta z$ devient l'élément moteur et contre balance les pertes de charge :

$$\Delta p_s = \Delta p_{\text{inlet}} + \Delta p_{\text{internal}} + \Delta p_{\text{exhaust}} \quad (4.11)$$

Le terme de poussée dépend essentiellement de la hauteur du bâtiment h et de l'écart (généralement dû à la température) entre les masses volumiques extérieure et intérieure de l'air :

$$\Delta p_s = (\rho_o - \rho_i)g \cdot \Delta z = \left(\frac{352.6}{T_o} - \frac{352.6}{T_i} \right) g \cdot \Delta z \quad (4.12)$$

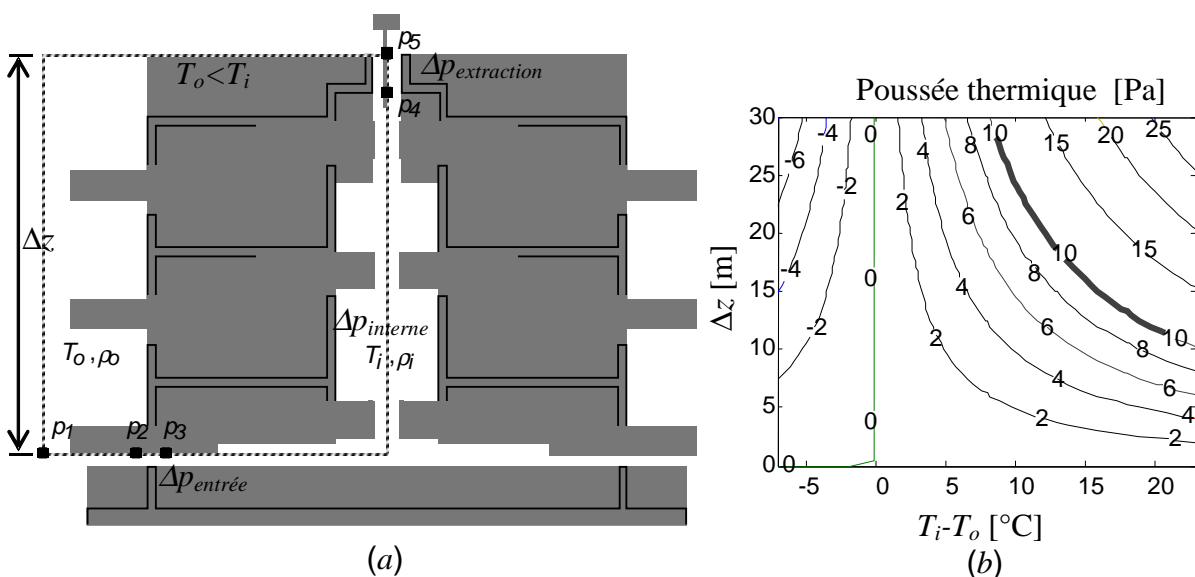


Figure 4- 6 : Ventilation naturelle par tirage thermique: a) Chute de pression

associée au tirage thermique (Axley 2001), b) poussée associée à la hauteur et à l'écart de température intérieur/extérieur

Durant les périodes chaudes, comme les températures extérieures sont proches des températures intérieures, le terme de poussée thermique est en général faible, sauf pour des immeubles de grande hauteur, par rapport à l'effet dynamique du vent. La figure 4-6-b montre la dépendance du terme de poussée thermique en fonction de l'écart de température extérieur/intérieur et de la hauteur du bâtiment fourni par l'équation (4.12). Pour un bâtiment de 3 niveau d'environ 10 mètres de hauteur, il faut avoir environ 23 °C d'écart pour obtenir un écart de pression de 10 Pa. Pour un immeuble de 8 étages, il suffit de 10°C. Pendant les périodes froides, les écarts de températures étant suffisants, la ventilation par tirage thermique peut très bien assurer le renouvellement d'air nécessaire au maintien d'une bonne qualité d'air intérieur à condition que les entrées et sorties d'air soient bien dimensionnées. Par contre, en périodes plus chaudes, le tirage thermique pourra difficilement assurer un débit d'air suffisant pour assurer le rafraîchissement et la ventilation de confort. Il vaudra mieux dans de telles circonstances orienter la conception vers l'utilisation directe des effets dynamiques du vent ou de combiner astucieusement les deux phénomènes.

d) Effets combinés du tirage thermique et du vent

Si la conception est bien faite, on peut en effet assez simplement bénéficier des effets combinés du vent et du tirage thermique. Par exemple, considérons simplement une ventilation par tirage thermique soumise aux deux effets combinés (figure 4-7-a). Globalement le principe est le même que celui utilisé pour le tirage thermique mais on a prolongé la cheminée par un dispositif qui permet d'utiliser la dépression due au vent (figure 4-6-a).

