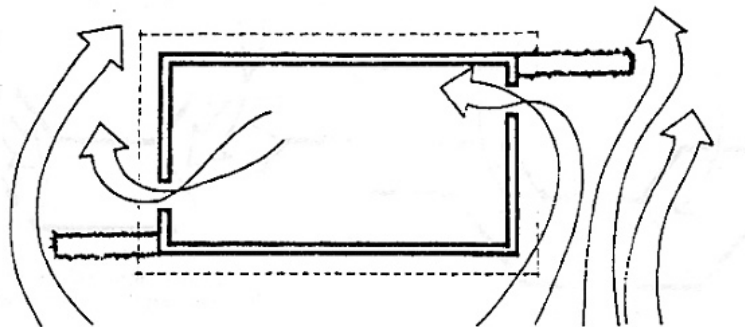




# LA VENTILATION NATURELLE DES BATIMENTS



**Jean-Louis IZARD**  
Laboratoire ABC



# LA VENTILATION NATURELLE DES BATIMENTS

**Jean-Louis IZARD**  
**Laboratoire ABC**  
**ENSA-Marseille**

## Introduction

La ventilation des locaux est une nécessité hygiénique car l'air intérieur se pollue lui aussi, notamment en se chargeant d'humidité (voir l'article sur l'air humide intérieur). Mais cette nécessité repose aussi sur des considérations de confort thermo-hygrométrique, de deux manières différentes :

- En augmentant la vitesse d'air en contact avec l'habitant, c'est l'amélioration de la sensation de confort thermique par ventilation directe, si les conditions thermiques extérieures le permettent.
- En refroidissant la nuit la structure « effusive » de la construction par la ventilation, c'est le stockage de la fraîcheur nocturne qui améliore le confort thermique de jour.

Cette ventilation peut être obtenue par voie mécanique grâce à un réseau de conduits correctement dimensionnés pour assurer les débits nécessaires au renouvellement de l'air ou au refroidissement nocturne: cette voie est encouragée par les progrès des menuiseries en matière d'étanchéité à l'air et par l'existence de systèmes de ventilation à double flux à deux vitesses.

Mais une autre voie peut être empruntée pour éviter les dépenses énergétiques liées au soufflage de l'air et supprimer l'encombrement des conduits : c'est la ventilation naturelle obtenue par ouverture des fenêtres.

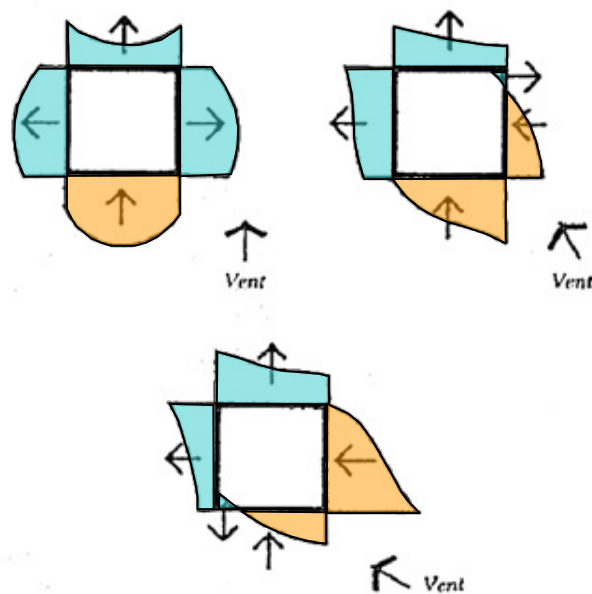
L'article propose un rappel des grandeurs influant sur le confort thermo-hygrométrique ainsi que des principes gouvernant l'aéraulique dans le bâtiment. Il aborde ensuite une comparaison des performances de divers systèmes d'ouverture. L'organisation des plans des habitations et de détails architecturaux favorisant la ventilation naturelle est évoquée et l'article s'achève par la description de certains principes de ventilation par captage des brises au moyen de « capteurs de vents » ou de « tours à vent » pratiqués dans les climats arides où elles peuvent être associées au refroidissement évaporatif. Ces techniques ancestrales peuvent aujourd'hui être employées dans l'architecture contemporaine.

## 1 – Rappels des principes de l'aéraulique dans le champ de la construction.

### 1 – 1. Ecoulement de l'air au voisinage d'un bâtiment.

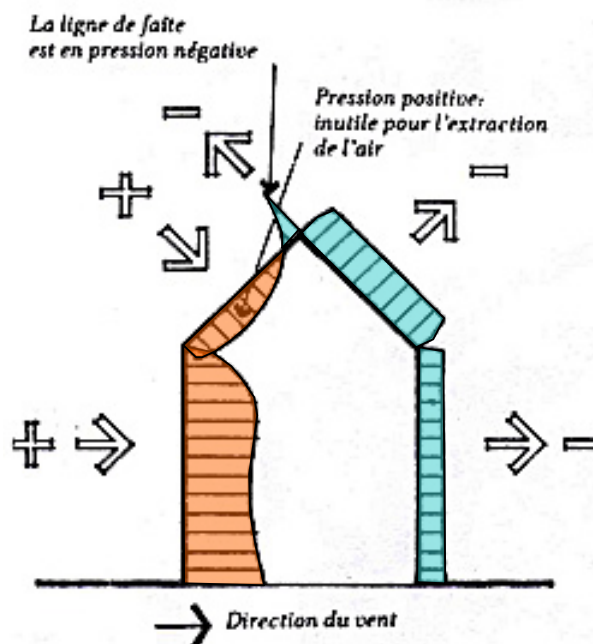
On peut considérer que tout bâtiment est immergé dans un fluide qui est l'air. Cet air peut être immobile ou en déplacement. Dans le second cas, la présence du solide qu'est le bâtiment crée des « sillages » dans l'écoulement de l'air, à la manière d'un navire à la surface d'un plan d'eau (sauf qu'il s'agit là d'un phénomène à deux dimensions alors que le volume du bâtiment crée des sillages en trois dimensions).

Les aérauliciens ont donc étudié comment l'air s'écoulait au voisinage d'un bâtiment et ont proposé que le résultat s'exprime en termes de « champ de pression » pouvant se traduire en « champ de vitesses ».



**Fig. 1 - Champs de pressions sur les façades d'un bâtiment de plan carré en fonction du secteur du vent (d'après Roger Camous, Donald Watson, « L'habitat bioclimatique, Chap. 8 La ventilation naturelle »**

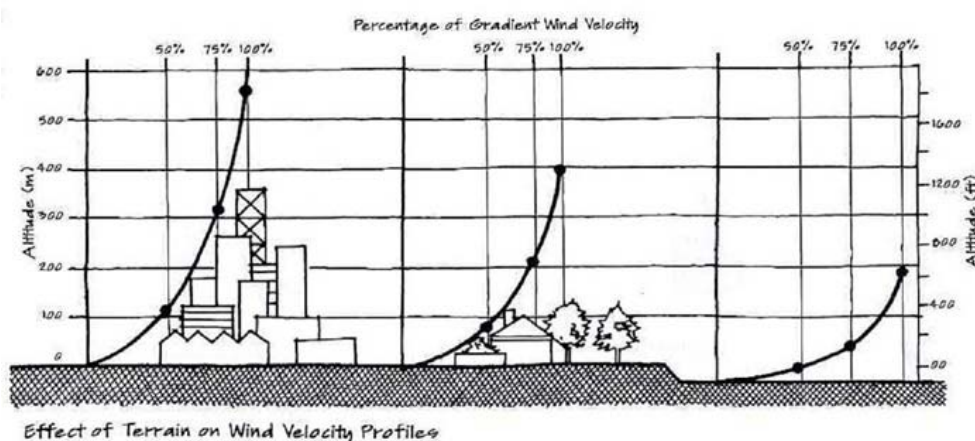
La figure 1 donne un aperçu des champs de pressions qui s'exercent sur des façades d'un bâtiment selon le secteur du vent : la longueur des flèches donne la grandeur de la pression et le sens de la flèche indique s'il s'agit d'une surpression (en orange) ou d'une dépression (en bleu). La mise en communication de façades placées dans des pressions différentes engendre automatiquement un déplacement d'air.



**Fig. 2 - Champs de pressions sur les façades d'un bâtiment vu en coupe parallèle à la direction de vent. (D'après Roger Camous, Donald Watson, « L'habitat bioclimatique » )**

En coupe, on retrouve bien d'un côté la façade en surpression et de l'autre celle en dépression. La toiture est partagée en deux lorsqu'il y a deux pans : dans le vent, en surpression, sauf à proximité du faîtage et sous le vent en dépression (fig. 2).

## 1 – 2. Disponibilité de l'air en mouvement : rugosité du sol et couche limite



**Fig. 3 - Hauteur de la couche limite selon la rugosité-type du sol (d'après G.Z. Brown & Mark Dekay: "Sun, Wind & Light; architectural design strategies").**

Lorsque l'air circule au dessus d'une surface rugueuse (c'est à dire comportant des obstacles), sa vitesse au voisinage du sol décroît. La hauteur jusqu'à laquelle s'exerce cette réduction de vitesse s'appelle « **épaisseur de couche limite** ». La figure 3 montre que cette hauteur dépend de la nature de l'occupation du sol.

## 2 - Ventilation naturelle des locaux

La ventilation naturelle est basée principalement sur l'ouverture volontaire des fenêtres. L'efficacité de cette opération dépend:

- De la taille et de la position des fenêtres,
- De l'exposition des fenêtres par rapport au vent,
- Du caractère « traversant » du plan du local.

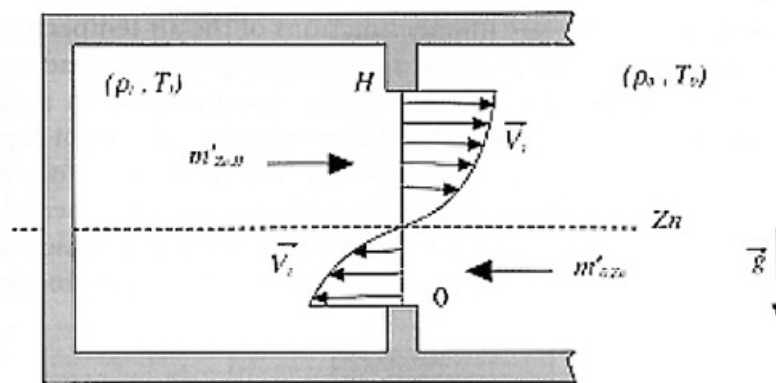
Mais on peut aussi recourir à des systèmes « capteurs d'air ».

Deux phénomènes peuvent être à l'origine des flux d'air:

- Les différences de pression de l'air d'un point à un autre de l'enveloppe du bâtiment, dues à des différences thermiques,
- Le vent ou les brises extérieures, à l'origine également de différences de pressions de l'air sur les façades.

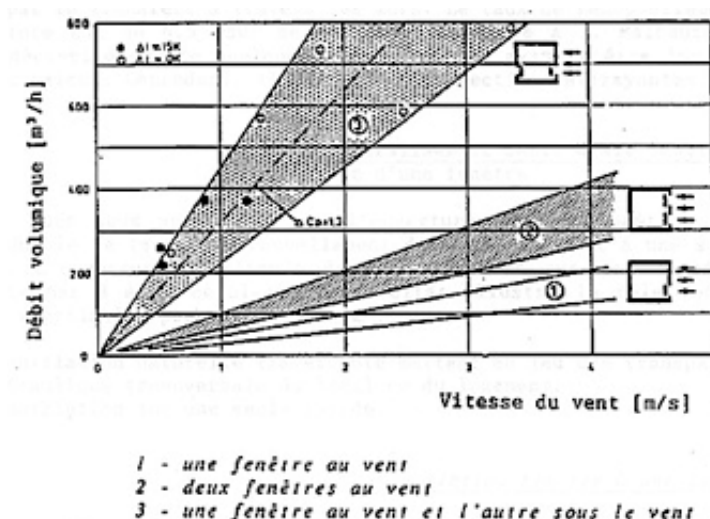
### 2 – 1. Taille et position des fenêtres

Quelques graphes pour exprimer le rôle de la taille et de l'exposition des fenêtres. D'abord, que se passe-t-il lorsque le local ne dispose que d'une seule fenêtre (on dit alors qu'il est en « **mono-exposition** ») ?



