



**LA
PROTECTION
CONTRE
LE
VENT**

AÉRODYNAMIQUE DES BRISE-VENT ET CONSEILS PRATIQUES

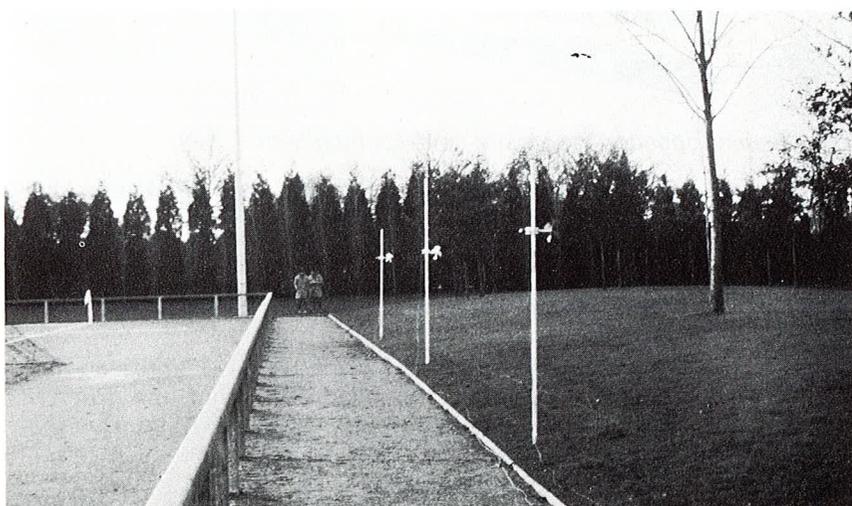
Borneau P.

**LA PROTECTION
CONTRE LE VENT**

De la saison

En fonction du cycle des saisons, la protection derrière un feuillage caduc, par exemple, peut devenir inexistante.

Par suite, pour caractériser les performances aérodynamiques des divers types de haie ou de bosquet, nous avons cherché à *rattacher* la protection à l'aval des écrans végétaux à celle derrière les écrans artificiels déjà étudiés.



Étude (CSTB) de la protection à l'arrière de différents types de haies

Ainsi les paramètres utilisés dans notre analyse de la protection derrière les haies ont été :

- les dimensions de « l'obstacle végétal »
- la « perméabilité visuelle » (pourcentage de vide visuel)
- la forme globale.

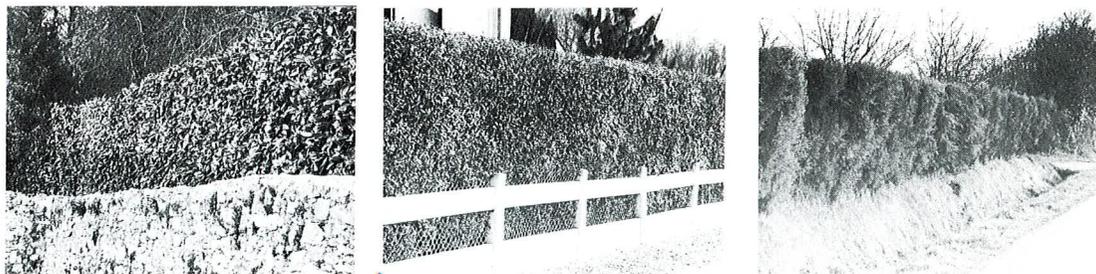
L'évolution de l'écran végétal au cours de sa croissance, ou de la saison, ou encore les contraintes de mise en œuvre et les choix des essences feront l'objet de commentaires pratiques dans le chapitre IV.

Quantification de la protection à l'aval des écrans végétaux V-1,2

Les haies de texture homogène

La perméabilité d'une haie dépend de la nature du végétal, de sa composition et de son épaisseur. Bien que la notion de pourcentage de « vide » visuel reste quelque peu subjective et schématique, elle nous a permis une classification de l'effet de protection contre le vent.

Les haies dont le pourcentage de vide «*visuel*» est pratiquement nul (écran opaque) se comportent comme un écran mince artificiel de même dimension (L, h) et de porosité géométrique $\Phi \approx 0,2$. Les ordres de grandeur des surfaces protégées sont strictement transposables (chap. II).



Exemples de haies « visuellement opaques » (porosité correspondante $\Phi = 0,2$)

C'est le cas typique des conifères (taillés ou non) en bande dense (plantation serrée), tels que thuya et cupressus.

Pour une protection sur une distance plus importante, on peut donner l'exemple du rideau de cyprès associé à des touffes d'arbustes de pied (les rampants par exemple).

Pour un pourcentage de vide visuel de l'ordre de 1/3 (identification des formes derrière l'obstacle végétal), les haies donneront une protection identique à celle d'un écran mince de porosité géométrique $\Phi \approx 0,5$.



Double haie de peupliers pour la protection d'un terrain de sports

On trouve souvent cette texture d'écran avec des haies de troènes, pyracantha ou lauriers. Le bouleau (en été) présente aussi ce type de perméabilité.

Pour des haies dont la perméabilité visuelle est de l'ordre de 50 à 60 %, l'effet de protection aval est réduit dans de très fortes proportions. On peut estimer qu'on se rapproche de l'efficacité d'un écran mince de porosité géométrique $\Phi \approx 0,7$.

C'est, par exemple, le cas de la majorité des haies de feuilles en hiver.

Pour une perméabilité visuelle supérieure, la protection contre le vent n'existe plus.

Les rideaux d'arbres

Le problème aérodynamique du rideau d'arbres est essentiellement l'existence d'une base entièrement dégarnie au niveau des troncs.



Rideau d'arbres à base dégarnie

Dans le cas de masse feuillue dense, la ventilation de pied peut même introduire une accélération du flux qui se développe sur toute la hauteur du tronc et qui peut être conduite sur une distance de 1 à 2 h.

A titre d'exemple, un rideau d'érables (tronc haut) ou de pins introduira une protection nulle.

Si, comme le plus souvent en campagne, le rideau d'arbres émerge de buissons denses ou d'une haie naturelle, l'homogénéité de la texture sera retrouvée et la classification précédemment exposée est reconduite. Ainsi, compte tenu d'une hauteur « moyenne » (perte d'opacité



Haies naturelles (buissons et arbres)

en tête végétation) et une perméabilité visuelle estimée, on pourra calculer (formule empirique — chap. II) la superficie des aires protégées ($S_{1,2}$, S_2 et S_3) derrière un rideau d'arbres de longueur L .

On a pu constater que les perchis ou gaulis de merisiers, châtaigniers et chênes (perméabilité visuelle 1/3 et porosité géométrique correspondante 0,5) ont un effet de protection sur une surface plus importante (dans le sillage lointain notamment) que les rideaux plus opaques tels que les rideaux feuillus de frênes et d'ormes ou les cyprès (perméabilité visuelle nulle et porosité géométrique correspondante 0,2). Ces derniers offrent par contre un niveau de protection supérieur dans leur sillage proche. Ces points sont directement en accord avec les précédents résultats.

Les bandes boisées (épaisseur 20 m environ)

Il semble que la protection apportée par des bandes boisées dont la base, ou le sous-bois, est garnie (buisson de genêts, repousses, etc.) et d'épaisseur d'au moins 15 m constitue un brise-vent quasi idéal :



Bande boisée (30 m)

On retrouve en sillage proche avec des niveaux de protection très poussée ($P = 2$ et 3) tout en conservant une persistance aval de l'effet de protection ($P = 1,2$) très loin (au-delà de 200 m pour une bande boisée d'environ 10 m d'épaisseur). En outre, il semble que des bandes boisées d'épaisseur supérieure à 20 m n'aient pas un comportement très différent.

On pourra estimer la superficie minimale des zones protégées à l'aval d'une bande boisée (constitution naturelle de chênes, hêtres, etc., avec du taillis au sol) ou d'une futaie (hauteur h , et d'une longueur L) en associant, dans le calcul pour le niveau de protection $P = 2$, une perméabilité correspondant à $\Phi = 0,25$ et, pour $P = 1,2$, une perméabilité de $\Phi = 0,5$.

Enfin, un espace dénudé de rayon 100 m entouré d'une couronne boisée ($h \approx 10$ m sur une épaisseur de 20 m) aura un niveau de protection supérieur à 2 en tous points.



*Pin déformé
par le vent*

Les morphologies d'arbres semblables à celles du pin sont à exclure du propos « bande boisée ».

Composition de l'écran végétal : le point de vue aérodynamique **V-2**

Une grande variété de végétaux, arbustes et arbres peut être utilisée pour réaliser les écrans végétaux et le facteur climatique ou les contraintes de mise en œuvre seront les paramètres prépondérants dans la mesure où les principes aérodynamiques suivants seront respectés :

- Les rideaux végétaux devront être de texture *homogène*. Ainsi, en fonction des essences utilisées, une *association* de la végétation sera nécessaire, notamment pour garnir le pied des arbustes ou arbres.
- Les perméabilités optimales correspondent à un pourcentage de vide visuel nul (protection immédiate poussée, utilisée largement au voisinage des habitations) ou faible (protection à plus grande échelle, utilisée en zone rurale). Par conséquent, la constitution des rideaux végétaux devra être *dense*. Cette densité est fonction des essences employées mais aussi de l'épaisseur sur laquelle elle est implantée et de leur disposition relative (quinconce, rangées parallèles). Le paysagiste ou l'ingénieur horticole trouveront dans leur contexte d'application les meilleurs choix.
- L'efficacité optimale est obtenue, comme dans le cas des écrans artificiels, pour une incidence orthogonale. Lors de l'implantation il faudra aménager un « bouclier » *au vent* pour permettre la croissance de l'écran végétal. Ce bouclier peut être constitué, par exemple, de mouvements de terre, de rocaillies ou des plantes rampantes robustes.