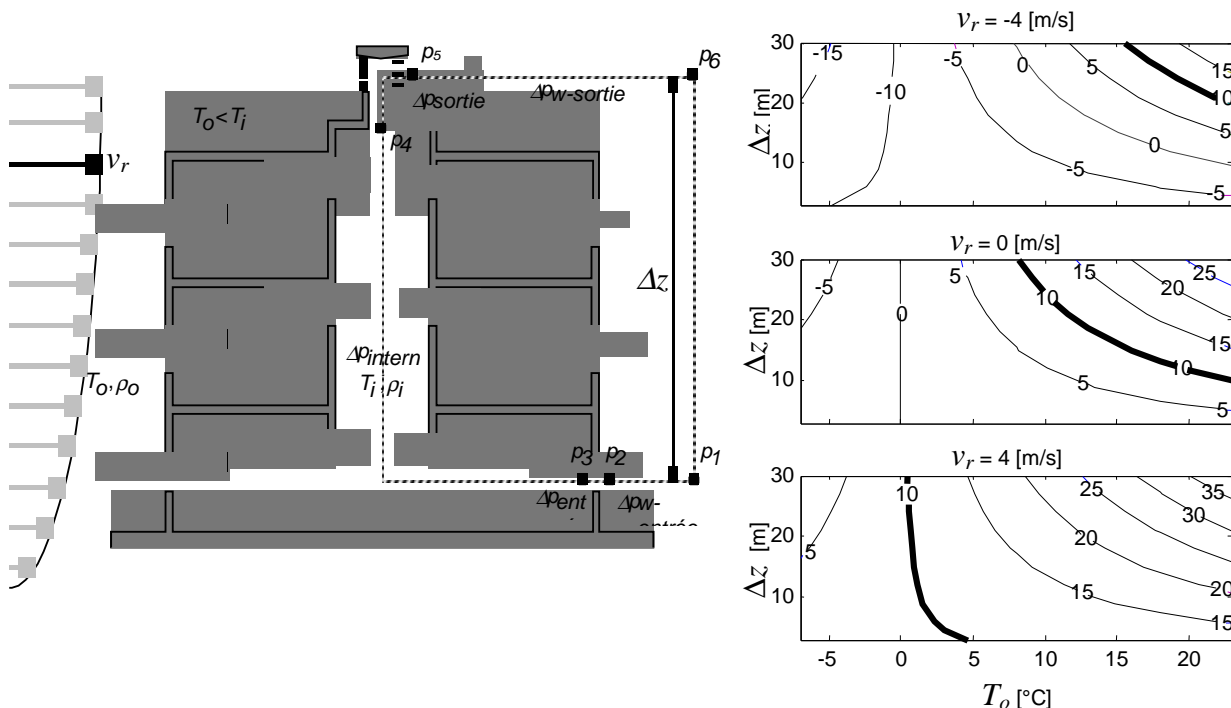


Figure 4-7 : Effets combinés du tirage thermique et du vent a) chutes de pression

(Axley 2001); b) pression motrice totale due aux effets combinés du vent et du tirage thermique

La figure 4- 8 donne un exemple de cheminées.



Figure 4- 8: Exemple de cheminée de ventilation traditionnelle (leYazd iranien) et solutions modernes (IVEG building, Renson 2004)

Une boucle de pression représentative – par exemple $p_1 - p_2 - p_3 - p_4 - p_5 - p_6 - p_1$, va inclure maintenant à la fois les effets de tirage thermique et ceux du vent. Ces deux pressions motrices peuvent s'additionner directement :

$$\Delta p_s + \Delta p_w = \Delta p_{\text{inlet}} + \Delta p_{\text{internal}} + \Delta p_{\text{exhaust}} \quad (4.13)$$

où

$$p_s = (\rho_o - \rho_i)g \cdot \Delta z \quad (4.14)$$

et

$$\Delta p_w = (C_{p\text{-inlet}} - C_{p\text{-exhaust}}) \frac{\rho v_r^2}{2} \quad (4.15)$$

Les équations de la boucle de pression pour chacun des cinq écoulements possibles ont bien évidemment la même forme, même si les valeurs des paramètres qui y sont intégrés sont bien sûr différentes. Pour l'écoulement montré en figure 4-7, les deux orifices d'entrée et de sortie d'air sont sous le vent, ainsi les coefficients de pression $C_{p\text{-inlet}}$ pour l'orifice d'entrée et $C_{p\text{-exhaust}}$ pour l'orifice de sortie de l'air sont-ils négatifs tous les deux. Par conséquent, l'air ne circulera dans le sens prévu

seulement si la valeur absolue du coefficient de pression de l'orifice de sortie est supérieure à celle de l'entrée. Dans ces conditions particulières, la différence de pression motrice due au vent entre les deux orifices demeure forcément limitée ce qui explique les débits de ventilation en général plus faibles dans les pièces sous le vent. Pour remédier à ce problème, on peut utiliser des bouches auto réglables où des dispositifs régulant les débits des pièces exposées au vent. La figure 4-9 montre des exemples de systèmes de ce type.



Figure 4-9: Exemples de bouches auto réglables pour la ventilation naturelle

La figure 4-7 (b) fournit les différences de pression motrices obtenues en superposant les effets du vent (figure 4-5) et du tirage thermique (figure 4-6). On montre ici que l'effet de tirage thermique assisté par le vent peut fournir rapidement des écarts de pression motrice significatifs. Des systèmes de bouches autoréglables peuvent avantageusement compléter ce dispositif pour maintenir les débits dans des limites acceptables mais tout en limitant le risque d'inversion du débit. La figure 4-10 compare le comportement d'un tel dispositif avec celui d'un orifice libre.

La contribution du tirage thermique Δp_s est là pour compenser les effets du vent en cas de pressions motrice dues au vent faibles ou négatives, mais cette contribution demeurera limitée pour les bâtiments de faible hauteur ou les étages supérieurs de bâtiments de grande hauteur.

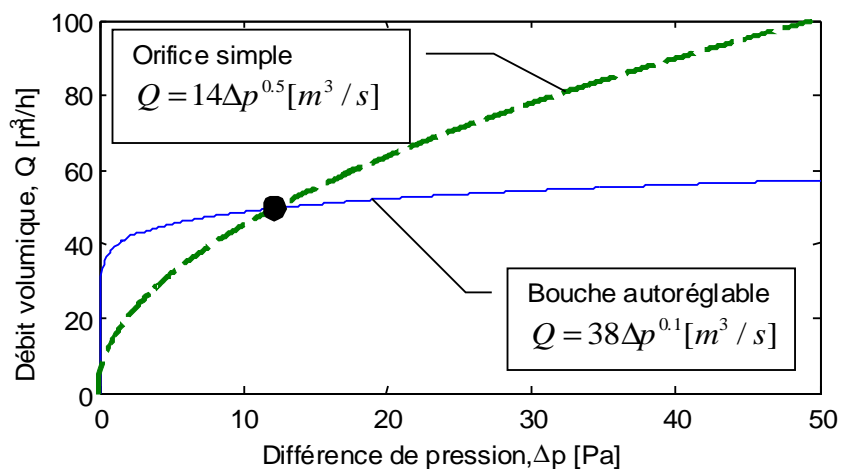


Figure 4-10: Comparaison des débits générés par un orifice simple et une bouche

auto réglable de même section

Les cheminées situées au dessus des toits surtout si elles sont équipées d'accélérateur peuvent favoriser grandement le fonctionnement de tels dispositifs.