**Fig. 4 - Flux d'air à travers une fenêtre en mono-exposition (d'après Francis Allard et contributeurs, "Natural ventilation in buildings, a design handbook")**

A travers une fenêtre unique, il y a un flux d'air entrant en partie inférieure et un flux sortant en partie supérieure. Entre les deux se situe la « **zone neutre** ». Ce système de ventilation n'est pas très efficace en termes de confort thermique, mais peut être suffisant pour renouveler l'air d'une pièce.



**Fig. 5 - Débits volumiques comparés de divers scénarios d'ouvertures en fonction de la vitesse du vent (d'après R. Daler, F. Haberda, E. Hirsch and U. Knöbel, "Ventilation patterns of windows and adjustable natural ventilation systems") .**

La figure 5 montre l'influence du scénario d'ouverture : (1 = une fenêtre au vent, 2 = deux fenêtres au vent, 3 = une fenêtre au vent et l'autre sous le vent) sur les débits volumiques horaires d'air en fonction de la vitesse d'air extérieure : le scénario 3 est le plus efficace et le scénario 1 est celui qui donne les débits les plus faibles.

Pour le cas de la fenêtre unique, l'AICV propose une formule générale tenant compte de l'exposition du site, du degré d'ouverture de la fenêtre et des conditions thermiques extérieures :

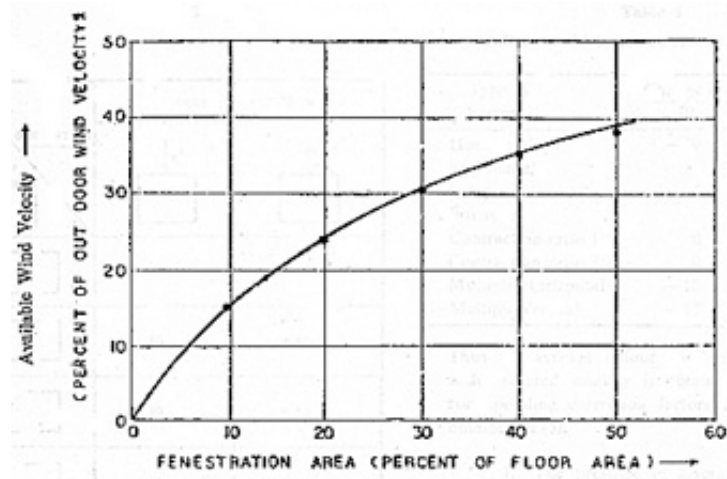
$$q = A/1000 (B v^2 + 1400 (T_i - T_e) h)^{0,5} \quad (1)$$

- $q$  = débit volumique en  $m^3/s$
- $A$  = Section équivalente d'ouverture de la fenêtre, variant de 0 à 1
- $V$  = vitesse du vent en  $m/s$
- $T_i$  = Température intérieure
- $T_e$  = Température extérieure
- $h$  = hauteur de l'ouverture
- $B$  = coefficient dont la valeur est comprise entre 1000 et 10000 selon l'exposition au vent du site.

En situation urbaine, le coefficient  $B$  prend une valeur que l'on peut forfaitiser et la formule devient, selon J.C. Phaff :

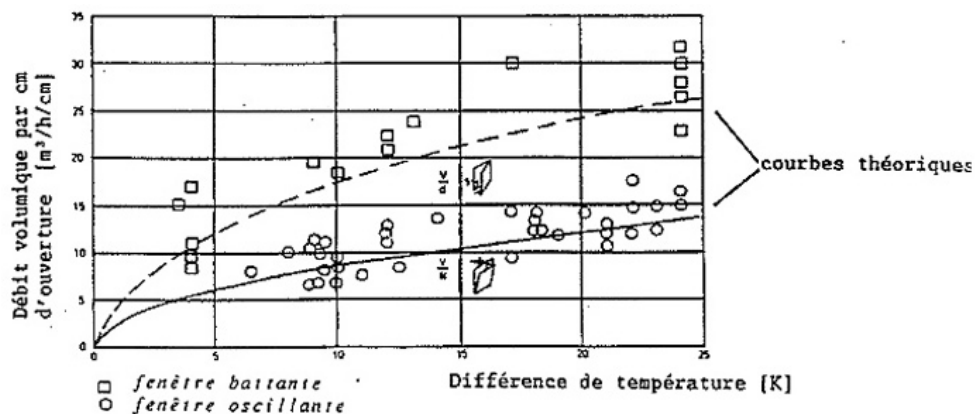
$$q = A/1000 (2500 + 250 v^2 + 900 (T_i - T_e) h)^{0,5} \quad (2)$$

En vertu du graphe de la figure 5, les valeurs obtenues en appliquant ces formules sont à multiplier par un facteur 8 à 10 lorsqu'il y a deux fenêtres en façades opposées.



**Fig. 6 - Pourcentage de la vitesse d'air extérieure accessible à l'intérieur en fonction du taux d'ouverture (% de la surface de plancher) (d'après I. Chand, "Prediction of air movement in building").**

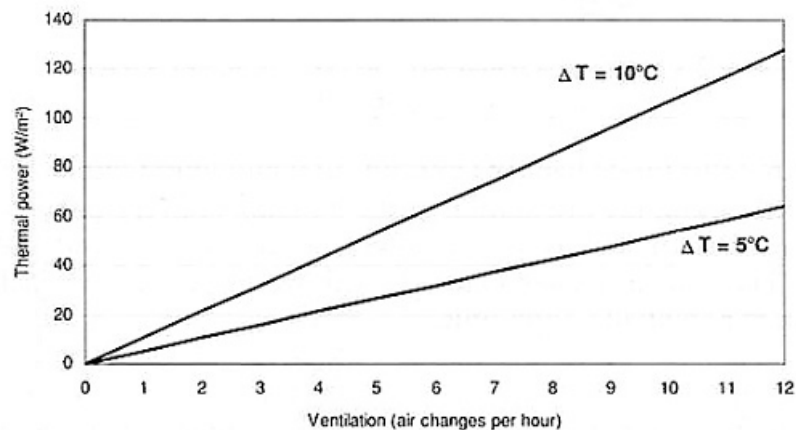
La figure 6 montre l'influence du taux d'ouverture de fenêtres sur la vitesse d'air enregistrable à l'intérieur exprimée en % de la vitesse d'air du vent à l'extérieur : avec des fenêtres représentant 50% de la surface de plancher, on obtient 40% de la vitesse d'air extérieure.



**Fig. 7 - Débits volumiques par cm d'ouverture en fonction du type d'ouvrants et de la différence de température (d'après R. Daler, F. Haberda, E. Hirsch and U. Knöbel, "Ventilation patterns of windows and adjustable natural ventilation systems").**

La figure 7 montre l'influence du type d'ouverture (fenêtre battante ou oscillante) sur les débits volumiques horaires d'air par cm d'ouverture en fonction de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur : l'avantage est aux fenêtres battantes.

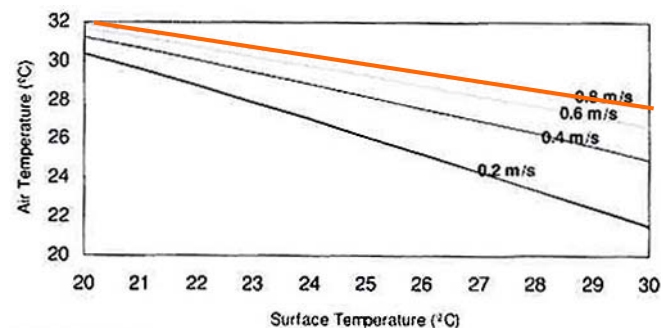
## 2 – 2. Efficacité de refroidissement de la ventilation naturelle



**Fig. 8 - Equivalent de puissance de refroidissement (en W/m2) en fonction de taux de renouvellement d'air et de la différence de température (d'après Francis Allard et contributeurs, "Natural ventilation in buildings, a design handbook").**

La figure 8 montre l'importance de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur dans la mise en place de l'équivalent d'une puissance de refroidissement par ouverture des fenêtres.

## 2 – 3. La vitesse d'air intérieure comme compensation des températures de l'air et des surfaces.



**Fig. 9 - Courbes d'iso-confort thermique pour trois vitesses d'air intérieure en fonction de la température d'air et de la température de surface (d'après Francis Allard et contributeurs, "Natural ventilation in buildings, a design handbook").**

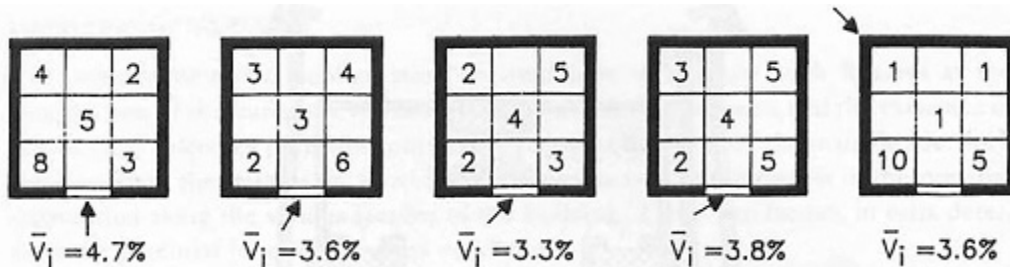
La figure 9 illustre la capacité d'une vitesse d'air intérieure à aider l'occupant à accepter un couplage Température d'air+Températures de surfaces plus élevé. Plus la vitesse d'air augmente, plus les températures supportées augmentent.

Il faut cependant observer que ce phénomène s'interrompt à 32°C pour la température d'air et à 30°C pour les températures de surfaces. Au delà de ces températures, le soufflage d'air a d'abord un effet neutre puis aggrave la sensation d'inconfort (« effet de sèche-cheveux »).



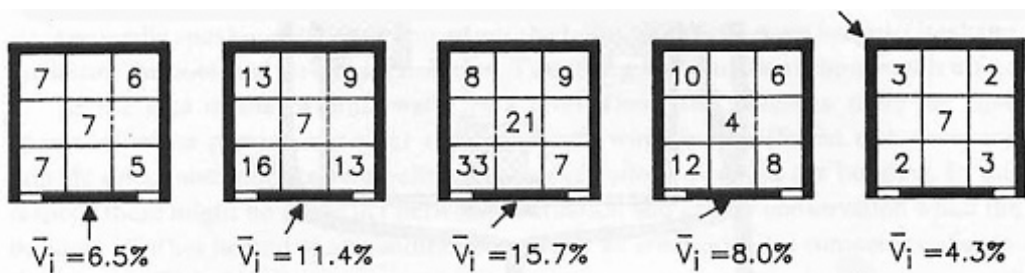
## 2 – 4. Exposition des fenêtres par rapport au vent.

Comme on l'a vu dans le § 1, le champ de pression diffère d'une façade à l'autre et d'un point de la façade à un autre. Les figures suivantes montrent les effets de la position des ouvertures sur la répartition des vitesses d'air intérieures, dans le cas où une seule façade est ouverte.