- L'associativité des écrans végétaux fonctionne de manière similaire à celle des écrans artificiels déjà présentés (chap. III) :
 - Une organisation en mailles végétales (hauteur environ 3 m) de 10 m de rayon constituera un microclimat particulièrement protégé (protection $P = 3$ pour toutes incidences).

Ces dispositions en association avec des mouvements de terrain sont largement utilisées dans les aménagements des espaces extérieurs.



Maille microclimatique

- L'association de deux haies de perméabilité visuelle 1/3 et espacées d'une fois leur hauteur environ conduit à un effet de protection supérieure à ce que l'on pourrait obtenir avec une haie (de même hauteur) opaque à l'œil.



Photo Y

Association de rideaux d'arbres au Japon



Association de deux haies d'essences différentes (niveau de protection poussé)

Contraintes de mise en œuvre V-3

La particularité fondamentale du végétal dans son utilisation de contrôle des ambiances microclimatiques est sa *nature vivante*.

Il convient alors de s'entourer d'un certain nombre de précautions quant à sa mise en œuvre en tant que « brise-vent ».

En effet, pour garantir une protection efficace contre le vent, il faudra s'assurer des propres conditions de croissance de l'écran végétal. Ainsi, la richesse du sol ou son apport en eau deviendront des éléments déterminant de la réussite de ce type de traitement, de même la maintenance et l'entretien de l'écran végétal devront être pris en compte.

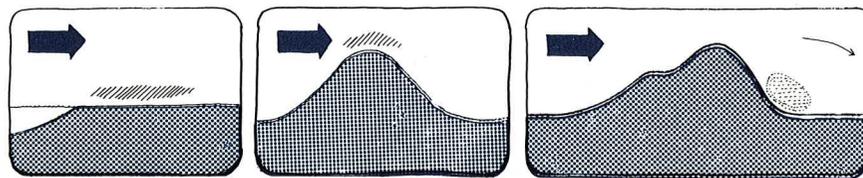
L'exploitation de la végétation comme brise-vent nécessite l'analyse d'un certain nombre de facteurs :

L'organisation aérodynamique des écrans végétaux et la surface d'implantation

Ce point a été largement exposé dans le paragraphe précédent et nous le citons uniquement pour mémoire. Le paysagiste, imprégné des concepts aérodynamiques, saura organiser ses écrans végétaux, en haies, mailles, bosquets ou plots en fonction des essences utilisées (structure des feuilles, persistance saisonnière, etc.) et des performances aérodynamiques recherchées.

Le degré d'exposition au vent

Suivant les caractéristiques climatiques de la région ou de la topographie du site, le degré d'exposition au vent est variable : la forte exposition en bord de mer ou en crête de relief rend le développement de la végétation difficile, alors qu'en secteur déventé sous le pied d'une colline l'ambiance sera beaucoup plus favorable.



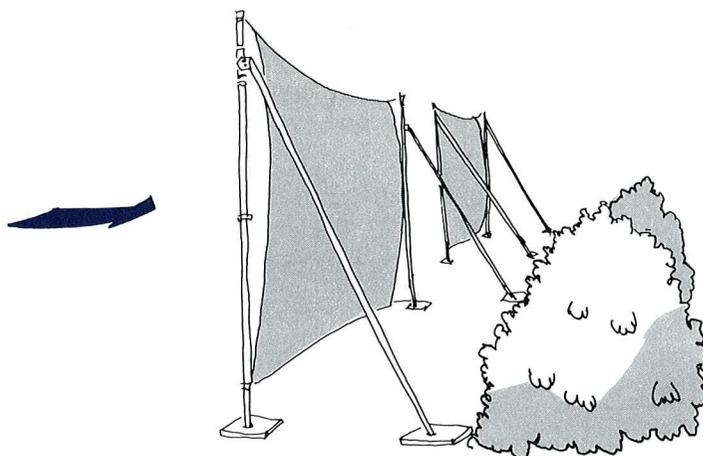
Implantation difficile de la végétation (bord de mer, crête, etc.)

Implantation favorable de la végétation (sous le vent d'un relief)

En zone exposée, il faudra retenir des essences *résistantes* et une utilisation appropriée du végétal qui se développe *naturellement* sur le site contribuera à résoudre le problème.

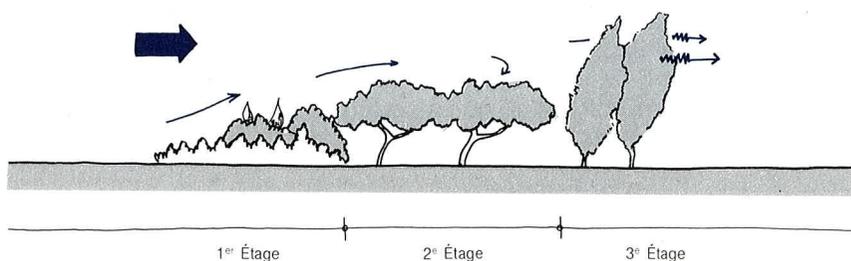
En bord de mer, l'agression des embruns et des aérosols vient compliquer la mise en œuvre de l'écran végétal. Dans certains cas, il sera nécessaire de prévoir un lessivage par aspersion des feuilles pour supprimer une partie de la corrosion du sel.

Des filets ou des cannisses peuvent être utilisés temporairement pour assurer une bonne croissance jusqu'à l'âge adulte.



Emploi de filets tendus comme écrans brise-vent temporaires

En zone offerte au vent, la morphologie de la végétation peut venir compléter le choix des essences et contribuer aux chances de développement du rideau végétal :



Un premier étage relativement bas, constitué de végétaux rampants, buissonneux ou arbustifs, assure une protection de « bouclier » au niveau du sol (cotoneaster, pittosporum, laurier, etc.).

Un deuxième étage de hauteur moyenne, servant de couverture ou de préau relais, « porte » l'effet de protection. Il empêche les retombées de flux ; la base peut être dégarnie puisque protégée par le premier bouclier. Une végétation en boule ou étalée peut être adoptée (pin parasol, chêne liège, etc.).

Une troisième ligne plus élevée sert de tamisage et développe (en fonction de la hauteur notamment) l'effet de protection. Les végétaux de port érigé (peuplier) ou conique sont recommandés.

La composition du sol (naturel ou rapporté) et son alimentation en eau

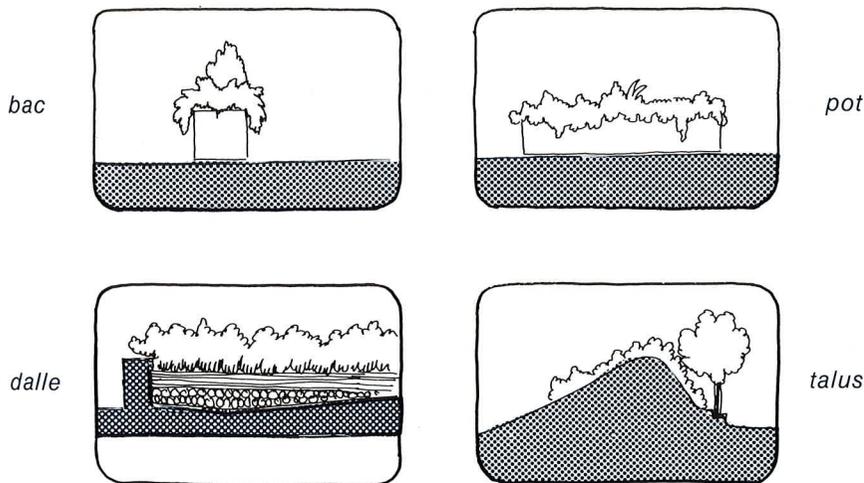
La composition chimique intervient directement sur la croissance et le développement des essences végétales : par exemple, pour un sol calcaire, le cyprès de Provence et l'arbre de Judée sont parfaitement bien adaptés ; par contre, le cyprès chauve et l'orme champêtre ne pourront que périr.

Par conséquent, lors de la mise en œuvre de la végétation, il est bon de s'entourer de l'avis d'un pépiniériste.

Il va de soi que ces végétaux devront disposer d'une alimentation en eau suffisante. Nous insistons sur le problème de la disponibilité en eau pour les sols rapportés. A titre d'exemple, un bac de 20 m³ de terre (hauteur 1 m, longueur 10 m et largeur 2 m) demande environ 10 m³ d'eau par an si l'on veut espérer qu'une plantation de troène, de thuya ou de cyprès puisse se développer.

Sous ces réserves, les plantations pourront être réalisées avec succès en pot, en bac, sur dalle et talus rapporté.