Ainsi les systèmes de ventilation naturelle utilisant des conduits permettent de surmonter la plupart des problèmes liés à la ventilation à simple exposition et à améliorer aussi quelquefois les stratégies de ventilation traversantes en permettant d'équilibrer les débits d'air dans différentes pièces d'un bâtiment. C'est pour cette raison, essentiellement, qu'ils sont aujourd'hui certainement parmi les dispositifs les plus populaires. La figure 4- 11 présente diverses possibilités d'intégration de ces conduits.

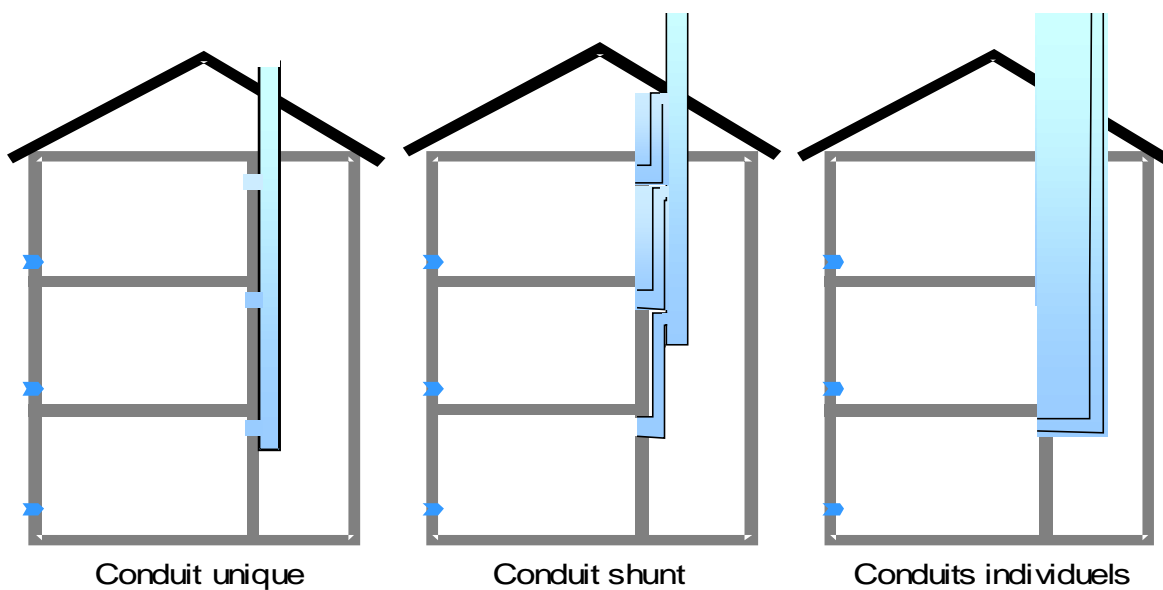


Figure 4- 11: Exemple d'intégration de conduits de ventilation naturelle

e) Ventilation naturelle par équilibrage de conduits

Un certain nombre de dispositifs anciens tels que les tours à vent iraniennes ou *bagdir* et les *malkaf* arabes ou du moyen-orient utilisent en fait des dispositifs de captation du vent et des équilibrages de pression qui peuvent être revisités aujourd'hui et fournir des dispositifs modernes à plusieurs conduits.

Dans ces dispositifs, l'air entre dans un conduit froid (aux conditions extérieures) puis est extrait par un conduit dit chaud (aux conditions proches de l'intérieur). Un descriptif de ces dispositifs est donné figure 4- 12.

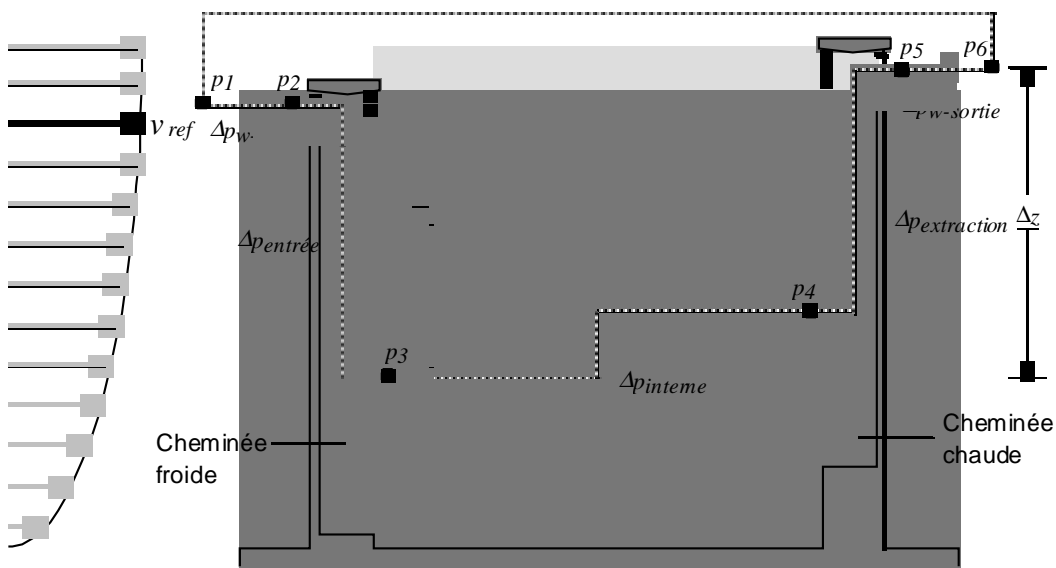


Figure 4- 12: Ventilation naturelle par équilibrage de conduits

Considérons par exemple la boucle de pression du deuxième niveau de la figure 4- 12, l'équation d'équilibre de cette boucle de pression est :

$$\Delta p_s + \Delta p_w = \Delta p_{inlet} + \Delta p_{int\,ernal} + \Delta p_{exhaust} \quad (4.16)$$