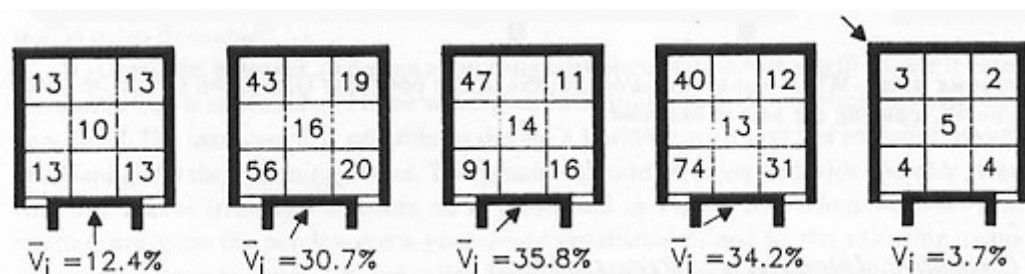
**Fig. 10A – Cas de la fenêtre unique, vitesses d'air intérieures en % de la vitesse extérieure en fonction du secteur du vent.**  
(Extrait de « Passive and low energy cooling of buildings » de B. Givoni.)

Avec une seule grande fenêtre, les vitesses d'air sont très faibles (4% en moyenne) pour tous les secteurs de vent.



**Fig. 10B – Cas de deux fenêtres, vitesses d'air intérieures en % de la vitesse extérieure en fonction du secteur du vent.**  
(Extrait de « Passive and low energy cooling of buildings » de B. Givoni.)

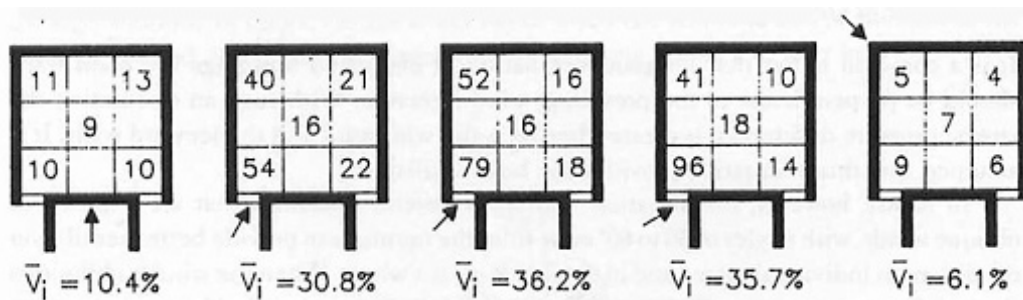
Avec deux fenêtres totalisant la même surface ouvrante et placées aux deux extrémités de la façade, on améliore la ventilation : la moyenne est maintenant de 9% et les différences commencent à être marquées entre les secteurs du vent.



**Fig. 10C – Cas de deux fenêtres avec flancs additionnels tels que  $P = L$ , vitesses d'air intérieures en % de la vitesse extérieure en fonction du secteur du vent.**  
(Extrait de « Passive and low energy cooling of buildings » de B. Givoni.)

Avec les mêmes ouvertures, l'ajout de flancs latéraux tels que leur profondeur  $P$  soit égale à la largeur  $L$  des fenêtres et placés de manière à créer une surpression sur la

première fenêtre et une dépression sur la seconde fait passer la vitesse moyenne à 23%. Le cas le plus favorable est celui du secteur de vent à 45° par rapport à la façade et les différences entre secteurs de vent sont très marquées.

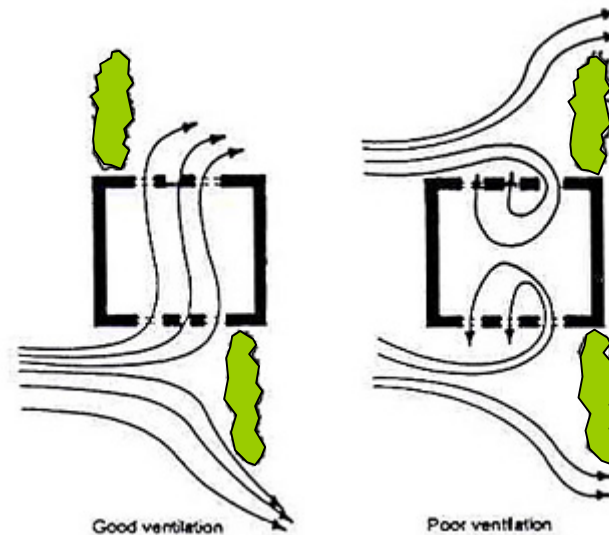


**Fig. 10D – Cas de deux fenêtres avec flancs additionnels tels que  $P = 2L$ , vitesses d'air intérieures en % de la vitesse extérieure en fonction du secteur du vent. (Extrait de « Passive and low energy cooling of buildings » de B. Givoni.)**

Avec les mêmes ouvertures, l'ajout de flancs latéraux tels que leur profondeur  $P$  soit égale à deux fois la largeur  $L$  des fenêtres modifie peu les vitesses moyennes intérieures mais bénéficie surtout au cas du vent arrière.

**Cette étude met en évidence une solution architecturale pour améliorer la ventilation de locaux en mono-exposition qui consiste d'abord à disposer de deux fenêtres au lieu d'une et à créer ensuite des flancs latéraux à ces fenêtres, de manière à créer des champs de pressions différents sur chacune d'elles.**

Ces flancs peuvent faire partie de la forme du bâtiment mais ils peuvent aussi être générés par des haies végétales (figure 11).

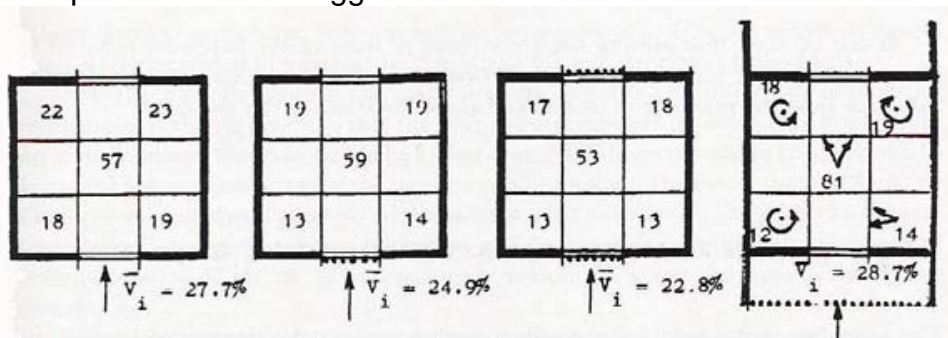


**Fig. 11 – Utilisation de haies végétales pour améliorer la ventilation : attention aux erreurs d'implantation ! (D'après Mat Santamouris et alii, « Natural ventilation in buildings, a design handbook »)**

## 2 – 5. Effet des moustiquaires

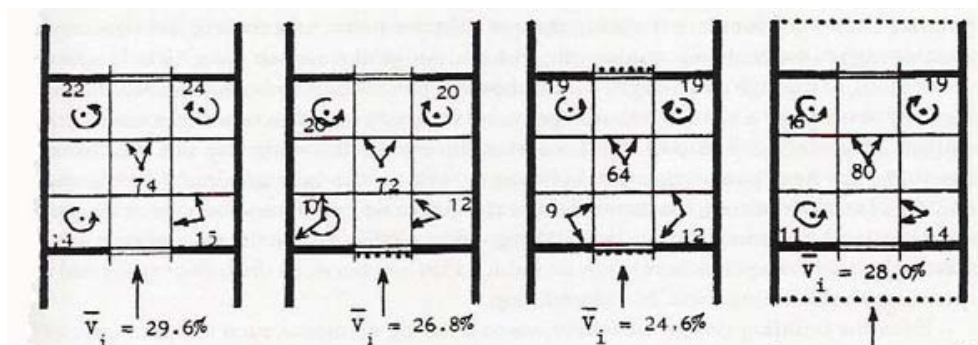
La présence d'insectes piqueurs est l'une des causes du non recours à la ventilation nocturne dans les climats où ce système est pourtant requis pour éviter la clim. C'est le cas dans les régions méditerranéennes, c'est pourquoi la question vaut la peine d'être abordée. Partant du fait établi que les moustiquaires diminuent inévitablement les débits d'air, Baruch Givoni a étudié des solutions pour réduire cette influence. L'étude a consisté à mesurer les vitesses d'air intérieures sur des modèles en soufflerie comportant une ouverture d'entrée et une ouverture de sortie d'air identiques représentant en tout 1/9<sup>e</sup> de la surface des murs. Les cas testés sont :

- Pas de moustiquaire
- Moustiquaire seulement sur ouverture d'entrée d'air
- Moustiquaires sur ouvertures d'entrée et de sortie d'air
- Moustiquaire seulement sur loggia d'entrée d'air
- Moustiquaires sur deux loggias.



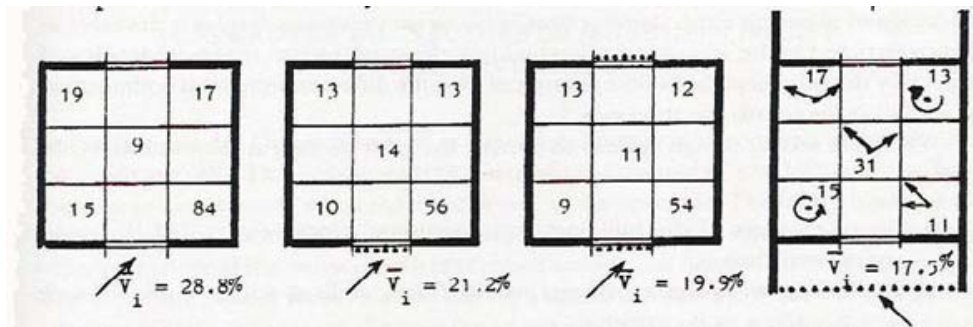
**Fig. 12A – Vitesses d'air intérieures en % de la vitesse extérieure sans et avec moustiquaires directement sur les ouvertures avec vent normal (Extrait de « Passive and low energy cooling of buildings » de B. Givoni.)**

La première série montre l'effet de ralentissement de la vitesse d'air intérieure avec un puis deux moustiquaires directement plaqués sur les ouvertures, avec vent normal à la façade d'entrée. Dans le cas où il y a un seul moustiquaire côté entrée d'air, le fait de le placer en loggia (dessin de droite) permet de récupérer les vitesses du cas sans aucun moustiquaire.

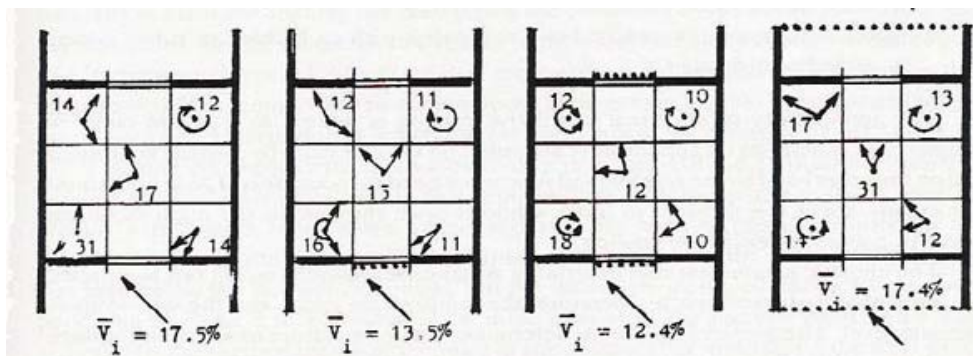


**Fig. 12B – Vitesses d'air intérieures en % de la vitesse extérieure sans et avec moustiquaires en loggia avec vent normal (Extrait de « Passive and low energy cooling of buildings » de B. Givoni.)**

La deuxième série compare les effets des moustiquaires en cas de loggias en façades opposées. La solution des moustiquaires sur loggias est la meilleure.