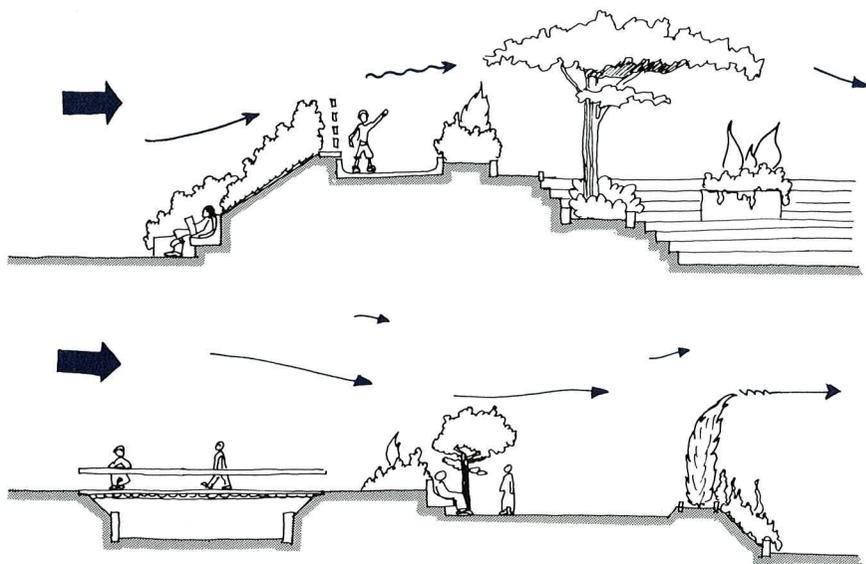
Utilisation du végétal sur sol rapporté :



Dans tous les cas (sol naturel ou rapporté), le volume de terre végétale doit être en rapport avec le volume planté. Ainsi, pour des plantations sur dalles, quelques dizaines de centimètres suffisent pour une végétation basse. Par contre, pour des plantations de hauteur moyenne (quelques mètres), il faut prévoir un minimum de 0,8 m d'épaisseur de terre.

Ce type d'aménagement pose le problème des surchages occasionnées surtout par temps de pluie où le poids de l'eau vient s'ajouter à celui de la terre. De plus, il est nécessaire de prévoir un drainage efficace pour pallier les désordres liés aux infiltrations.

Nous venons de voir qu'il est indispensable de prendre certaines précautions si l'on souhaite utiliser avec succès la végétation comme dispositif brise-vent. Dans la pratique, le végétal prend tout son charme et permet une composition variée de l'espace et du paysage. Il voit son effet de protection contre le vent accru lorsqu'il est associé à d'autres interventions aérodynamiques (mouvement de terre, rocailles, écrans artificiels, etc.).



Exemple d'association de la végétation et des mouvements de terre

En outre, la richesse de ses autres qualités bioclimatiques : création d'ombre (été) et dosage de la lumière, limitation de l'échauffement des revêtements, humidification et assainissement de l'air, fixation des sols et frein à l'érosion, intimité visuelle, etc., en font un élément de traitement privilégié pour les espaces extérieurs.

autour des brise-vent

VI

contraintes et mise en
œuvre des écrans artificiels **1** 118

le choix des matériaux **2** 121

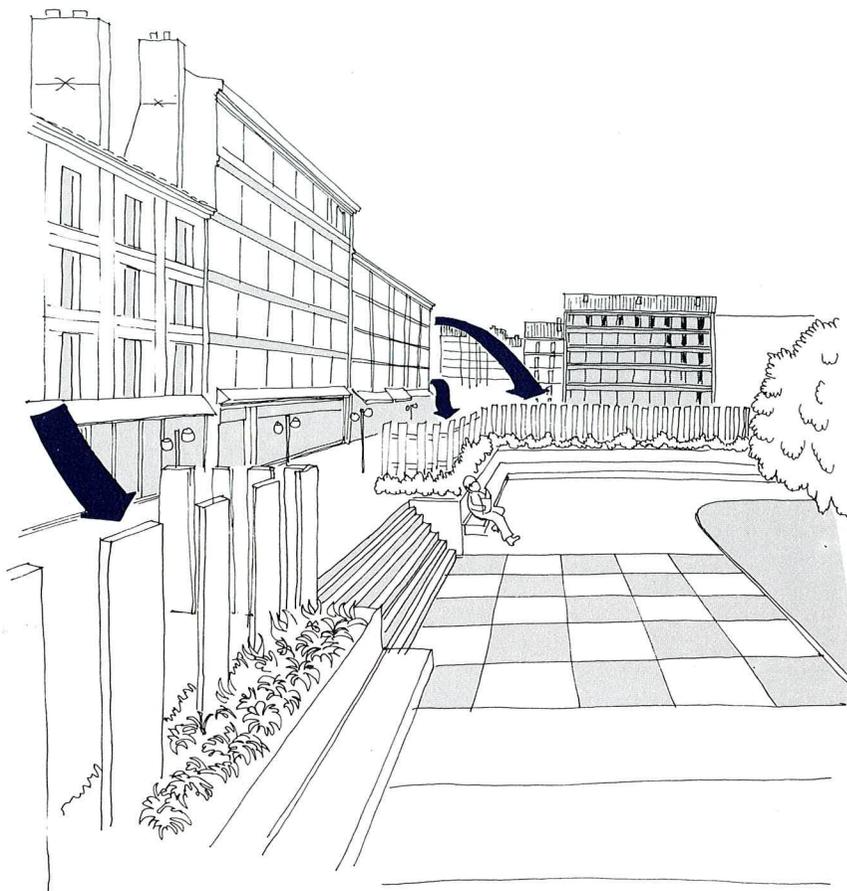
les coûts **3** 125



VI-1 Contraintes et mise en œuvre des écrans artificiels

VI-1,1 Le calcul de la structure brise-vent

Outre son rôle de protection pour lequel il est conçu, la structure brise-vent devra résister au vent et la stabilité devra être assurée. Il existe des méthodes de calcul qui permettent de dimensionner les ouvrages en fonction de leurs caractéristiques propres mais aussi du site et de leur exposition au vent. L'estimation de la charge due au vent sur des structures perméables (dans la gamme de porosité géométrique 0 à 0,5) se fera en partant du coefficient global de traînée correspondant à une structure opaque, que l'on appliquera uniquement *aux surfaces pleines* du brise-vent. Pour les réalisations importantes il est conseillé de faire appel à un bureau d'étude.

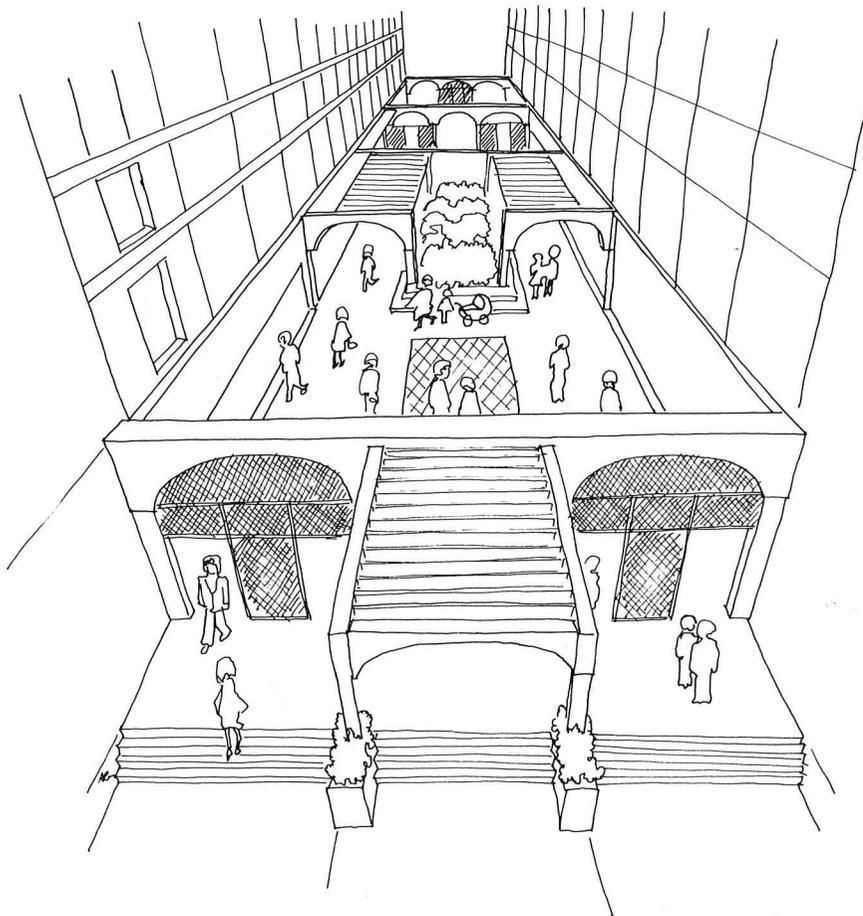


Exemples d'intégration de dispositifs brise-vent dans l'environnement

L'intégration dans l'environnement VI-1,2

Tout comme le végétal, l'écran artificiel fait partie de notre environnement. Par conséquent, une interprétation esthétique et visuelle devra être trouvée. L'intégration dans le paysage et le traitement plastique dépendront pour partie de la concertation entre paysagiste, architecte et aérodynamicien.

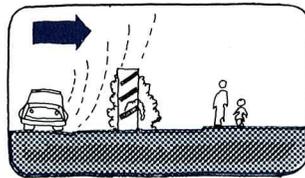
Le brise-vent, par sa présence, modifie le cadre de son implantation. Une manière de réussir son intégration est de lui faire jouer un ou plusieurs rôles complémentaires.