Le tirage thermique est donné par l'écart de masse volumique entre l'air intérieur et l'air extérieur ainsi que l'écart de hauteur entre le niveau de référence du local et l'extraction :

$$\Delta p_s = (\rho_o - \rho_i) g \Delta z \quad (4.17)$$

si l'air à l'entrée du local est proche des conditions extérieures. Les débits à chaque niveau seront ainsi équivalents à ceux donnés par un tirage thermique simple dans un conduit. La pression motrice du vent est appréciée à partir des différences de coefficient de pression entre l'orifice d'entrée et celui de sortie de l'air et de la vitesse du vent :

$$\Delta p_w = (C_{p-inlet} - C_{p-exhaust}) \rho v_{ref}^2 / 2 \quad (4.18)$$

Mais dans ce cas, la position haute des orifices d'entrée et de sortie fournissent un potentiel éolien plus important. Ceci combiné avec des dispositifs additionnels permettant de s'affranchir de la direction du vent pour l'extraction donne à ce schéma une attractivité toute particulière en site urbain. De nombreux fabricants tels que Monodraught Limited (U.K) proposent aujourd'hui des systèmes d'extraction adaptés à ce genre de stratégie. (figure 4- 13).

Dans des conditions particulières d'utilisation, ces dispositifs se prêtent également

particulièrement bien à la mise en œuvre de solutions hybrides en leur adjoignant un ventilateur.

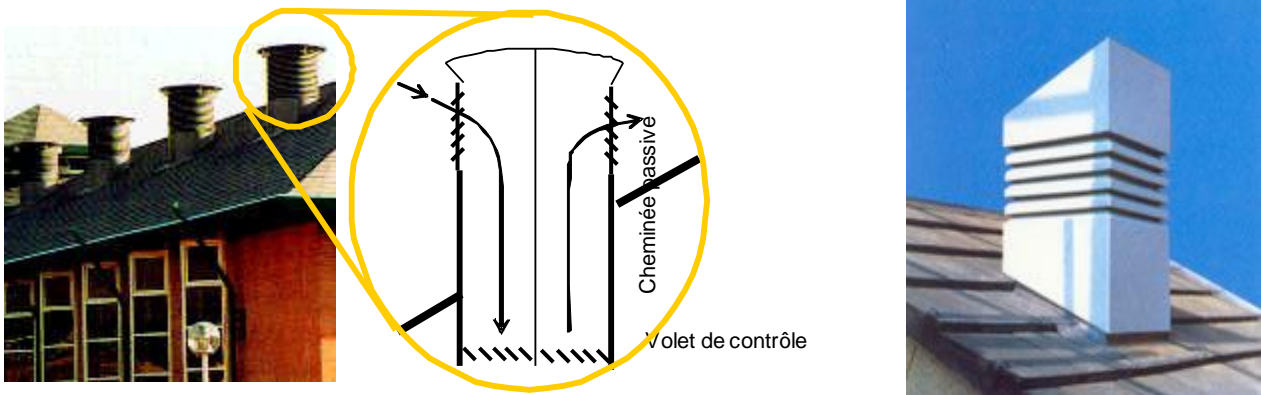


Figure 4- 13: Windcatcher de Monodraught Lmt

f) **Combinaisons des stratégies de base**

Dans de nombreux cas, il faudra coupler différentes stratégies pour pouvoir assurer les besoins de renouvellement d'air par ventilation naturelle. La figure 4-14 présente ces différents scénarii.

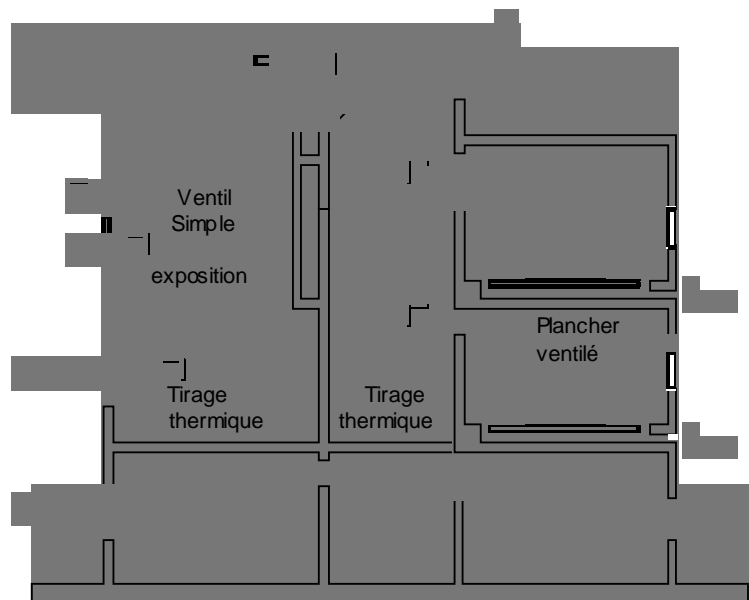


Figure 4- 14: Combinaisons de différentes stratégies (Axley,2001)

Dans de très nombreux cas, la solution retenue combine ainsi plusieurs solutions élémentaires. La Maison du Parlement anglais à Londres est un bon exemple d'intégration de différentes stratégies (figure 4-15).



Figure 4-15 Maison du Parlement anglais à Londres

Dans d'autres circonstances, l'élaboration de la solution finale réside dans des détails de mise en œuvre de systèmes particuliers pour les entrées d'air, les sorties ou la distribution de l'air en utilisant par exemple l'effet d'inertie donnée par la structure du bâtiment. La figure 4-16 donne un exemple correspondant à l'utilisation du plancher pour distribuer l'air. Cette solution permet en été de rafraîchir la structure même du bâtiment et d'utiliser son inertie pour améliorer les conditions de confort intérieur.