**Fig. 12C – Vitesses d’air intérieures en % de la vitesse extérieure sans et avec moustiquaire directement sur les ouvertures avec vent oblique (Extrait de « Passive and low energy cooling of buildings » de B. Givoni.)**



**Fig. 12D – Vitesses d’air intérieures en % de la vitesse extérieure sans et avec moustiquaire en loggias avec vent oblique (Extrait de « Passive and low energy cooling of buildings » de B. Givoni.)**

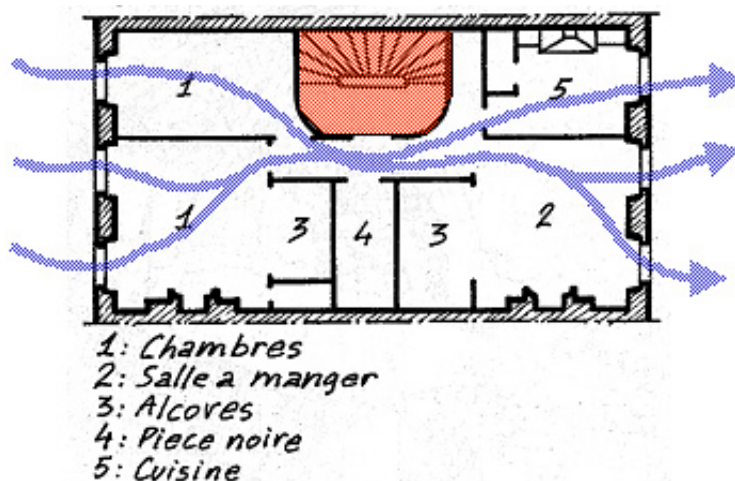
Les séries 3 et 4 sont les mêmes que les séries 1 et 2 mais avec vent oblique à la façade (à 45°). Cette fois-ci, le moustiquaire directement sur ouverture d’entrée est plus performant globalement que le moustiquaire sur loggia qui offre cependant une vitesse d’air au centre de l’espace plus importante. Dans le cas généralisé des loggias, il reste préférable de placer les moustiquaires sur les balcons.

En conclusion, la solution de disposer les moustiquaires sur de plus grandes surfaces en balcons ou loggias est préférable. Notons tout de même que cela vaut pour des nuits où il y a des déplacements d’air extérieurs (vitesse d’air extérieure non nulle). Nous savons tous que par temps anticyclonique d’été, les nuits sont caractérisées souvent par l’absence de toute brise. Dans ce cas, le moteur de la ventilation repose exclusivement sur la différence de températures entre l’air extérieur et l’air intérieur (voir la formule (2) page 6 et la figure 8 page 8).

### 3 – Capacité des plans d'habitations à favoriser la ventilation naturelle

La disposition de fenêtres sur des façades opposées constitue le système le plus efficace pour ventiler une habitation. C'est facile à faire dans le cas d'une habitation individuelle car on dispose en général de quatre façades ou au moins de deux en cas de construction « en bande ».

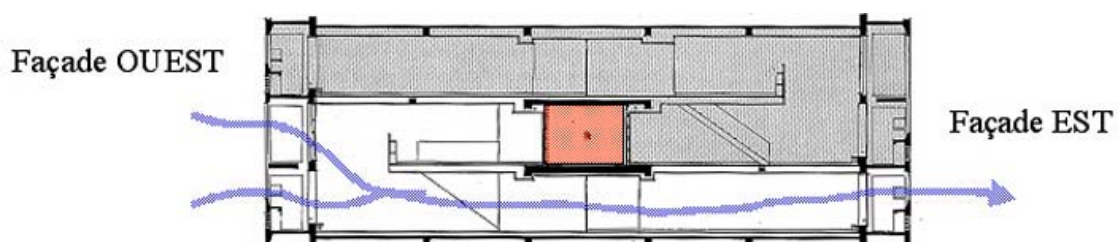
Pour les immeubles collectifs, c'est plus difficile, surtout pour les petits types de logement (T1 et T2). Nous présentons ici quelques exemples de plans où les ouvertures sont disposées en façades opposées, du 19<sup>e</sup> siècle à nos jours, relatifs à des bâtiments construits ou constructibles en région méditerranéenne.



#### Le « 3 fenêtres marseillais »

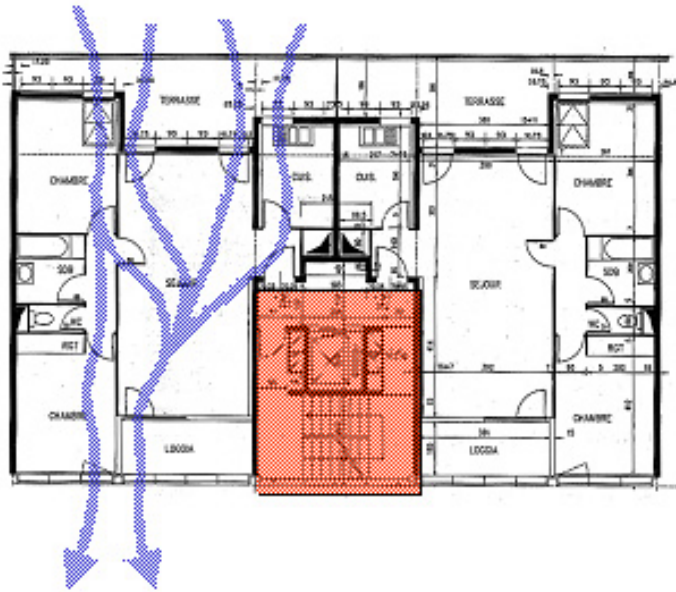
Toute la ville du 19<sup>e</sup> siècle est construite sur ce modèle qui favorise grandement la ventilation transversale, avec des expositions diverses alternant entre la rue et le cœur d'îlot.

(Dessin tiré de la plaquette « Le bâti ancien à Marseille », EDF-Atelier du Patrimoine, 1983)



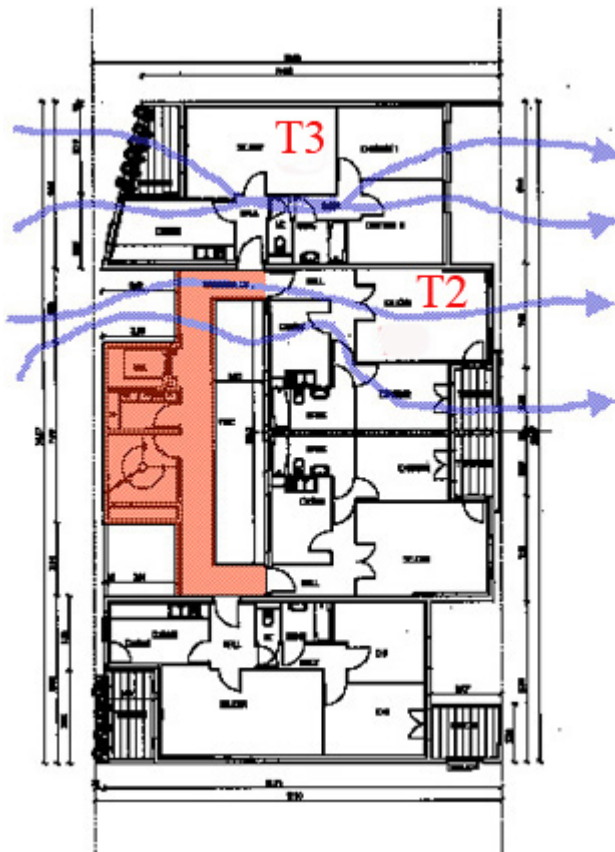
#### L'Unité d'Habitation du Corbusier

Toujours à Marseille, un exemple de logements traversants sur une grande profondeur avec des expositions EST-OUEST, rend la ventilation transversale plus facile, surtout avec la présence des loggias.



### Immeubles à Paris, Renzo Piano

En se limitant à deux logements par palier avec des types 4, on peut s'arranger pour avoir double exposition avec espace extérieur : c'est que qu'a fait Renzo Piano à la rue de Meaux.



### Opération REX HQE à Nice

Une des premières opérations HQE (1995) : elle visait le confort d'été et avait pointé l'importance de la ventilation transversale dans le climat de Nice. La solution retenue est la desserte par coursive extérieure décollée au droit des T2, leur permettant l'ouverture d'une deuxième façade. Les coursives et le bloc de circulation verticale assurent en plus une protection solaire en exposition OUEST.

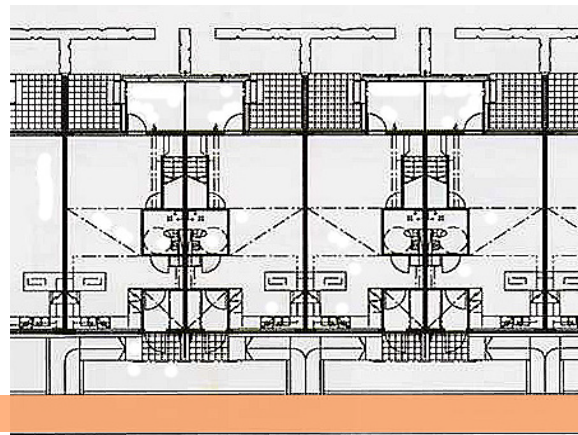
### Utilisation de coursives

Une tendance lourde de l'éco-architecture en matière de bâtiments pour habitations collectives consiste à desservir les logements par des coursives extérieures. Cette solution a des vertus de diverses natures : sociologiques en rendant les accès plus individuels si la coursive est décollée, thermiques d'hiver par dissociation structurelle avec le bâtiment, thermique d'été en rendant possible la ventilation transversale.



**Immeuble REX HQE de Nice : Vue des coursives l'après-midi en été : effet d'ombre des coursives sur la façade OUEST des T2 : au fond, les entrées des T3.**

Deux exemples européens (du Nord) d'immeubles avec coursives : Helsinki (quartier écologique Viikki) et Freiburg im Breisgau, Allemagne (quartier écologique Vauban) :



**Coursives à Helsinki (en haut) : décollées en façade SUD, desservent des duplex traversants**

**Coursives à Freiburg (à droite) : collées en façade NORD, desservent des simplex traversants.**



Plus près de nous, l'immeuble Salvaterra à Rennes est construit avec des coursives NORD. Dans les Dom-Tom, on peut voir également des immeubles à coursives comme par exemple à Saint Denis de la Réunion (photo suivante).



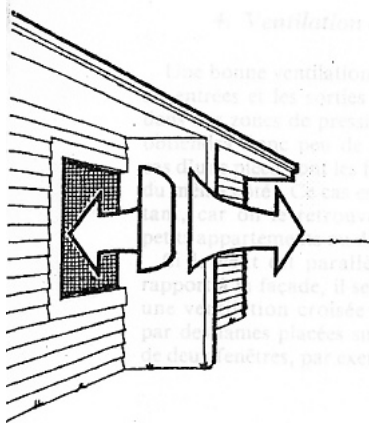
**Immeuble à Saint  
Denis de la  
Réunion :**

Les coursives sont  
décollées et pourvues de  
plaques de plexiglass  
pour atténuer les effets  
des cyclones, mais le  
garde-corps est bien  
perméable à l'air.



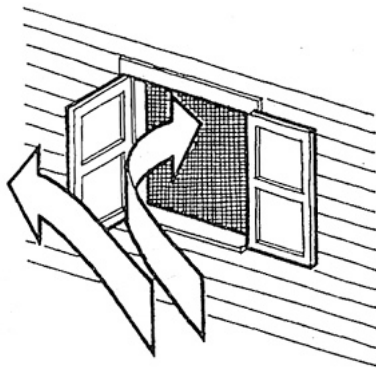
## 4 - Capacité des détails architecturaux à faciliter la ventilation naturelle

Vis à vis de la ventilation naturelle, la question des détails architecturaux mérite d'être posée d'abord lorsque l'on se trouve dans le cas de la mono-exposition.