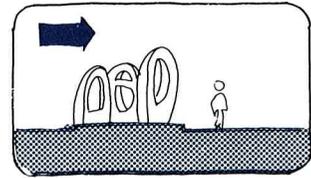
Une recherche sur les possibilités de multifonctions permettra d'optimiser son intégration et même, dans certains cas, de réduire son coût. On peut citer quelques exemples de double fonctions :

Brise-vent

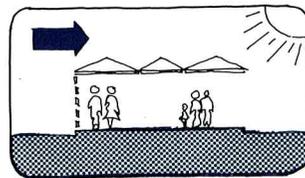
et écran acoustique



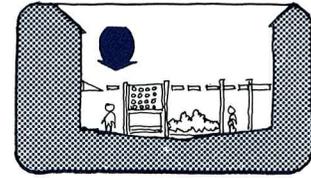
et sculpture plastique



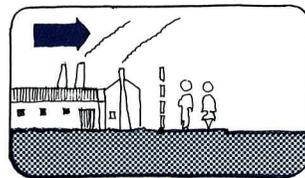
et écran lumineux



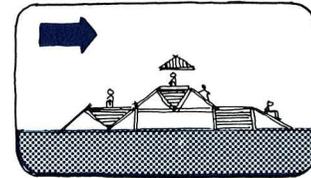
et mobilier urbain



et écran visuel



et structure de jeux



Lors de la réalisation des structures brise-vent, on évitera de créer des nuisances : à titre d'exemple, sur le plan acoustique, l'emploi de matériaux tels que la brique, le béton ou tels que le bois ne sont pas générateurs de bruit aérodynamique. Par contre, les structures légères réalisées en métal pourront introduire des sifflements (éléments de petite dimension formant liaison entre panneaux, ou vibration parasite de tôles ou lames manquant de rigidité).

On ne recherchera pas non plus une performance trop poussée de l'effet de protection dans la mesure où, les jours sans vent, des problèmes de renouvellement d'air et de pollution peuvent se poser. Il faudra conserver, par exemple, dans l'aménagement climatique d'un espace, « des ouïes d'aération » appropriées, bien positionnées, qui autoriseront une légère circulation d'air ; là encore, l'appui des techniciens ne peut être que bénéfique.

Le choix des matériaux VI-2

Suivant la nature « grands ouvrages » ou « aménagements localisés », la réalisation et le choix des matériaux vont différer.

Pour les grands ouvrages largement sollicités par les charges dues au vent (dimensions importantes : $h > 5$ m et $L > 30$ m), les technologies utilisées sont celles du génie civil où le béton et l'acier jouent un rôle majeur. La terre cuite ou le bois lamellé collé (grandes portées) pourront aussi contribuer à la réalisation.

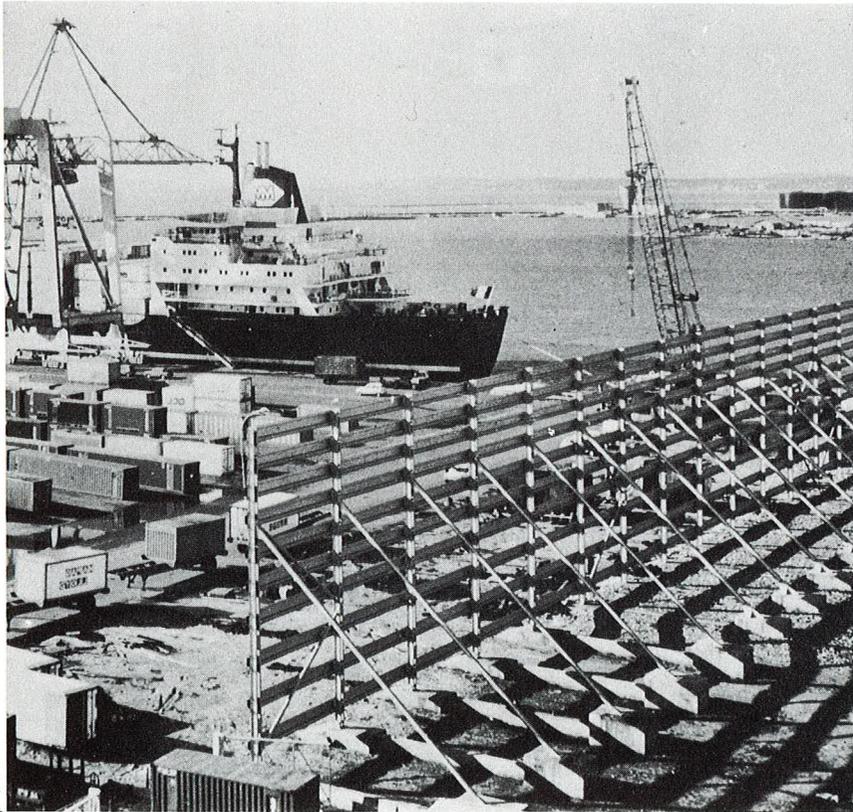
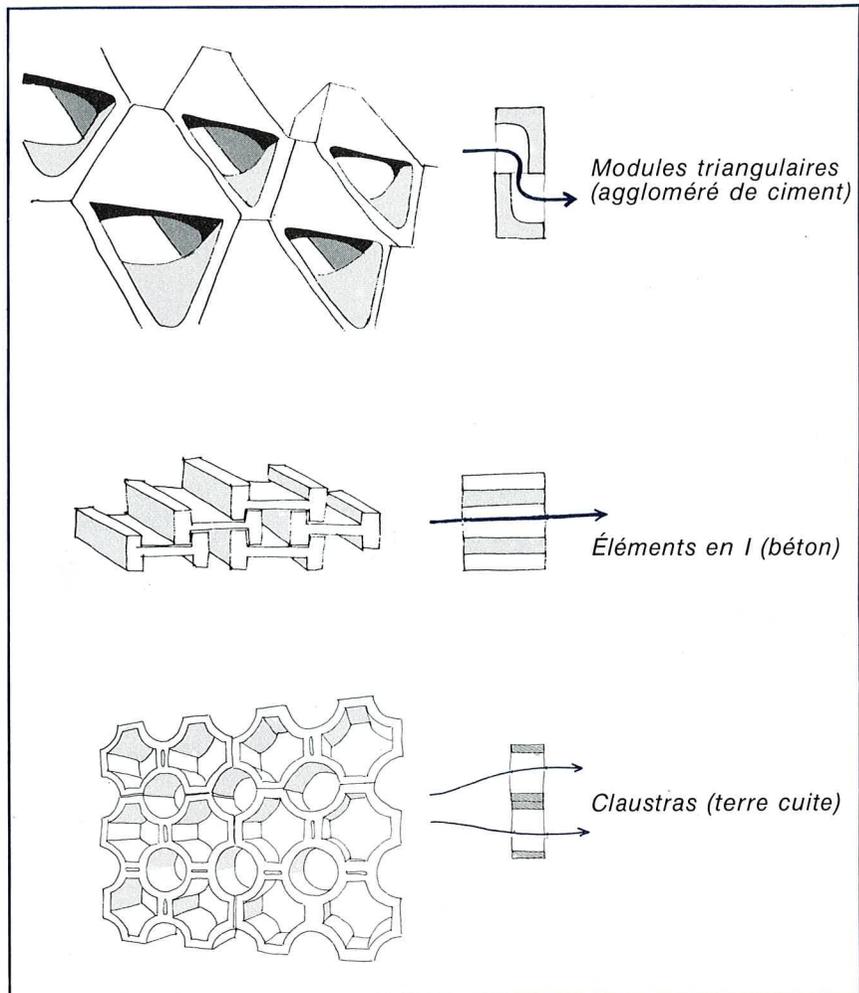


photo X

Brise-vent du quai des containers à Fos

Les aménagements locaux concernent les brise-vent d'échelle moindre ($h > 5$ m) et les structures propres des écrans pouvant être plus légères, une grande variété de matériaux et d'agencements technologiques s'offrent à l'architecte :

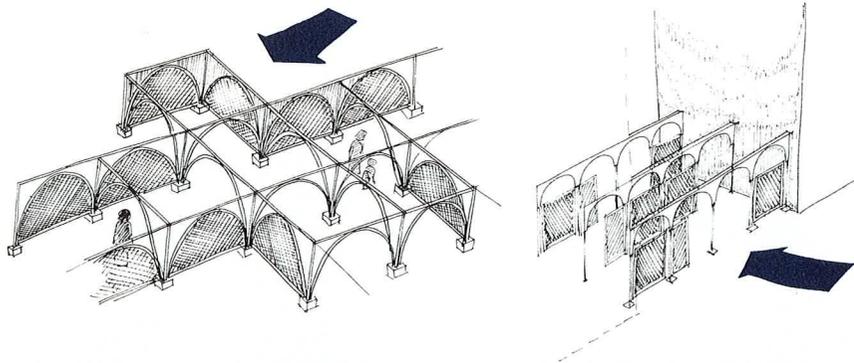
- Les éléments peuvent être préfabriqués et dans cette catégorie on peut citer :
 - les agglomérés de ciment en module triangulaire, carré, etc.
 - les modules béton en forme de H, U, I
 - les briques de terre cuite ou claustras



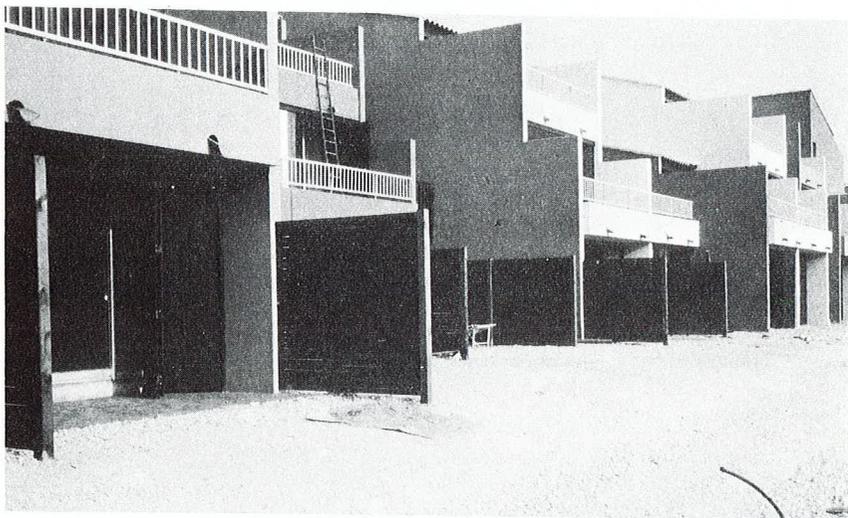
Exemples de matériaux préfabriqués entrant dans la composition des brise-vent

Ces éléments présentent l'avantage d'être répétitifs (préfabrication) et de mise en œuvre simple.