Figure 4- 16: Bâtiment du BRE en Angleterre utilisant une distribution d'air par le plancher

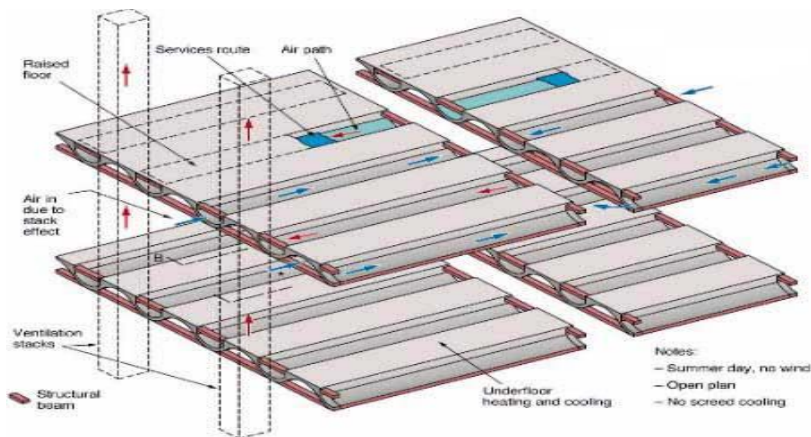


Figure 4- 17: détail du dispositif de distribution par le plancher

g) Ventilation naturelle assistée par énergie solaire

Le principe général est d'assister le phénomène de tirage thermique en utilisant l'énergie solaire pour augmenter les écarts de températures et donc l'effet de tirage thermique. Le capteur solaire est utilisé ici directement comme élément de tirage thermique (figure 4- 18). La différence de pression motrice s'écrit alors :

$$\Delta p_s = \Delta p_i + \Delta p_d + \Delta p_e \quad (4.19)$$

où Δp_i , Δp_d , Δp_e sont respectivement les chutes de pression à l'entrée du capteur, à l'intérieur et à la sortie. En fonction de la position du volet de contrôle, Δp_i ou Δp_e comprend la perte de charge relative à celui-ci. L'effet de tirage thermique s'écrit :

$$\Delta p_s = \rho_0 T_0 [1/T_e - 1/T_i] g \Delta z \quad (4.20)$$

où T_i est la température de l'air à l'entrée du collecteur (généralement la température de l'air extérieur) et T_e est la température à la sortie (Awbi 1998) :

$$T_e = A/B + (T_i - A/B) \exp[-BwH / (\rho_e c_p Q)] \quad (4.21)$$

Avec $A = h_1 T_{w1} + h_2 T_{w2}$, $B = h_1 + h_2$, où h_1 et h_2 (W/m^2K) sont les coefficients d'échange convectif des surfaces intérieures du capteur, T_{w1} , T_{w2} ($^{\circ}C$) sont les températures des surfaces intérieures du capteur, w (m) est la largeur du collecteur, H (m) la hauteur entre les orifices d'entrée et de sortie d'air, ρ_e (kg/m^3) la masse volumique de l'air à la sortie, c_p ($J/kg.K$) la chaleur spécifique à pression constante de l'air et Q (m^3/s) le débit volumique traversant le capteur.

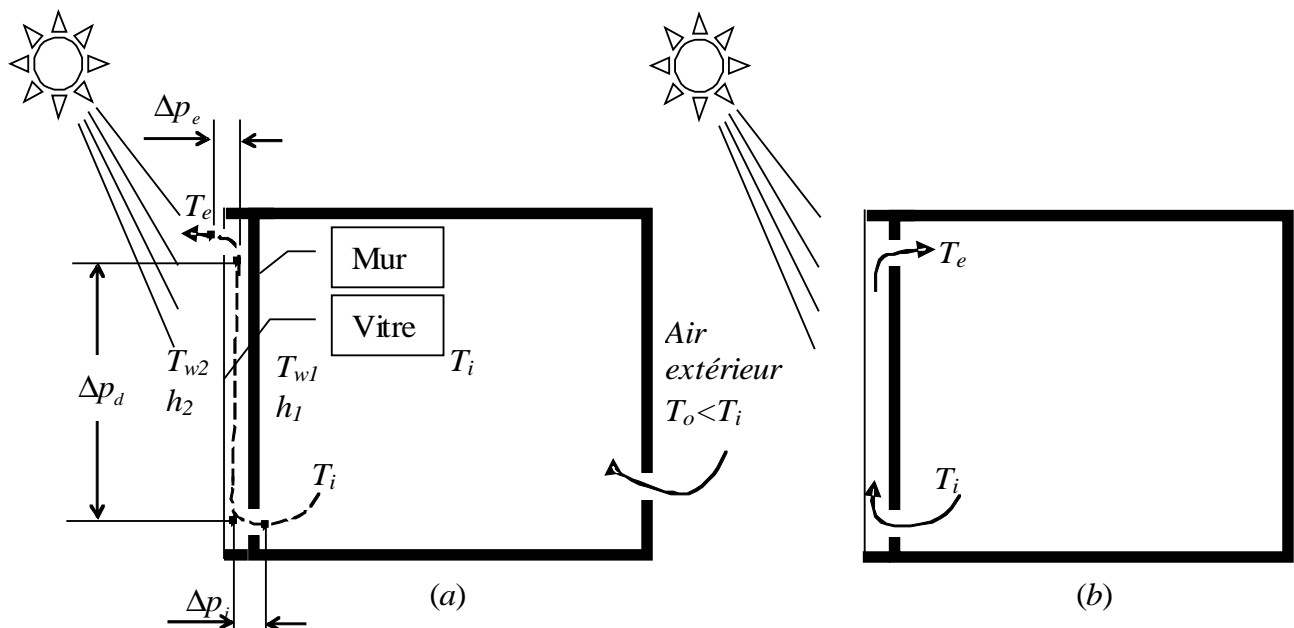


Figure 4- 18: Mur Trombe utilisé comme a) ventilateur, b) chauffage(Awbi 1998)

d) Ce principe de collecteur solaire peut être utilisé sous diverses formes : double façade, mur Trombe, cheminée solaire ou toit solaire. La figure 4- 19 présente un exemple de cheminée solaire mise en œuvre sur l'école Tanga à Falkenberg (Suède).