Nous avons vu l'influence de l'ajout de flancs en cas de mono-exposition dans les résultats des travaux de Baruch Givoni. Cela peut se faire par un ouvrage rapporté ou, si les conditions d'hiver l'autorisent, par une saillie de refends contre laquelle on disposera la fenêtre.

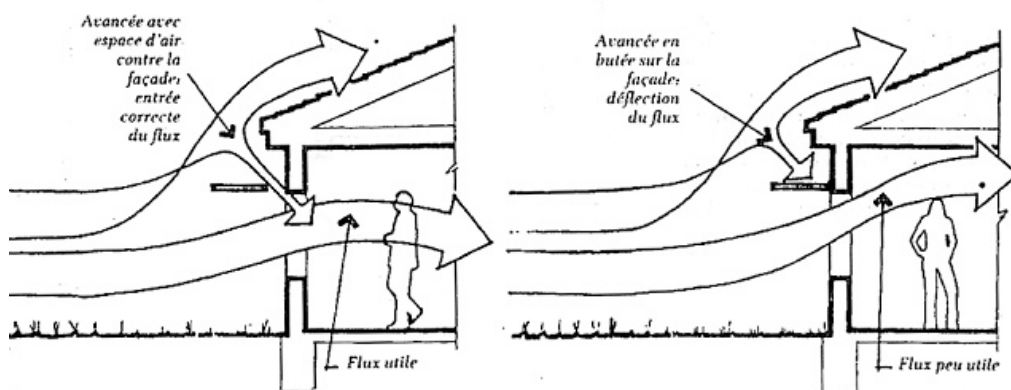
**(Image tirée de Roger Camous, Donald Watson, « L'habitat bioclimatique »)**



Cela peut se faire aussi par l'intermédiaire de fermetures que l'on peut bloquer en position perpendiculaire à la façade.

**(Image tirée de Roger Camous, Donald Watson, « L'habitat bioclimatique »)**

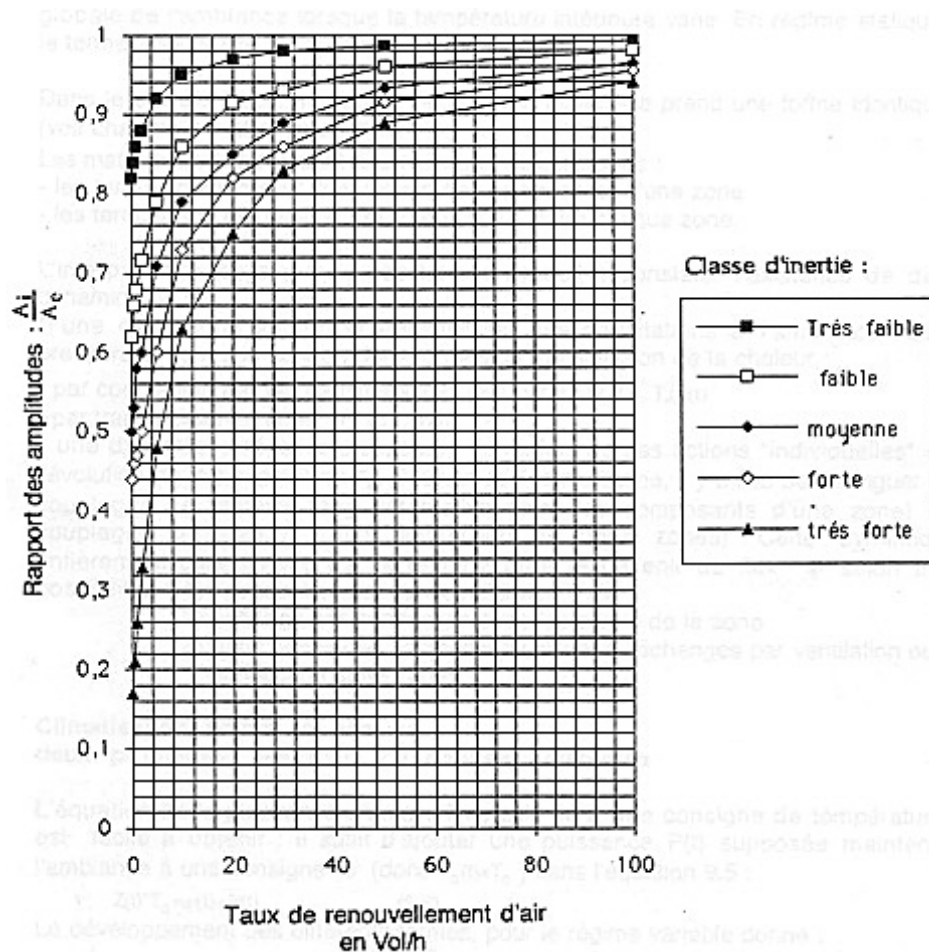
Dans tous les cas, même avec la ventilation transversale, il peut être intéressant de faire en sorte que la définition de la façade favorise la ventilation ; cela peut servir par exemple à diminuer la surface ouvrante.



Des « déflecteurs » peuvent aussi être mis en œuvre : dans le cas d'auvents, il est recommandé de les décoller de la façade comme le montrent Roger Camous et Donald Watson, dans « L'habitat bioclimatique ».

## 5 - Relation Ventilation-Inertie thermique

Une forte ventilation réduit ou annule les effets de « **l'inertie thermique par absorption** » comme le montre la figure 13 :



**Fig. 13 - Effet du débit de ventilation sur le rapport d'amplitudes en fonction de la classe d'inertie (d'après Mohamed Abdesselam, «*Conception thermique des bâtiments résidentiels en climatisation naturelle en Côte d'Ivoire* » )**

Plus le taux de ventilation augmente, plus on s'approche des conditions extérieures ; par conséquent, le rapport d'amplitudes  $A_i/A_e$  tend vers l'unité, ce qui pour des constructions à forte inertie dont le rapport  $A_i/A_e$  est de l'ordre de 0,2 correspond à une forte augmentation.

Ce constat est à l'origine du principe que sous des conditions nécessitant une forte ventilation des locaux (climats tropicaux ou climats à étés chauds et humides), la priorité donnée à la ventilation rend inutile le recours à l'inertie thermique par absorption (voir l'article sur le **diagramme bioclimatique**).

## 6 – Systèmes architecturaux de captation d'air

On peut aller plus loin dans la conception des bâtiments en matière de ventilation naturelle en utilisant des systèmes capteurs d'air, puis en distribuant à l'intérieur des locaux cet air choisi pour être plus frais ou que l'on refroidit par contact avec des parois plus froides enterrées ou par humidification dans les climats arides.

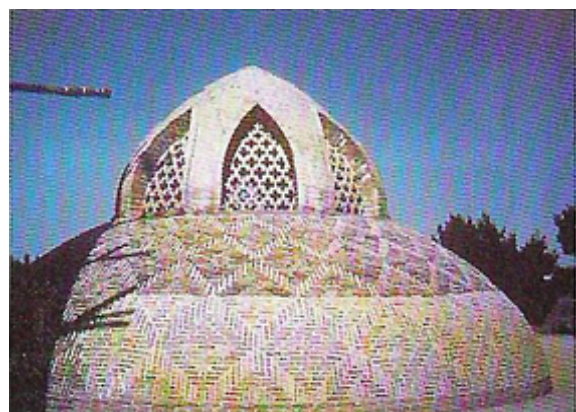
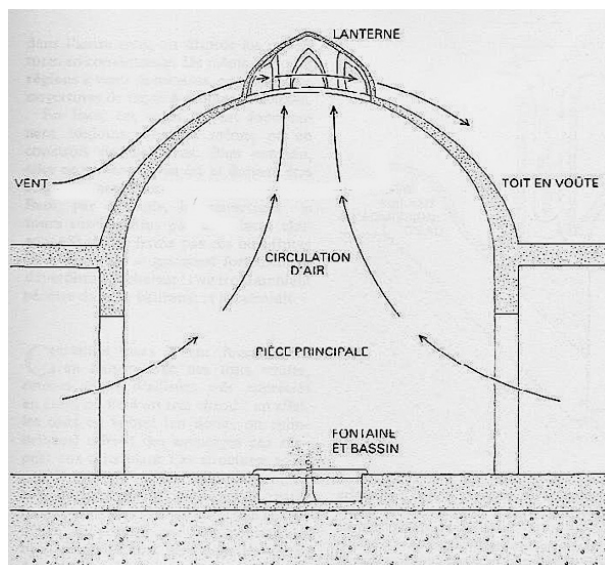
On peut aussi faire appel au refroidissement « géothermique » en faisant circuler l'air extérieur dans des conduits souterrains où celui-ci se rafraîchit par échange de chaleur sensible avec le sol plus frais en été.

### 6 – 1. Capteurs de vent et tours à vent

Le principe (« badgir » en Iran, « malqaf » en Egypte, « mangh » au Pakistan) est en général toujours le même : capter l'air extérieur à une hauteur suffisante pour échapper au moins partiellement à « l'effet de couche limite » et pour éviter les poussières, puis l'obliger à transiter par un volume bas plus frais ou par un système où il pourra subir un refroidissement évaporatif (l'air des régions où ce principe est appliqué est en général très sec et facilite une évaporation intense provoquant un refroidissement très important). Cela oblige à prévoir des volumes de grande hauteur de manière à bénéficier de la **stratification thermique** de l'air intérieur, l'air supérieur plus chaud pouvant être évacué par des ouvertures hautes.

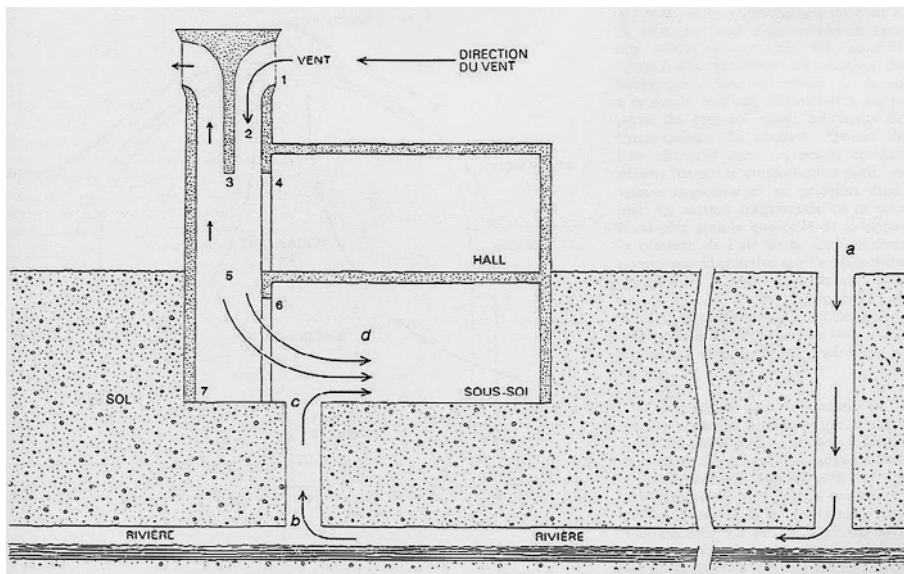
#### A - Exemples dans l'architecture ancienne ou vernaculaire

Une variante plus modeste de ce système consiste à pratiquer un trou d'aération au sommet d'un dôme : le trou est protégé par un petit dôme comportant des ouvertures dans diverses orientations. La dépression qui se forme côté extérieur allée à la stratification thermique à l'intérieur du dôme crée un courant ascendant à l'origine d'un appel de l'air des pièces situées en périphérie (figure 14).