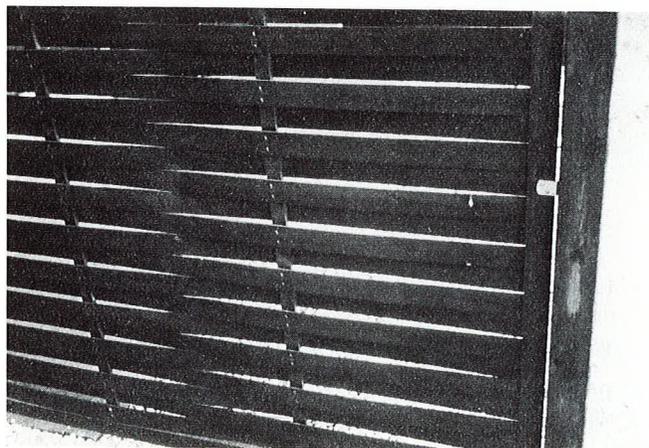
- Les éléments en bois peuvent être employés en rondins, en lames (horizontales ou verticales), en caillebotis ou à la manière des moucharabihs en remplissage.



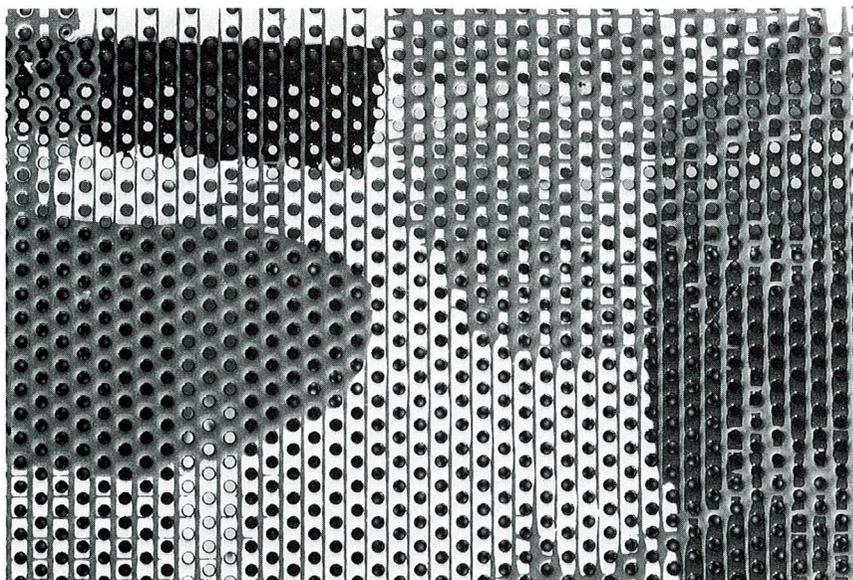
Exemple de remplissage à partir de caillebotis en bois (ou d'éléments perméables en plastique)



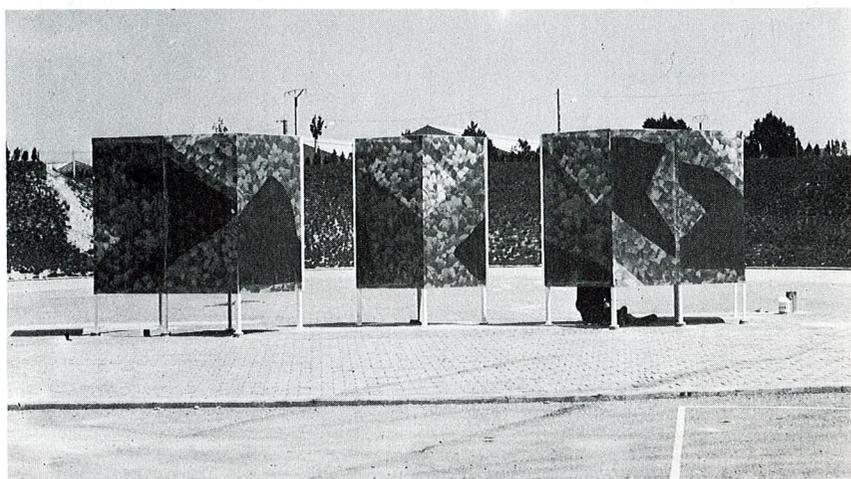
Joues brise-vent (traitement bois)



- Les éléments en acier peuvent être directement utilisés sous leur forme d'association de lames profilées, de tôle déployée ou perforée (emboutissage).



*Écran réalisé
en tôle perforée*



- Le verre, la toile, les plastiques (notamment en filets ou en éléments perforés) viennent compléter la palette des matériaux disponibles et seront essentiellement employés en remplissage.

Le problème de la détérioration dans le temps des matériaux (vieillessement, fragilité, dommages causés par l'utilisateur, etc.) devra intervenir directement dans le choix.

Les coûts VI-3

Il est difficile d'évaluer, en terme économique notamment, la qualité de l'espace qui va dépendre, par exemple, du taux de fréquentation des zones commerciales, des secteurs de loisir ou de repos. D'un autre côté, la diversité des formules de réalisation des brise-vent ne nous permet pas de quantifier précisément le coût de tels dispositifs.

Dans l'approche des coûts, on peut raisonner en terme de coût relatif d'une part et de coût global d'autre part :

- Le coût relatif met en balance le coût propre de *l'étude* brise-vent au regard du coût général de l'organisation de l'espace. Ce coût sera d'autant moindre que l'on saura intégrer dans les processus de l'aménagement la fonction brise-vent (quelques millièmes du coût général des travaux).
- Le coût global (ou direct) fait référence à trois aspects de la mise en œuvre des brise-vent :
 - le coût « matériau »
 - le coût « mise en œuvre »
 - le coût « entretien »

Le premier aspect peut se définir de la façon suivante :

- La disponibilité du matériau et son degré de vulgarisation. Suivant les régions certains matériaux seront par exemple préférables à d'autres (bien que de nos jours les transports facilitent leur diffusion).
- La qualité du matériau (élément déterminant pour l'évaluation). Le facteur poids peut augmenter le coût mais simplifier la conception (stabilité de masse).
- La répétition d'un « composant ». Ce facteur sera toujours un élément réducteur du coût (industrialisation, préfabrication) et ce d'autant plus que le produit existe déjà sur le marché et est *utilisé à d'autres fonctions*.

Le coût de mise en œuvre va dépendre des dimensions des composants et notamment de la nécessité d'utiliser des appareils de levages pour leur utilisation. Par contre, les éléments modulés de petites dimensions seront préférables pour leur facilité de mise en place.

Enfin le coût d'entretien ne devra pas être sous-estimé, d'autant que les opérations de maintenance ou de réfection font appel à des crédits de fonctionnement dont la gestion appartient au futur.

A titre d'exemple pratique, nous proposons quelques réalisations d'un écran brise-vent à grand linéaire, de perméabilité géométrique 0,5 et d'une hauteur de 4 mètres, afin de pouvoir comparer sur un cas précis la diversité des coûts :

Solution 1

A partir d'un grillage galvanisé tendu entre des poteaux (l'association de la semelle et du poteau correspond à 1 m³ de béton et 50 kg d'acier) on vient accrocher un tissu plastique ($\Phi \approx 0,5$). Ce dispositif simple de mise en œuvre présente l'inconvénient de se dégrader dans le temps (corrosion, ligatures du tissu fragiles, vieillissement du plastique, etc.). Le coût estimatif pour un mètre linéaire d'écran (poteaux bruts de coffrage espacés de 4 m compris) s'élève à 1100 F HT (valeur mai 1981).

Solution 2

A partir de profils creux du commerce (acier) ou de poutrelles (profilées à froid) ou encore de canalisateurs rigides, on peut réaliser horizontalement la perméabilité cherchée.

Une étude approfondie montre que la difficulté d'adaptation de ces constituants à la réalisation de l'écran perméable augmente considérablement le coût et qu'il est alors préférable d'employer comme matériau le béton armé : six poutres préfabriquées horizontales (poids d'une poutre < 900 kg ; soit 0,4 m³ de béton et 30 kg d'acier) peuvent assurer des portées de 6 m et venir s'encastrent dans des poteaux (calage dans une rainure et clavetage en tête) à section variable pour une meilleure stabilité transversale (poteau et semelle = 2 m³ de béton et 65 kg d'acier).

Bien que le montage demande une bonne précision dans l'implantation des poteaux et qu'il faille avoir recours à un engin de levage sur pneumatique, la mise en œuvre reste facile. Ce type de barrière aura une grande longévité et un entretien nul.

Le montant des travaux, pour un mètre linéaire d'écran, brut de décoffrage, y compris les poteaux, s'élève à environ 2000 F HT (valeur mai 1981).