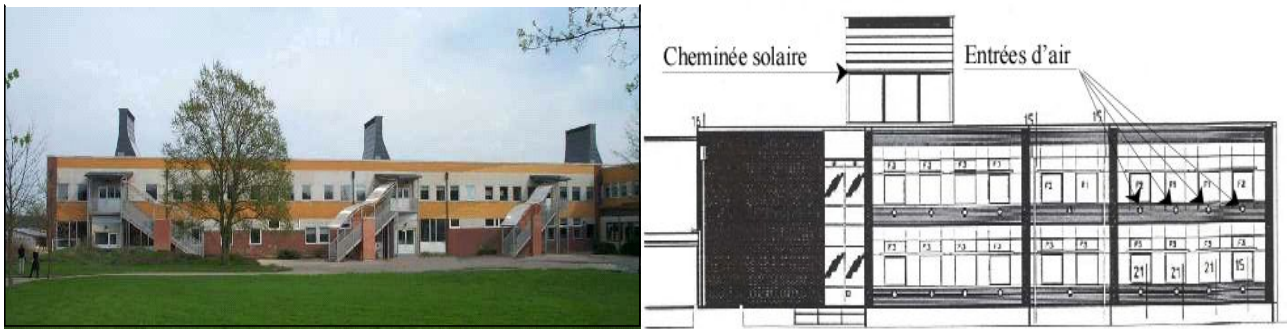


Figure 4-19: Ecole Tanga à Falkenberg (Suède)

h) Rafrâichissement passif par évaporation

Une amélioration du système, de ventilation naturelle par équilibrage de conduits basée également sur des systèmes anciens développés au moyen orient et en Asie consiste à ajouter un système évaporatif pour refroidir le conduit froid. Traditionnellement, le rafraîchissement évaporatif était réalisé par des jarres poreuses, une fontaine ou un bassin placés dans l'entrée de l'air (Santamouris 1996, Allard 1998). Dans les récents développements de cette technique, on préfère généralement vaporiser de l'eau en haut du conduit froid pour accentuer l'effet de tirage thermique et augmenter l'efficacité globale du système (Bowman, 2000).

Globalement, l'application de la boucle de pression à cette configuration est conduite de la même façon que précédemment pour les conduits équilibrés, mais il faut tenir compte de la présence de cet air humide et refroidi. La figure 4-20 présente une telle configuration. Deux différences de hauteur doivent maintenant être considérées : z_a , la hauteur de la colonne d'air humide au dessus du niveau de référence du local et z_b , la hauteur de la colonne d'air chaud, comme précédemment.

L'air dans la colonne froide approche de la saturation, sa masse volumique est ρ_s , elle correspond environ à la température de rosée de l'air extérieur (les expérimentations réalisées montrent qu'elle est au maximum de 2 °C supérieure à cette température). Ainsi l'équation d'équilibre de pression devient :

$$(\Delta p_{inlet} + \Delta p_{internal} + \Delta p_{exhaust}) = \Delta p_s + \Delta p_w \quad (4.22)$$

où :

$$\Delta p_s = [\rho_o z_b + \rho_s z_a - \rho_i (z_a + z_b)] g \quad (4.23)$$

$$\Delta p_w = (C_{p-inlet} - C_{p-exhaust}) \frac{\rho v_r^2}{2} \quad (4.24)$$

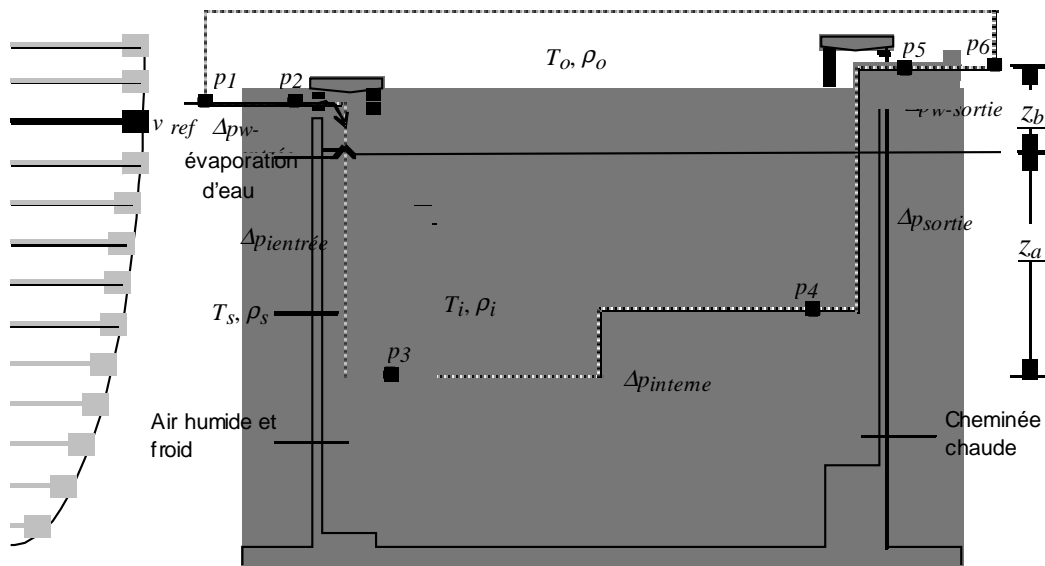


Figure 4- 20 : Ventilation naturelle par équilibrage de conduits couplée à un refroidissement évaporatif de l'air d'entrée

Pour évaluer quantitativement l'effet d'une telle stratégie, considérons un cas similaire à celui déjà traité pour la ventilation naturelle par équilibrage de conduits mais utilisons un système évaporatif pour améliorer le processus placé en haut du conduit froid à 10 m de hauteur. On a ici: $z_a \approx 0 \text{ m}$ et $z_b \approx 10 \text{ m}$. Considérons que l'air extérieur est à 25 °C et son humidité relative à 20 % (masse volumique d'environ 1.18 kg/m^3), s'il est refroidi à 2 °C de sa température de rosée (12.5 °C), sa température chute donc à 14.5 °C alors que sa masse volumique augmente jusqu'à 1.21 kg/m^3 pour une humidité relative de 77%. En maintenant les conditions intérieures dans la zone de confort pour ces conditions extérieures : 28 °C et 60 % d'humidité relative, en utilisant un débit de ventilation compatible avec les charges internes, la masse volumique de l'air intérieure a une valeur approximative de 1.15 kg/m^3 . On obtient alors le terme de poussée thermique :

$$\Delta p_s = \left(1.18 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (0 \text{ m}) + 1.21 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (10 \text{ m}) - 1.15 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (0 + 10 \text{ m}) \right) 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 6.4 \text{ Pa} \quad (4.25)$$