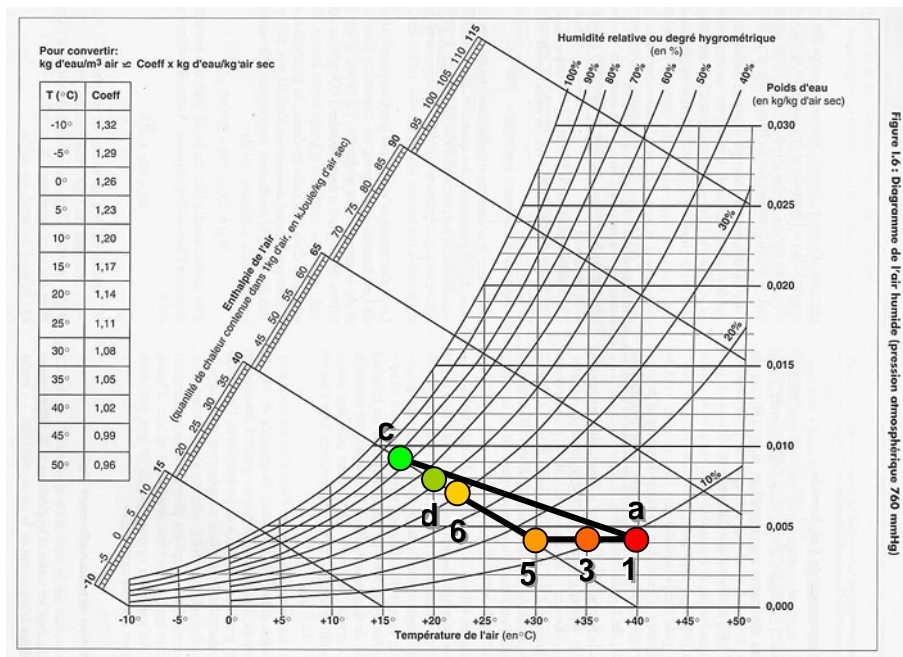


**Fig. 14 – Fonctionnement d'un dôme percé d'un trou d'aération (d'après Mehdi N. Bahadori, « Les systèmes de refroidissement passifs dans l'architecture iranienne »)**

Mehdi N. Bahadori explique le fonctionnement des tours à vent avec humidification de l'air à l'aide d'un cours d'eau souterrain (figure 15).



**Fig. 15 – Combinaison d'une rivière souterraine et d'une tour à vent (d'après Mehdi N. Bahadori, « Les systèmes de refroidissement passifs dans l'architecture iranienne »)**

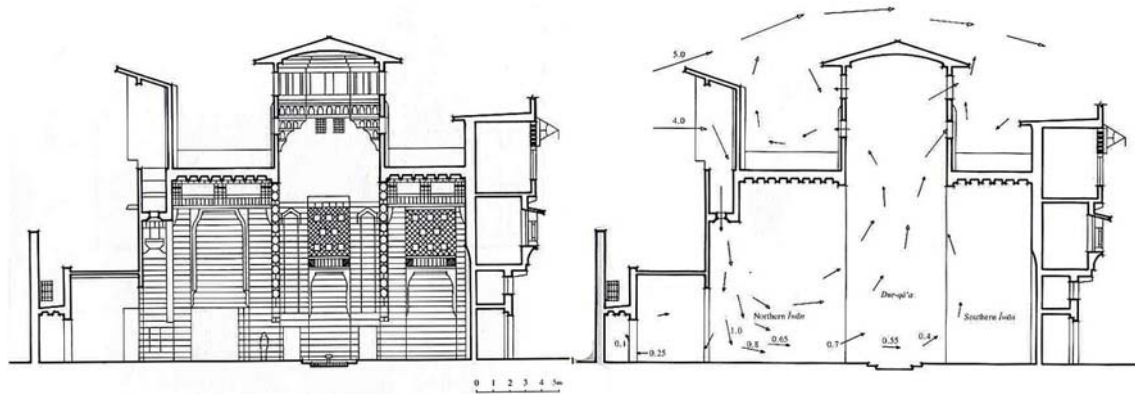


**Fig. 16 – Etats de l'air circulant dans le système montré en figure 14 (d'après Mehdi N. Bahadori, « Les systèmes de refroidissement passifs dans l'architecture iranienne ») :**  
**Etats 1 à 5 :** refroidissement de l'air de la tour par contact avec les parois plus fraîches ;  
**Etat 6 :** humidification par les parois humides souterraines ;  
**Etats a, b et c :** rafraîchissement et humidification par la rivière ;  
**Etat d :** résultat du mélange des airs 6 et c.

Le principe de fonctionnement de ce couplage Tours à vent + Rivière souterraine est expliqué par la figure 16. On compte bien à la fois sur un refroidissement sensible par

contact de l'air extérieur capté avec des conduits souterrains et sur un refroidissement latent par humidification au contact du cours d'eau.

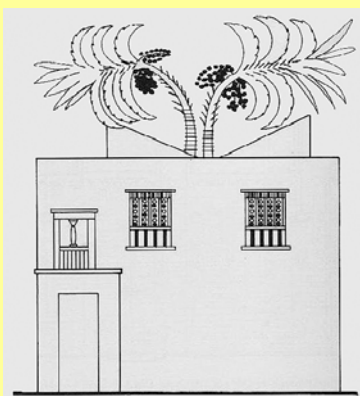
N.B. : les valeurs données par le diagramme de la figure 17 sont à prendre avec prudence quant à la performance absolue de refroidissement qu'elles indiquent : c'est le type de profil qu'il faut retenir.



**Fig. 17 - Malqaf : circulation de l'air sous l'effet d'un vent venant de la gauche dans le palais de Othman Katkhuda construit XIVe siècle au Caire (d'après Hassan Fathy, « *Natural Energy and vernacular Architecture, principles and examples with reference to hot arid climates* »)**

En Egypte, les systèmes de captage du vent prennent le nom de **malqaf**. Le palais de Othman Katkhuda construit au XIVe siècle au Caire fournit une excellente illustration de ce système. Les étudiants de « l'Architectural Association School of Architecture in London » ont fait des mesures des déplacements d'air le 2 avril 1973 à l'intérieur du palais: la longueur des flèches représente la vitesse d'air (dessin à droite dans la figure 20).

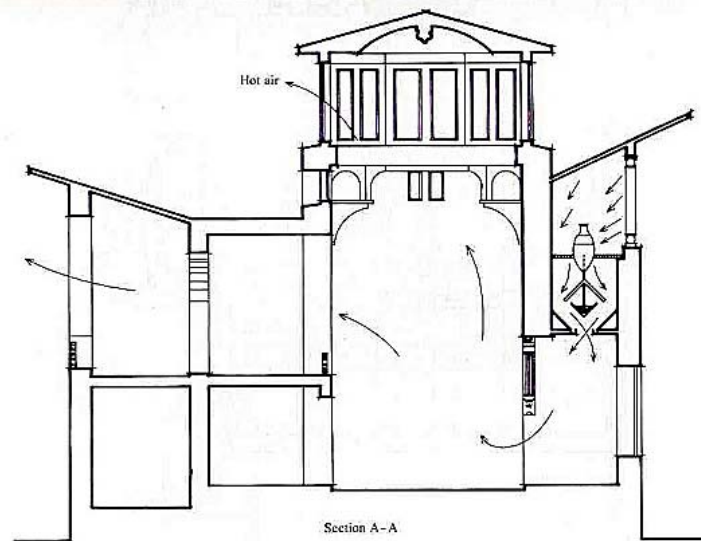
### Le malqaf, une très ancienne technique...



L'utilisation du malqaf remonte aux premiers temps historiques : il était utilisé dans les maisons des anciens égyptiens de Tal Al-Amarna et on en trouve une représentation murale dans les tombeaux de Thèbes. Hassan Fathy dans « *Natural Energy and vernacular Architecture, principles and examples with reference to hot arid climates* » signale qu'on peut voir un dessin de malqaf de la maison pharaonique de Neb-Amun datant de la 9<sup>e</sup> dynastie (1300 avant J.C.) gravé sur sa tombe.

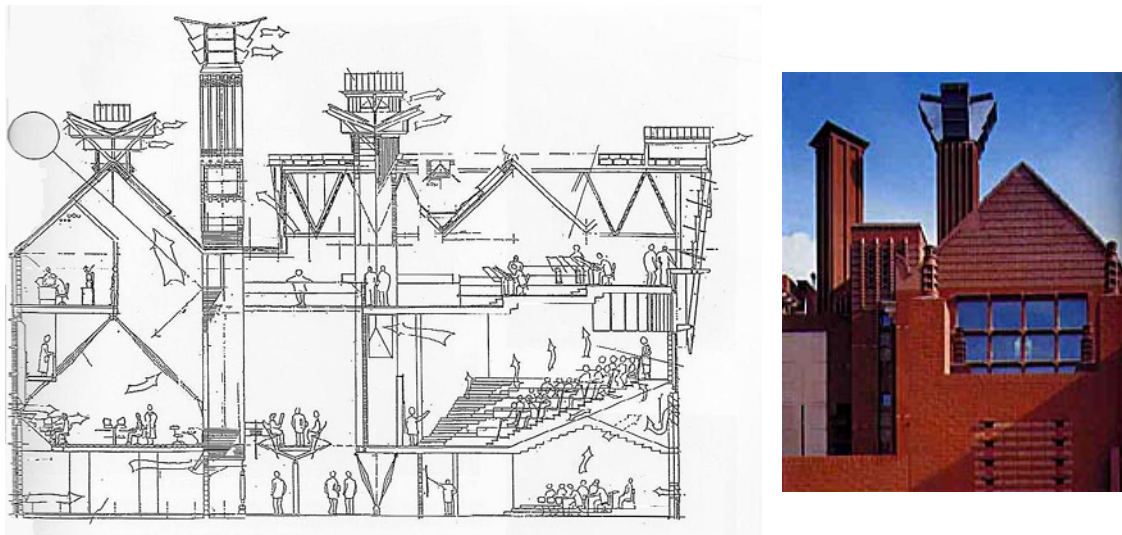
## B - Exemples dans l'architecture moderne et contemporaine

Dans sa carrière d'architecte, Hassan Fathy a proposé d'utiliser le système du malqaf sur certains de ses projets égyptiens.



**Fig. 18 - Système de capteur de vent avec rafraîchissement évaporatif par effet gargoulette proposé par Hassan Fathy et publié dans « *Natural Energy and vernacular Architecture, principles and examples with reference to hot arid climates* ».**

En Angleterre, les architectes n'hésitent pas à mettre en œuvre d'immenses cheminées d'aération qui peuvent parfois fonctionner comme des capteurs de vent. C'est le cas du fameux projet d'Ecole d'ingénieurs de Leicester.



**Fig. 19 – Ecole d'ingénieurs de Leicester, Angleterre, (Peake Short & Partners, architectes), d'après Brian Ford and Alan Short, «*Design of a naturally ventilated laboratory building in Leicester, England*».**

On retrouve cette tendance à la démonstration de grandes cheminées sur le bâtiment du Building Research Establishment. à Garston (UK), construit par Feilden Clegg architects en 1996, où on utilise **l'effet de cheminée solaire** qui aide au tirage de la ventilation par extraction en été comme en hiver.



Fig. 20 – Façade du bâtiment du B.R.E. à Garston, UK, (d'après la fiche de « l'European Green Building Forum ») [www.w-e.nl](http://www.w-e.nl)

Dans cette catégorie on peut aussi classer les **tours aéro-réfrigérantes** par brumisation (à ne pas confondre avec leurs homologues destinées à refroidir l'eau des systèmes de climatisation ou des centrales nucléaires), mises en œuvre pour la première fois à l'Expo 92 à Séville (« Rotonde bioclimatique », figure 21), que Mario Cucinella cherche à réutiliser dans des projets de bâtiments tertiaires bioclimatiques (figure 22).