Solution 3

Le dispositif brise-vent peut être réalisé à partir de modules en béton armé, architecturés et disposés par exemple en une double rangée (espacement 5 m environ) d'éléments triangulaires pointe en haut (h = 4 m). La stabilité transversale est assurée par des poteaux (triangle isocèle et rainure d'encastrement ; poteau et semelle = 1,1 m³ de béton et 50 kg d'acier distant de 4 m environ).

Le poids des modules (2500 kg soit 1,2 m³ de béton et 90 kg d'acier) peut poser un problème de transport mais la mise en œuvre (main-d'œuvre spécialisée) des éléments préfabriqués reste simple. La grande longévité et l'entretien nul sont, comme dans le cas précédent, le résultat de l'utilisation du béton.

Le coût estimatif, par mètre linéaire d'écran double, s'élève à 3600 F HT (valeur mai 1981).

Ce dernier exemple intègre un traitement architectural et est présenté *uniquement* à titre indicatif compte tenu de l'infinité des créations esthétiques possibles.

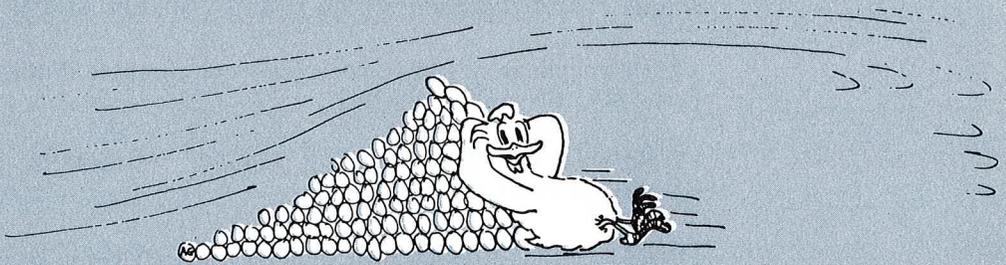
Conclusion VII

Nous avons tenté, dans cet ouvrage, de fournir aux architectes et aux paysagistes un outil d'intervention leur permettant de maîtriser l'écoulement vent dans les espaces extérieurs et autour des constructions et, plus généralement, de pouvoir disposer de moyens pour la protection contre le vent.

L'efficacité des principes aérodynamiques et des dispositifs correspondants est quantifié en fonction de leur contexte d'application et l'on peut considérer que bon nombre de conseils pratiques sont directement opérationnels. Néanmoins, nous conseillons aux concepteurs de consulter, dans leurs démarches, les aérodynamiciens de l'environnement, notamment lors du contrôle microclimatique en milieu urbanisé pour lequel une étude spécifique en soufflerie s'avérera le plus souvent indispensable.

Outre l'action aérodynamique des brise-vent et l'intérêt qu'elle présente dans l'optimisation des ambiances climatiques, l'objet peut présenter d'autres fonctions telles qu'écran acoustique, piège à sable, limite d'espace, etc. et sera avant tout intégré dans un environnement.

Par conséquent, loin d'alourdir le cahier des contraintes que rencontrent les concepteurs, les brise-vent peuvent devenir (comme nous l'avons constaté dans un certain nombre d'opérations) le support d'une nouvelle expression architecturale, et même un élément stimulateur de l'urbanisme bioclimatique. Un souhait profond de ce travail est de contribuer à libérer l'architecte de l'environnement dans cette voie.



bibliographie

- BALTAXE R. « Air flow patterns in the lee of model windbreaks », Report : Forestry and forest products division, Rome, - Italie.
- BELET Y.
CAPUT C.
GUYOT G.
et SAMIE C. « Effet local d'un brise-vent mince sur la dispersion des polluants émis au niveau du sol », *Annales agronomiques*, 1972, 23 (2), pp. 123-143.
- CIONCO R. M. « A wind profile index for canopy flow », *Boundary Layer Meteorology* 3 (1972), pp. 255-263.
- CNRS 1966-1967 « Étude biogéographique du vent » (3 fascicules), Languedoc-Roussillon.
- COLIN P. E.
and OLIVARI D. « Wind effects on buildings and structures : wind environment at ground level », Von Karman Institute, Belgium, February 1972.
- DABAT R. et
VALENSI J. « Étude plan d'Aou ».
- DAUZVARDIS P.A.D.
and FEJER A.A. « Effect of wind breaks on flows on plazas and around buildings », Mechanics and mechanical and aerospace engineering dept, Illinois Institute of Technology, Chicago
- DAVENPORT A.G.
and ISYUMOV N. « The ground level wind environment in built up areas », International conference on wind effects on buildings and structures, London Heathrow, Sept. 1975.
- GANDEMER J. « Étude du microclimat de la ville de Vaudreuil - Confrontation des résultats en soufflerie et sur le terrain », EN-ADYM 76-6 C.
- « Étude du contrôle local du vent - Aérodynamique des brise-vent », EN-ADYM 76-9 L.
- « Aérodynamique des brise-vent dans leur contexte d'utilisation - Part. I : efficacité sur le confort du piéton », EN-ADYM 77-6 L.
- « Aerodynamic studies of built up areas made by CSTB Nantes », *J. Industrial Aerodynamics*, 1978 n° 3.227.240, EN-ADYM 77-56 L.
- « Aérodynamique des brise-vent dans leur contexte d'utilisation - Partie II », EN-ADYM 78-10 L.
- « Wind shelters » 3RD Coll. Ind. Aerodyn. 15-16/06/78, Aachen, EN-ADYM 78-51 L.
- « Disconfort due to wind near buildings, aerodynamic concepts », Building res. Translation. Nbs Tech Note 710-9, EN-ADYM 78-53 L.

- GANDEMER J. « Intégration et contrôle du vent dans les ensembles bâtis - Journée sur les contraintes climatiques et phoniques des plans masses », Geria Nord 17/11/78, EN-ADYM 78-55 L.
- « Analyse du phénomène vent en milieu bâti », Séminaire Interchercheurs du plan construction - Collioure, 16-18 mai 1979, EN-ADYM 79-9 L.
- « Les effets aérodynamiques du vent dans les ensembles bâtis », *Techniques et Architectures*, n° 325, juin-juillet 79, pp. 70-75, EN-ADYM 79-52 L.
- *REEF*, Tome 2, « Aérodynamique-champ de vitesse dans les ensembles bâtis », EN-ADYM 79-56 L.
- « Wind shelters », *J. Ind. Aerodyn.*, Vol. 4 (1979), pp. 371-389, EN-ADYM 79-58 L.
- « The aerodynamic characteristics of windbreaks, resulting in empirical design rules », CSTB Nantes, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 7 (1981) 15-36.
- GANDEMER J. et BARNAUD G. « Simulation des propriétés dynamiques du vent en stabilité neutre dans la soufflerie à couche limite du CSTB », Document n° 9-74, EN-ADYM 74-4 L.
- GANDEMER J. et GUYOT A. « Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti », Publication du Groupe Central des Villes Nouvelles, Secrétariat Général, EN-ADYM 77-57 L. Documentation française.
- GANDEMER J. et RAPIN J.-M. « Écrans multifonctionnels dans leur contexte urbain - Comptabilité des fonctions antibruit et brise-vent », EN-ADYM 78 8 L.
- GUYOT A. (Groupe ABC) « Opération Plage du Prado - Étude des vents », *Revue Prado*, n° 10, 1975.
- « La ventilation naturelle », Formation Architecture Solaire, ESIM, 1978.
- « Aménagement des espaces extérieurs et confort climatique » (*à paraître*).
- GUYOT A. et MALAISE Y. (Groupe ABC) « Contrôle du vent dans les espaces extérieurs », U.P.A., Marseille, 1974.
- GUYOT A. DABAT R. PERRIN R. (Groupe ABC) et GANDEMER J. (CSTB) « Conception et Aménagement en fonction du vent, la Plage du Prado », Secrétariat à l'expansion de la ville de Marseille, 1975.

- GUYOT G. « Étude de l'écoulement de l'air au voisinage d'un obstacle poreux en couche limite turbulente », INRA - Montfavet. Thèse de docteur ingénieur, Université, Paris VI, 1972.
- « Les effets aérodynamiques des brise-vent », Promoclima - Études thermiques et aérauliques - tome 8 E, n° 3, juin 1977.
- HAGEN L. J.
SKIDMORE E. L. « Windbreak drag as influenced by porosity », ASAE Transaction 1971.
- HORN J. D.
CAMPBELL G. S.
WALLIS A. L. « Wind tunnel simulation and prototype studies of barrier flow phenomena », Technical report ecol 5416, December 71.
- HUNT J. C. R. « The effect of single buildings and structures », Phil. Trans. Roy. Soc. Lond., Vol 269, May 71.
- « Wind tunnel experiments on the effects of wind on people », Cambridge - CB 3 9 EW Build. Res. Sept. 74.
- HUNT J. C. R.
POULTON E. C.
MUMFORD J.C. « The effects of wind on people; new criteria based on wind tunnel experiments », *Building and Environment*, vol. 11 - Pergamon Press, 76.
- HUNT JCR
POULTON E. C. « Some effects of wind on people », Symposium of External flows, 4-6 July 1972.
- IZARD J. L.
et GUYOT A.
(Groupe ABC) *Archi bio*, Éditions Parenthèses, 1979.
- JOHNSTON A. K. « The action of wind on mounds », 5^e conference on hydraulics and fluid mechanics, 9 Dec. 74, pp. 220-223.
- JONES P. M.
WILSON C.B. « Wind flow in an Urban Area : a comparaison of full scale and model flow », *Building Science*, Vol 3, 1968.
- KAISER H. « Die Stromung an Windschurstreigen », *Berichte deutscher Wetterdienst* - 7 (53).
- « Beitrage zum Problem der Luftbewegung in Windschutzsystemen », *Meteor Rundschau* (12).
- KONSTANTINOVA R. « Evaporation in nature », Israël Program for scientific translation, 1966.
- KOO J. K. and
JAMES D. F. « Fluid flow around and through a screen », *J. Fluid Mech* (1973), vol 60, part 3, pp 513-538.
- LAWSON T. V. « The wind environment of buildings : a logical approach to the establishment of criteria », University of Bristol, Aeronautical Department, Eng. TVL/7301, 1973.