Alors que sans le dispositif évaporatif on aurait, pour $\Delta z_a \approx 10$ et $\Delta z_b \approx 0 \text{ m}$:

$$\Delta p_s = \left(1.18 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (10 \text{ m}) + 1.21 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (0 \text{ m}) - 1.15 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (10 + 0 \text{ m}) \right) 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 2.9 \text{ Pa} \quad (4.26)$$

Cet exemple simple montre bien l'intérêt de tels dispositifs.

g) Façades à double peau

Un bâtiment à double peau (ou double façade) est constitué d'une enveloppe

normale en béton ou en verre, enveloppée complètement ou partiellement à l'intérieur d'une structure légère réalisée généralement en verre. Ces systèmes constructifs offrent plusieurs avantages : d'une part ils créent des espaces intermédiaires ou espaces tampons entre les ambiances extérieures et intérieures réduisant ainsi les pertes thermiques en hiver et les gains en été, d'autre part, en les intégrant dans les stratégies de ventilation du bâtiment, on peut tirer avantage de ces espaces en préconditionnant l'air de ventilation. La ventilation naturelle peut alors être réalisée en introduisant l'air extérieur à travers ces espaces tampons vers le bâtiment. Pour les bâtiments de grande hauteur, le tirage thermique naturel peut alors être avantageusement réalisé. De plus, ces espaces intermédiaires permettent de limiter les problèmes de sécurité et d'intrusion inhérents aux ouvertures nécessaires en ventilation naturelle. Ces double façades peuvent également être associées à des systèmes solaires ou à des systèmes à double conduit que nous avons traité précédemment.

Les raisons principales de l'utilisation des doubles peaux sont :

- limiter les nuisances sonores provenant de l'extérieur,
- protéger les protections solaires du vent et de la pluie,
- permettre des stratégies de ventilation naturelle assurant également une protection contre l'intrusion,
- réhabiliter le bâtiment sans nuire à l'utilisation du bâtiment.

Dans la plupart des cas on peut en effet installer les protections solaires à l'intérieur même des doubles peaux. Cet espace doit alors être nécessairement ventilé pour limiter les risques de surchauffe due à l'absorption du rayonnement solaire sur les dispositifs de protection. Pour des raisons de sécurité incendie, ces espaces doivent fréquemment être limités à deux niveaux maximum, de ce fait, les entrées et les sorties d'air sont souvent placées à chaque niveau ou au plus tous les deux étages.

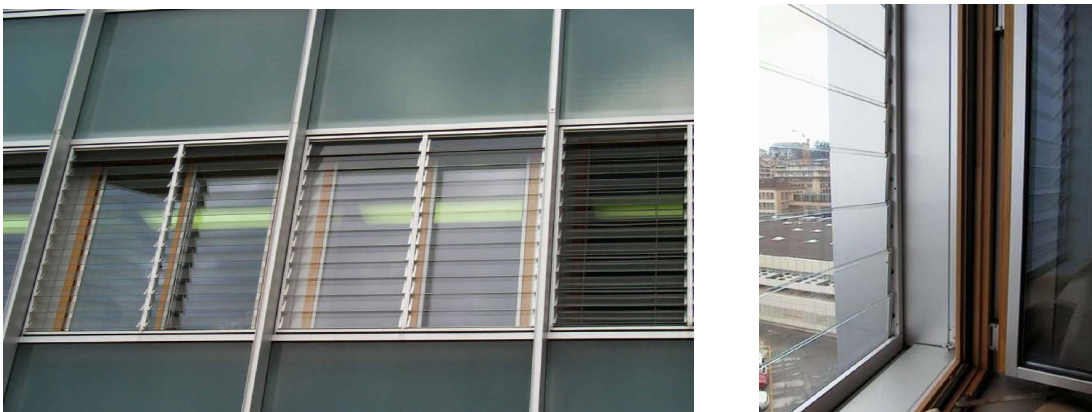


Figure 4- 21: Les lames de verre en position extérieure permettent une protection extérieure contre la pluie tout en permettant de large ouvertures vers l'extérieur. (La Poste, Lausanne, R. Mosimann Arch.)

La façade de la poste centrale de Lausanne a fait l'objet d'une rénovation en 1997. Au lieu d'utiliser un système de climatisation, il a été décidé après une étude préliminaire d'utiliser un principe de ventilation nocturne pour éviter les surchauffes

en été. Une double peau a été conçue pour rénover ce bâtiment mais sans perturber l'activité de la poste. Ainsi, des doubles parois constituées de lames de verre ont été installées au niveau de chaque fenêtre pour permettre une ventilation naturelle nocturne sans risque (figure 4-21). Ces lames de verre inclinées vers le bas permettent également d'éviter la pénétration de l'eau de pluie et protège les pare soleils.

Le bâtiment SIEMENS à Dortmund a été également rénové en 1996, et on en a profité pour remplacer le système de ventilation mécanique par la ventilation naturelle. La figure 4.22 montre une vue du bâtiment associée à une coupe verticale qui présente la nouvelle façade. La partie intérieure demeure ouvrable comme avant la rénovation. Par contre, la façade extérieure est fixe. Les protections solaires sont localisées dans la double façade. L'air extérieur passe par des orifices de 10 cm de large en bas et en haut de chaque élément extérieur. Les résultats de mesures réalisées à l'aide de gaz traceurs ont montré que des débits d'air neuf de 30 m³/h pouvaient systématiquement être assurés par ce dispositif en ouvrant les fenêtres intérieures et sans ventilation traversante. (Pasquay 2004).