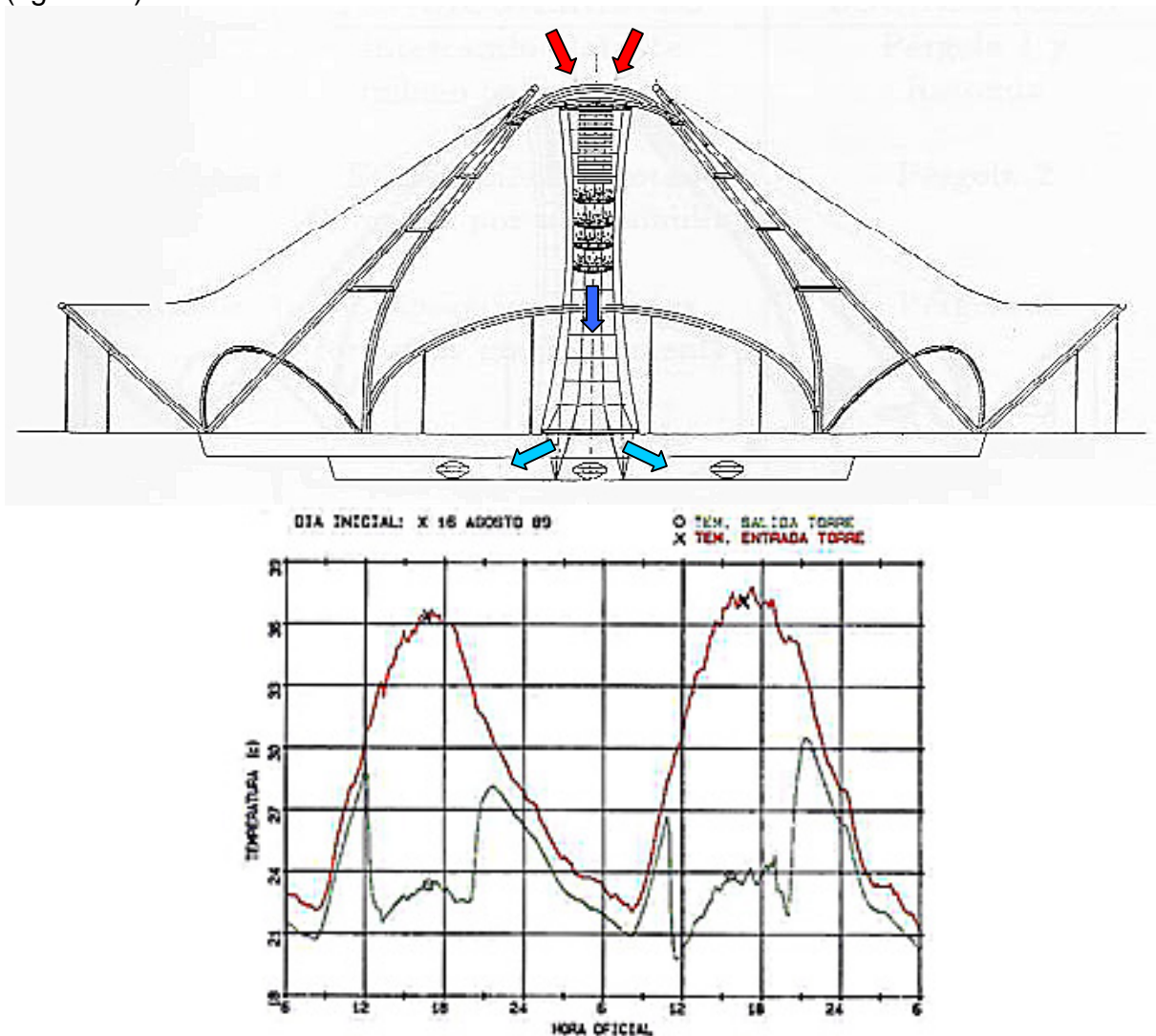
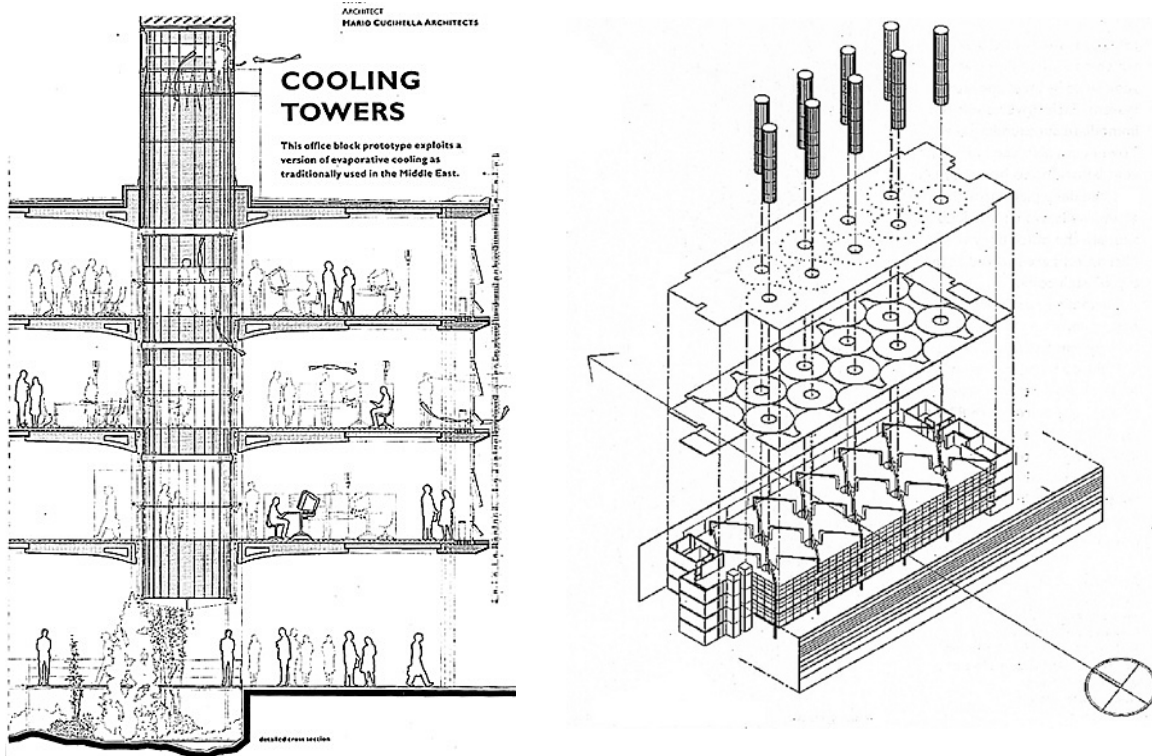


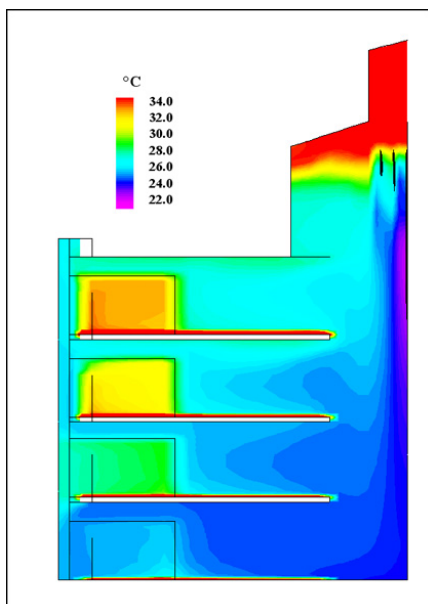
Fig. 21 – La Rotonde bioclimatique à l'Expo 92 de Séville : coupe de principe (en haut), aperçu de la performance thermique (en bas) : en rouge, la température d'entrée, en noir, la température de sortie (d'après Alvarez Dominguez et alii, « *Control climatico en espacios abiertos ; el proyecto EXPO'92* »)

## Les bonnes idées de Mario Cucinella

L'architecte italien Mario Cucinella tente depuis quelques années d'utiliser des systèmes passifs de rafraîchissement de l'air par brumisation inspirés de la « rotonde bioclimatique » de Séville. Ses projets se situent à Catane (Sicile) et en Arabie Saoudite (Ministère du Tourisme à Riyadh) où règnent des conditions favorables à l'utilisation de systèmes de refroidissement évaporatifs. Le principe repose sur une répartition de tours à brumisation à l'intérieur du bâtiment assurant chacune le rafraîchissement d'une zone du plancher à chaque niveau.



**Fig. 22 – Mario Cucinella : projet de bâtiment tertiaire à Catane (Sicile)**



Des simulations ont été faites avec un outil CFD pour montrer les champs de températures selon divers scénarios de fonctionnement. La figure 23 montre l'efficacité du refroidissement obtenu à l'étage de brumisation, en partie supérieure de la tour. On peut facilement obtenir une chute de température de l'ordre de 8°C et distribuer l'air rafraîchi à tous les étages. On peut noter qu'il est plus facile de rafraîchir les niveaux les plus bas.

**Fig. 23 – Champs de températures d'air calculés avec un outil CFD sur le projet de Mario Cucinella à Catane ; cas de l'ouverture complète des locaux sur la tour.**



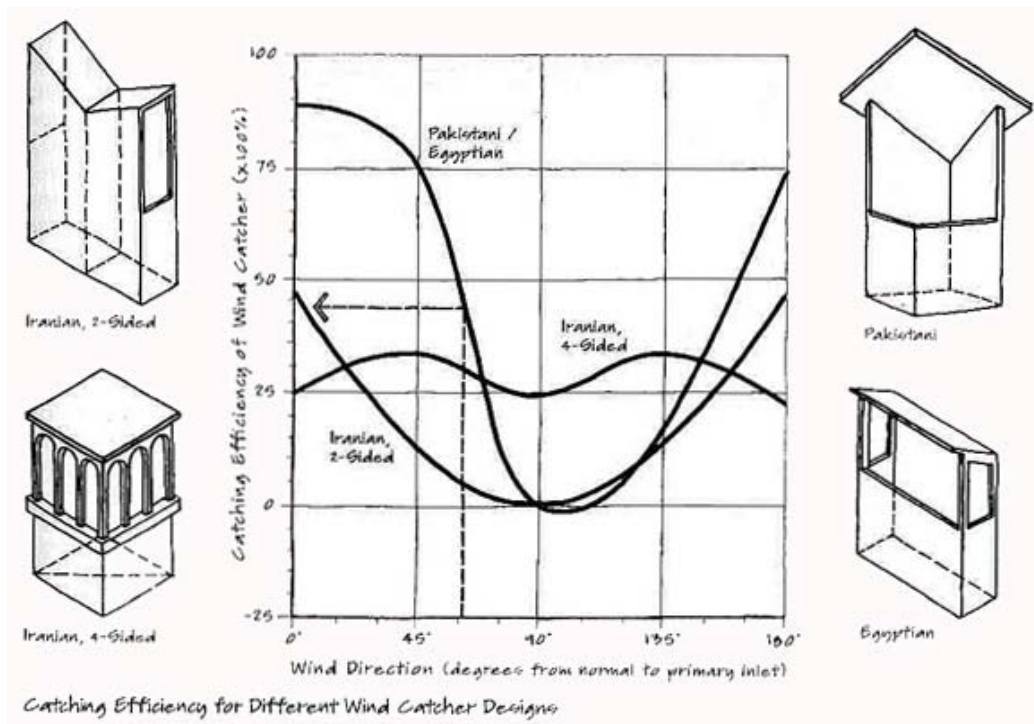
## Tours aéroréfrigérantes et légionelloses

Dans le jargon des spécialistes, les « tours aéroréfrigérantes » (« cooling towers ») désignent des systèmes associés à la climatisation que l'on rencontre sur les toits des bâtiments ou, à une échelle beaucoup plus grande, sous forme de ces immenses *hyperboloïdes de révolution* à proximité des centrales nucléaires. Cependant, il y a lieu de distinguer entre deux fonctions qui à première vue se ressemblent, mais qui sont foncièrement différentes :

- La fonction de **refroidissement d'eau chaude** avant restitution dans la nature (centrales nucléaires); il y a alors un produit secondaire qui est de l'air chaud et humide, souvent matérialisé par le panache de condensation de la vapeur d'eau. Dans ce cas, il se crée à l'intérieur de la tour un courant d'air ascendant;
- La fonction de **refroidissement de l'air par brumisation** à l'intérieur de la tour qui crée un courant d'air descendant; il s'agit alors d'un véritable système passif de refroidissement (Expo'92, propositions architecturales de Mario Cucinella).