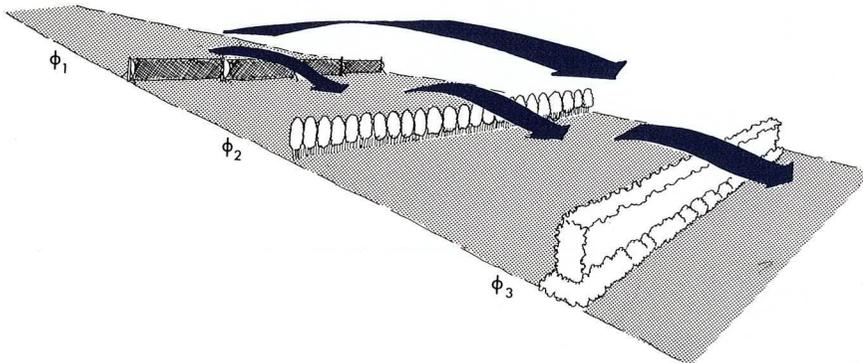
- MAILLE H.
et MARY J. « Conception et réalisation d'un ensemble de commande et d'alimentation de flash de forte énergie pour un système de visualisation pour chronophotographie », EN-ADYM 76-2 R.
- MULHEARN P. J.
GRADLEY E. F. « Secondary flows in the lee of porous shelter belts » *Boundary layer Meteorology*, 12, 1977
- MURUGO G. « Simulation hydraulique de l'écoulement de l'air au voisinage d'un obstacle perméable en vue de l'intégration des brise-vent dans la construction civile et le bâtiment », Mémoire de fin d'études, mai 1975, Conservatoire des Arts et Métiers, 1975.
- O'HARE M.
KRONAUER R. E. « Fence designs to keep wind from being a nuisance », *Architectural Record*, July 1969.
- PERRIER E.R.
ROBERTSON J.M.
MILLINGTON R.J.
PETERS D. B. « Spatial and temporal variation of wind above and within a soybean canopy », *Agricultural Meteorology*, 1971.
- PLATE E. J. « The aerodynamics of shelter belts », *Agr. Meteorol.* 8 (1971).
- « The aerodynamics of shelter belts », *Agricultural Meteorology* - Elsevier Publishing Company (Printed in the Netherlands), 8, (1971), pp 203-222.
- RAINE J. K. « Wind protection by model fences in a simulated atmospheric boundary layer », Conference Proceeding Vol 1, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 1974 December 9-13.
- RAINE J. K.
STEVENSON D.C. « Wind protection by model fences in a simulated atmospheric boundary layer », *Journal of Industrial Aerodynamics*, Vol 2, n° 2.
- ROUX J.-L.
et PERRIN R.
(Groupe ABC) « Soleil-vent, qualité de l'habitat en Provence », MIAFEB, OREAM, 1974.
- SADEH W. Z.
CERMAK J. E.
KAWATANI T. « Flow field within and above a forest canopy », ECOM - Fort Monmouth, report 0423.3.
- SEGINER I. « Atmospheric stability effect on windbreak shelter and drag », *Boundary layer Meteo* 8 (pp 383-400).
- « Drag on a windbreak in two dimensional flow » *Agric. Meteorol.* 9 (71/72).
- « Windbreak drag calculated from the horizontal velocity field » *Boundary layer meteorology* 3 (72), pp 87 97.

- SEGINER I. «Flow around a wind-break in oblique wind», *Boundary layer Meteorology* 9, 1975, pp 133-141.
- TANI N. «On the wind tunnel test of the model shelter hedge», *Bull. National Institut — Agric. Sciences - Série A - 1958 - n° 6*
- TRINITE M. et
GANDEMER J. «Une méthode d'approche approfondie pour la prise en compte des effets du vent en milieu bâti - L'étude sur maquette en soufflerie à couche limite», *Urbanisme et Environnement*, n° 3, juin 1979, pp. 11-20, EN-ADYM 79-51 L.
- VALENSI J. et
REBONT J. «Aérodynamique des parois perforées - Application au projet d'écrans de protection contre le vent - Étude du fonctionnement de ces écrans», AGARD Conference Proceeding n° 48, sept. 69.
- VALENSI J. «Contrainte du milieu naturel sur Fos», 1971.
- «Use of perforated screens for protection of selected areas», Von Karman Institute, Belgique, Wind effects on buildings and structure, February 1972.
- WOODRUFF N.P.
and ZINGG A.W. «Wind tunnel studies of shelter belt models» Agricultural engineer and project supervisor, *Journal of Forestry*, March 53.
- WOODRUFF N.P.
FRYREAR D.W.
and LYLES L. «Engineering similitude and momentum transfert principles applied to shelter belt studies», Transactions of the ASAE, 1968, n° 6.

Dans ces conditions, en nous référant à la somme des aires que l'on aurait avec les deux mêmes écrans mais totalement séparés, l'associativité réduit de 20 % la superficie de la zone moyennement protégée ($S_{1,2}$) mais, par contre, accroît celle des zones à forte protection qui, dans le cas de S_3 , est augmentée de 20 %.

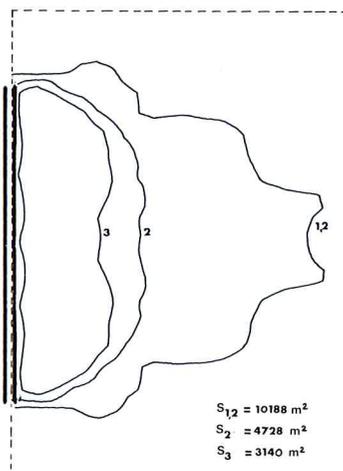
En conséquence, le principe fonctionne si l'on cherche une protection importante (gain de 20 %). En outre, il permet un contrôle aisé de la géométrie des aires à confort poussé. Le principe peut être étendu à une série d'écrans plans parallèles de perméabilité de l'ordre de 0,2 et d'espacement d'environ 8 h. On peut préciser que, dans le cas de plusieurs écrans de perméabilité légèrement différente comprise entre 0,15 et 0,35, il faut placer les écrans de telle sorte que tout brise-vent «aval» ait une perméabilité inférieure ou égale à celui qui le précède à l'amont.

La réduction de $S_{1,2}$ s'explique par le fait que le deuxième écran se situe dans un écoulement fortement turbulent (sillage du premier) qui altère sa fonction (voir paragraphe II-5).



Association de brise-vent tel que $\Phi_1 \geq \Phi_2 \geq \Phi_3$ pour une meilleure protection ($0,15 \leq \Phi \leq 35$)

Pour des perméabilités de l'ordre de 0,5, l'espacement ne doit pas dépasser une fois la hauteur si l'on veut obtenir un effet associatif. Dans ces conditions, le dispositif réalisé avec deux écrans ($L = 120$ m et $\Phi = 0,5$) est nettement plus performant qu'un seul écran de perméabilité moitié ($\Phi = 0,2$) tant au niveau du sillage proche que du sillage lointain. Ce dispositif est donc particulièrement recommandé et peut correspondre, sous l'angle de l'application, à un double rideau de végétation.



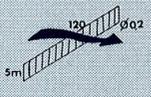
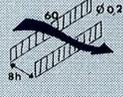
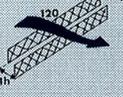
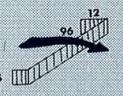
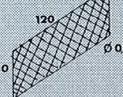
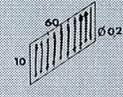
◁ Espacement optimal de 1 h pour deux brise-vent perméables de porosités géométriques $\Phi = 0,5$ ($L = 120$ m)



Protection importante réalisée par l'association de deux haies espacées d'environ une fois leur hauteur.

III-1,2 Étude comparative de structure brise-vent équivalente sous l'angle de la quantité de matériaux

En partant du principe grossier qu'il faut deux fois plus de matériaux pour construire un écran de porosité $\Phi = 0,2$ que pour un écran de porosité $\Phi = 0,5$, à superficie frontale identique, nous avons confronté les dispositifs ci-dessous.

	nombre de brise-vent	h(m)	L(m)	Φ	espacement	surfaces protégées (m ²)
	1	5	120	0,20		S _{1,2} : 6767 S ₂ : 3640 S ₃ : 2214 S ₂ + S ₃ : 5854
	2	5	60	0,20	8 h	S _{1,2} : 5113 S ₂ : 5293 S ₃ : 1792 S ₂ + S ₃ : 7868
	2	5	120	0,50	1 h	S _{1,2} : 10188 S ₂ : 4728 S ₃ : 3140 S ₂ + S ₃ : 7868
	1	5	96*	0,20		S _{1,2} : 6764 S ₂ : 3113 S ₃ : 1980 S ₂ + S ₃ : 5093
	1	10	120	0,50		S _{1,2} : 13182 S ₂ : 4786 S ₃ : 94 S ₂ + S ₃ : 4880
	1	10	60	0,20		S _{1,2} : 5093 S ₂ : 2472 S ₃ : 757 S ₂ + S ₃ : 3229

* Deux retours sur 12 m à angle droit au vent (voir traitement des extrémités - paragraphe IV-2).