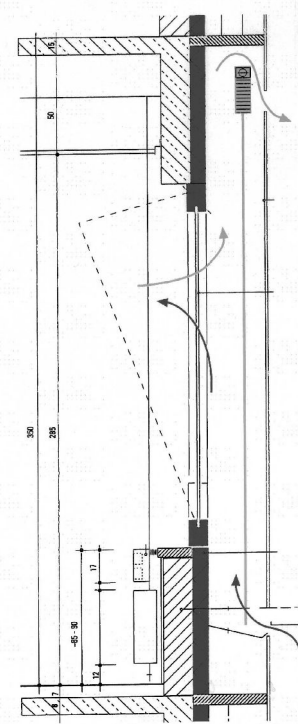


Figure 4-22: Siemens Building, Dortmund (Pasquay 2004)

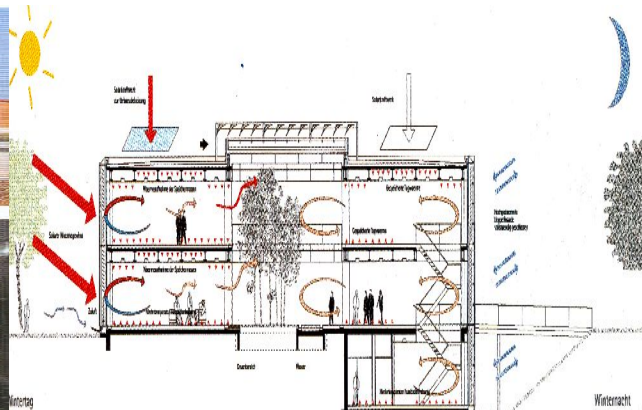


Figure 4-23: Immeuble administratif à Würzburg (Allemagne)

La figure 4-23 présente une autre réalisation à Würzburg. Ici le schéma de ventilation générale du bâtiment intègre complètement les doubles peaux qui sont utilisées pour préchauffer l'air en hiver et évacuer les charges thermiques en été. Dans ce cas également les pare soleil sont intégrés à la double peau.

Références:

- Allard F. (1998), Edit, Natural Ventilation in Buildings, a Design Handbook, Pub : James & James London, (1998), ISBN.1.87.393672.9
- Allard F. and UtsumiY. (1992), Air Flow through Large Openings, Energy and Buildings, Vol. 18, N°2, pp. 133- 146, 1992.
- Allen C. (1984), Wind pressure data requirements for air infiltration calculations, Technical note AIVC 13, Air Infiltration and Ventilation Center, Bracknell, UK.
- Aubé (2002),Initiation à la télédétection et à la modélisation de l'atmosphère, Groupe de recherche et d'application en physique au collège de Sherbrooke.
- Awbi, H. (1998). Ventilation. Renewable and Sustainable Energy Reviews **2**: 157- 188.
- Axley, J. (2000). AIVC TechNote 54: Residential Passive Ventilation Systems: Evaluation and Design. Coventry, UK, AIVC.
- Axley, J. (2001). Application of Natural Ventilation for U.S. Commercial Buildings, NIST: 146.
- Aynsley R.M., Melbourne W. , Vickery B.J (1977),Wind Tunnel Testing Techniques, Architectural Aerodynamics, pp 163, Applied Science Publishers Ltd, London, U.K, 1977.
- Bala (1987), Effect of some architectural and environmental factors on air filtration of multistorey building, 3rd ICBEEM Proceedings, Vol. III, pp. 21- 28, Lausanne, Switzerland, 1987.
- Bowman, N. T., H. Eppel, et al. (2000). Passive Draught Evaporative Cooling. Indoor + Built Environment **9**(5): 284- 290.
- Bozonnet E. (2005), Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments- Cas de la rue canyon, Thèse de Doctorat, Université de La Rochelle, Juin 2005
- BRE_Digest_399 (1994). Natural ventilation in non- domestic buildings. Garston, UK, Building Research Establishment.
- BS_5925 (1980). Code of practice for design of buildings: ventilation principles and design for natural ventilation. London, UK, British Standard Institution.
- De Gidds, W. and W. H. Phaff (1982). Ventilation rates and energy consumption due to open windows - A brief review of research in The Netherlands. Air Infiltration Review **4**: 4- 5.
- Gandemer J. (1981),The aerodynamic characteristics of windbreaks, resulting in empirical design rules, Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics **7**(1), pp.15- 36.
- Ghiaus C., Allard F. & Axley J. (2003),Natural ventilation in an urban context, in:Solar thermal technologies for buildings, James & James, London, ISBN 1 9à2916 47 6.
- Kula H.G and Freustel H.E (1988), Review of wind pressure distribution as input data for infiltration models, Lawrence Berkeley Laboratory Report LBL-23886, Berkeley, USA, 1988.

- Nicholson S.E. (1975), A pollution model for street - level air, Atmospheric environment, 9 (1), pp. 19- 31
- Oke (1987), Boundary layer climates, second edition, 435p. University press, Cambridge, ISBN 0 415 04319 0.
- Plate E. J. & Kiefer H. (2001), Wind loads in urban areas, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 89 (14- 15), pp. 1232- 1256.
- Roldan A. (1985), Etude thermique et aéraulique des enveloppes de bâtiments, thèse de doctorat, INSA de Lyon
- Rotach M. W. (1999), On the influence of the urban roughness sublayer on turbulence and dispersion, Atmospheric Environment, 33 (24- 25), pp.4001- 4008.
- Santamouris, M. and D. Asimakopoulos, Eds. (1996). Passive Cooling of Buildings. London, UK, James & James Ltd.
- Saraiva & Da Silva (1993- 1994),Determination of pressure coefficients over simple shaped building models under different boundary layers, Minutes of The PASCOOL-CLI meeting in Wind tunnel reports.
- Strawbridge . & Snyder (2004),Planetary boundary layer height determination during pacific 2001 using the advantage of scanning lidar instrument, Atmospheric Environment, 38(34), pp. 5861- 5871.
- Swani , M. W. (1987),Procedures of calculating natural ventilation airflow rates in buildings, ASHRAE Project 448- RP, final report FSEC-CR-163- 86, Florida Center of Solar Energy.
- Walton G. N. (1982), A computer algorithm for estimating infiltration and inter- room airflows, US department of Commerce, National Bureau of Standards.