Les conditions différentes liées à ces deux fonctions distinctes font que les risques de légionellose ne sont pas du tout les mêmes : si les tours aéroréfrigérantes des systèmes de climatisation sont souvent incriminées lorsque des cas de légionellose sont déclarés, à cause du niveau de température de l'eau avant refroidissement, le risque est bien moindre voire nul avec les systèmes de brumisation qui utilisent en général l'eau « fraîche » des réseaux. Rappelons que la légionellose est une maladie pulmonaire très grave dont les vecteurs sont les aérosols d'eau contaminée par la *legionella*.

## C - Dimensionnement des tours à vent

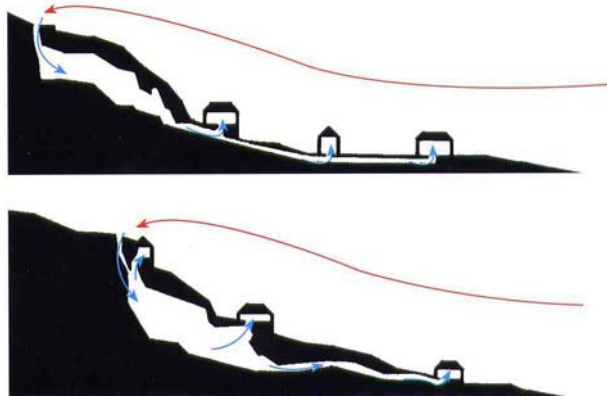


**Fig. 24 – Efficacité des capteurs de vent selon le type et la direction du vent par rapport à la façade d'entrée de l'air (d'après G.Z. Brown & Mark Dekay: "Sun, Wind & Light; architectural design strategies")**

La figure 24 montre l'efficacité, définie comme le rapport du débit d'air pénétrant dans la tour et du produit de la vitesse du vent par la section de la tour ( $(\text{m}^3/\text{s})/(\text{m}/\text{s} \times \text{m}^2)$  en %), de quatre configurations de tours à vent en fonction de l'incidence du vent par rapport à la façade d'entrée de l'air. Les versions égyptienne et pakistanaise en mono-ouverture sont très efficaces (>75%) lorsque le vent se présente sous une incidence inférieure à 45° puis leur efficacité s'effondre au delà de cette incidence. Les tours à multi-entrées (Iraniennes) ont une efficacité moins sensible à l'incidence du vent mais ont une efficacité en moyenne plus faible (25%).

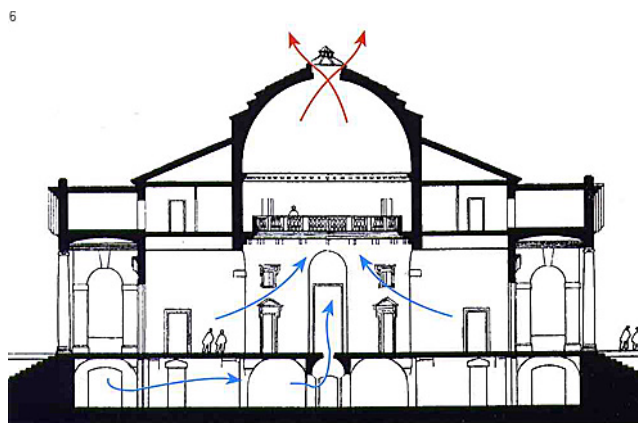
## 6 – 2. Systèmes de rafraîchissement géothermiques

Plusieurs auteurs rappellent que des villas ont été édifiées à Costozza, près de Vicence en Italie au XVII<sup>e</sup> siècle, au pied d'une colline dont le sol comporte des cavernes naturelles ou en partie artificielles (« *covoli* ») de manière à exploiter l'air frais du sous-sol (température constante voisine de 12°C). Il s'agit ici d'une version primitive du « puits provençal » mais en beaucoup plus efficace du fait de la constance de la température que l'on est loin d'obtenir avec des conduits enterrés à -1,50m.



**Fig. 25 - Systèmes de ventilation sous-terrains des Costozza villas dont Palladio s'est inspiré pour rafraîchir les villas qu'il a construites à Vicence (d'après Sophia and Stefan Behling , « *Solar Power, the evolution of sustainable Architecture* »)**

Andrea Palladio avait noté dans ses fameux « *Quattro libri dell'architettura* » de 1570 l'existence de ces villas et il a lui-même utilisé un système de rafraîchissement pour la Villa Rotonda à Vicence où l'air aspiré par la coupole transite par les sous-sols de la villa avant de pénétrer dans le volume habitable par l'intermédiaire d'une grille ouvragée.



**Fig. 26 - Coupe de la Villa Rotonda (Andrea Palladio) à Vicence utilisant le rafraîchissement par le sous-sol et l'extraction par la clé de voûte du dôme (d'après Sophia and Stefan Behling , « *Solar Power, the evolution of sustainable Architecture* »)**

Ce principe est également utilisé dans les galeries urbaines italiennes, notamment à la galerie Victor Emmanuel de Milan.

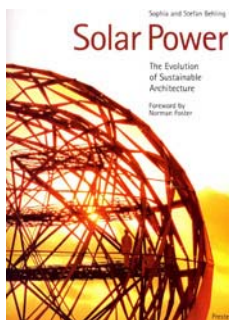
## Bibliographie



**Claude-Alain Roulet, « Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments » ; Presse Polytechnique Universitaires Romandes ; 2004**

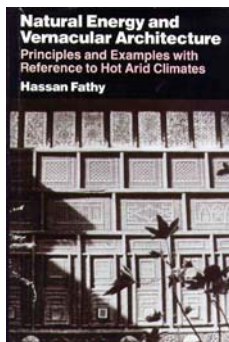
- **Ouvrage complet couvrant les principes de la conception écologique de l'architecture, notamment les principes d'une bonne ventilation des locaux.**

**Roger Camous, Donald Watson, « L'habitat bioclimatique, Chap. 8 La ventilation naturelle », L'Étincelle.**



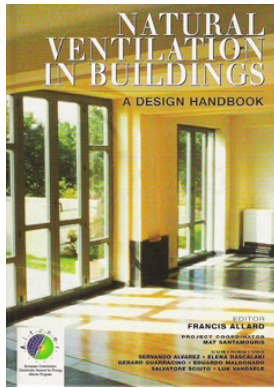
**Sophia and Stefan Behling , « Solar Power, the evolution of sustainable Architecture », Prestel Verlag, Munich, 2000.**

- **Très bel ouvrage rédigé en anglais retraçant l'histoire de l'habitat vernaculaire adapté et montrant les réalisations récentes en matière d'éco-architecture dans le monde.**



**Hassan Fathy, « Natural Energy and vernacular Architecture, principles and examples with reference to hot arid climates », University Chicago Press, Chicago, 1986.**

- **Passionnant ouvrage (en anglais) présentant les techniques vernaculaires (Iran, Egypte) de captage de vent et de refroidissement par humidification de l'air capté, mises en œuvre sur des bâtiments remarquables.**



Francis Allard et divers contributeurs, “*Natural ventilation in buildings, a design handbook*”; James & James, Altener, 1998- réédition 2002.

- **Ouvrage collectif à caractère scientifique traitant de l’art de ventiler les locaux, de résultats expérimentaux et des outils de simulation aéraulique : le logiciel « AIOLOS » est fourni sur CD.**



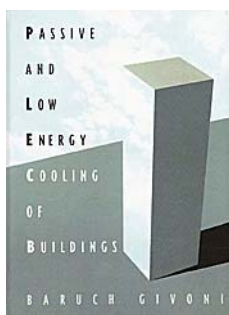
C. Sacré, J.R. Millet, J. Gandemer, G. Barnaud, « *Guide sur la climatisation naturelle de l’habitat en climat tropical humide ; Tome 1 : Méthodologie de prise en compte des paramètres climatiques dans l’habitat et conseils pratiques* » ; CSTB 1992.

- **Guide pédagogique à destination des concepteurs de bâtiment désireux de construire des bâtiments climatiquement adaptés dans les DOM-TOM (Guadeloupe, Martinique, Réunion).**



G.Z. Brown & Mark DeKay: “*Sun, Wind & Light; architectural design strategies*”, second edition; John Wiley & Sons, New York, 2000.

- **Excellent ouvrage superbement illustré et très complet sur la conception durable des bâtiments, comportant d’innombrables abaques de prédimensionnement du projet par rapport à l’énergie, les ambiances, l’aéraulique et la lumière naturelle. Un seul regret : c’est en anglais et les unités sont celles des USA !**

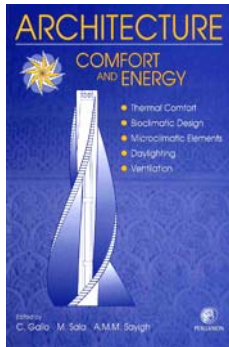


B. Givoni, « *Passive and low energy cooling of buildings, chap. 3, Ventilative cooling*”, pp 37-80; John Wiley & sons, New York, 1994.

- **Tout un chapitre traite de l’exploitation de la ventilation vue comme système passif de refroidissement avec de très intéressantes expérimentations dont il est fait état dans notre article.**

**Frédéric Bonneaud, « Ventilation naturelle de l’habitat dans les villes tropicales ; contribution à l’élaboration d’outils d’aide à la conception » ; Thèse de doctorat,**

Université de Nantes, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, CERMA UMT CNRS 1563 ; 12 Février 2004.



C. Gallo, M. Sala, A.M.M. Sayigh + alii, « *Architecture Comfort and Energy* », Elsevier Pergamon Press, Amsterdam; 1988.

- **Ouvrage collectif traitant des ambiances architecturales, dont la ventilation fait partie. Evocation des systèmes de refroidissement passifs.**

Alvarez Dominguez et alii, « *Control climatico en espacios abiertos; el proyecto EXPO'92* » ; Grupo de Termotecnia, Dpto de Ingeniera Energética y Mecanica de Fluidos, Universidad de Sevilla ; Ciemat ; 1992.

Mehdi N. Bahadori, « *Les systèmes de refroidissement passifs dans l'architecture iranienne* » ; article pp. 14-23 dans la revue Pour la Science N°6 ; Edit. Scientific American, Avril 1978.

- **Excellent article de 10 pages illustrées expliquant le fonctionnement des systèmes passifs de refroidissement iraniens datant probablement d'un millénaire : tours à vent, rafraîchissements évaporatifs et même glaciers en plein désert.**

R. Daler, F. Haberda, E. Hirsch and U. Knöbel, « *Ventilation patterns of windows and adjustable natural ventilation systems* » ; 3<sup>rd</sup> AIC Conference, London, September 20-23 1982.

I. Chand, « *Prediction of air movement in building* », Building Digest, Central Building Research Institute, India, September 1972.

Brian Ford and Alan Short, « *Design of a naturally ventilated laboratory building in Leicester, England* » ; art. in Architecture and urban space, 319-324, Kluwer Academic Publishers, 1991.

Mohamed Abdesselam, « *Conception thermique des bâtiments résidentiels en climatisation naturelle en Côte d'Ivoire* » ; rapport ADEME/Ministère de la Coopération, Juin 1995.