Ainsi, pour une protection moyenne (S_{1,2}) sur une superficie maximale, l'optimum est obtenu à partir d'un écran unique de perméabilité 0,5 sur une longueur de 120 m et une hauteur de 10 m.

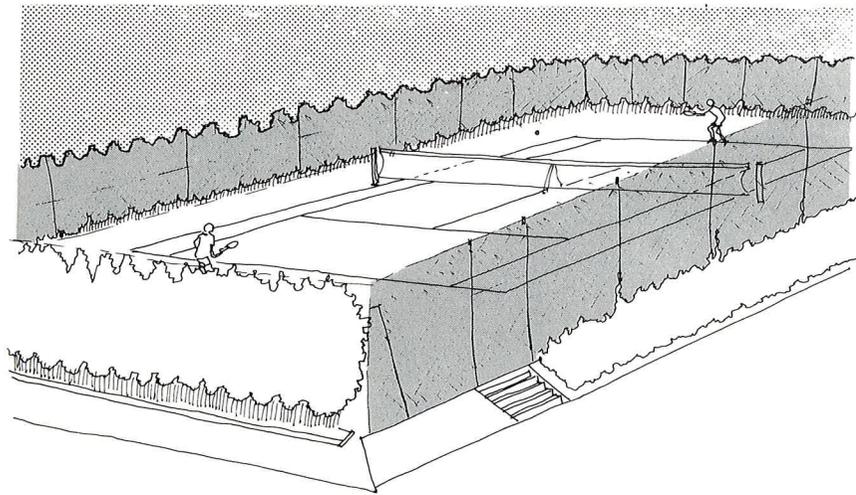
Pour une protection poussée (S₂ et S₃), l'association de deux écrans de perméabilité 0,5 espacés de 5 m (h = 5 m et L = 120 m) apparaît nettement supérieure, d'autant que ce dispositif reste intéressant en sillage lointain (seul le dispositif précédent est meilleur).

Maille optimale pour une protection très poussée III-1,3

Sur une « maille » ou alvéole constituée d'un écran poreux ou opaque de hauteur 5 m, nous avons cherché, pour un vent du type compagne, les dimensions maximales autorisant à l'intérieur de cette alvéole une protection pratiquement « absolue » (correspondant entièrement à S_3).

La maille optimale pour une hauteur de 5 m correspond à une forme carrée de 40 m de côté ou à un cercle de rayon 20 m constitué d'un écran de perméabilité 0,2.

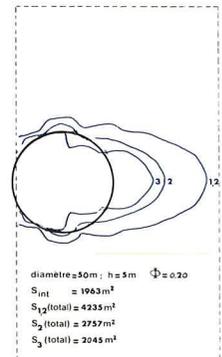
Ce dispositif trouve directement son application pour la protection des courts de tennis.



A l'aval d'une telle maille de surface interne $S_{int.}$, nous avons grossièrement

$$S_{1,2} > S_{int.}$$

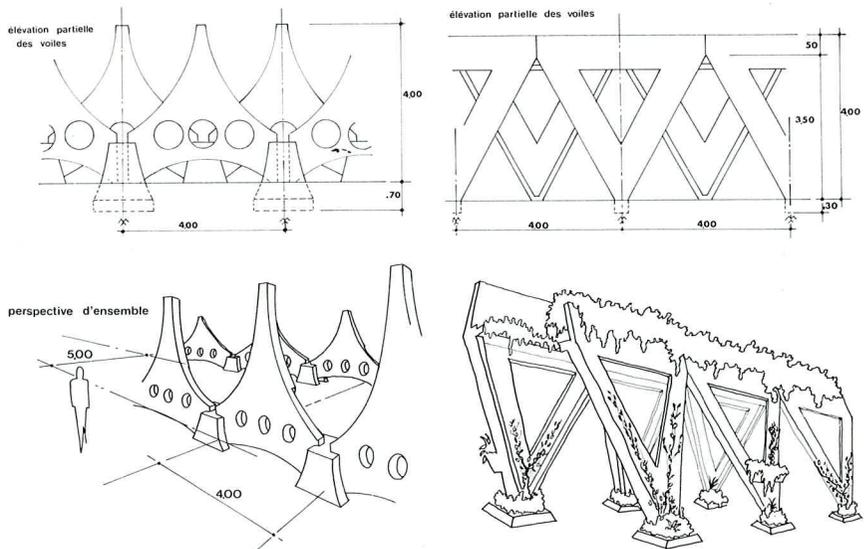
$$\text{et } S_2 \geq \frac{1}{2} S_{int.}$$



Association de structures tridimensionnelles pour une protection moyenne III-2

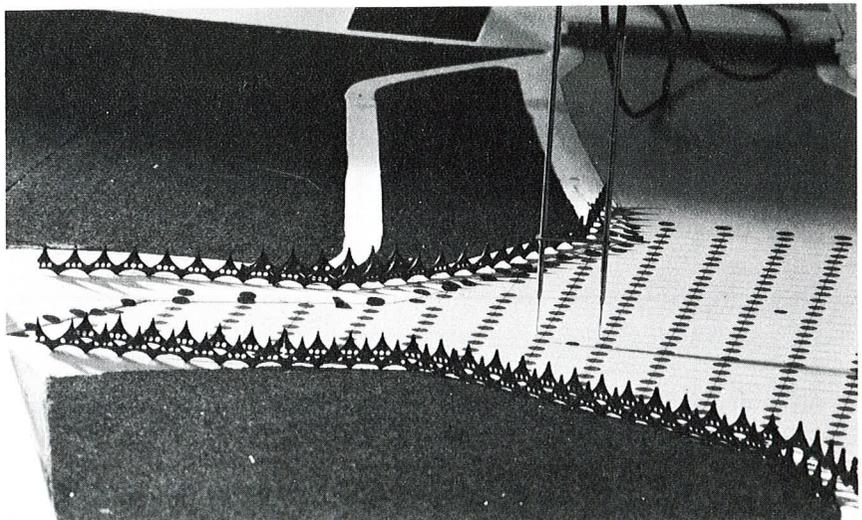
A partir de structures (béton) très perméables mais associées en deux rangées parallèles proches, on peut atteindre une protection aval intéressante. L'augmentation effective de perméabilité (par rapport à $\Phi \approx 0,5$ retenu comme optimum pour deux rangées proches) se trouve relativement compensée par une action de dissipation tridimensionnelle du flux.

Les deux dispositions dont les dimensions sont évoquées ci-dessous conduisent à une protection lointaine ($S_{1,2}$) et proche (S_2) pratiquement identique à celle introduite par un écran plan (hauteur 5 m), de perméabilité homogène $\Phi = 0,5$. Pour ces dispositifs, on peut estimer que la protection immédiate (poussée) est pratiquement inexistante ($S_3 \approx 0$).



Protection des voies navigables : structure béton (génie civil)

Ces dispositifs prennent tout leur intérêt dans le cas de linéaire important (génie civil), pour la protection de voies navigables ou de terrains sportifs par exemple.



échelle 1/200

Optimisation de la protection des canaux - Étude en soufflerie

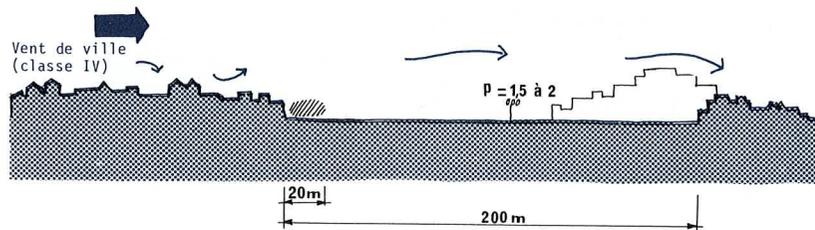
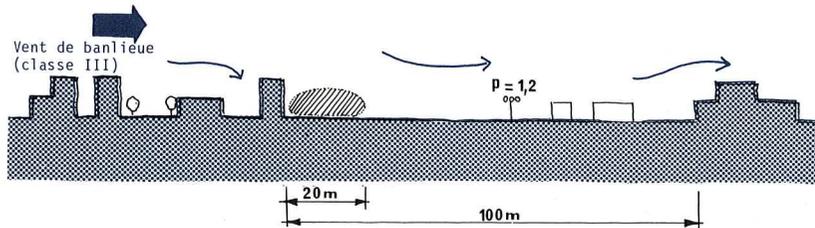
Association d'obstacle ou de rugosité III-3

Rappel sur l'influence « statistique » de la rugosité III-3

Nous avons montré, à plusieurs reprises, que la rugosité du sol, végétale ou bâtie, modelait le vent et induisait dans son sillage et sur une certaine distance un effet de masque.

La référence étant la rase campagne pour laquelle le facteur de protection ($z = 1,5 \text{ m}$) vaut $P = 1$, nous avons :

- à l'aval d'une rugosité « statistique » du type banlieue et dans un espace dégagé de construction dans un rayon de 50 m : $P = 1,2$;
- dans un espace extérieur dégagé de construction dans un rayon de 100 m , et entouré de rugosité bâtie du type ville : $P = 1,5 \text{ à } 2$.



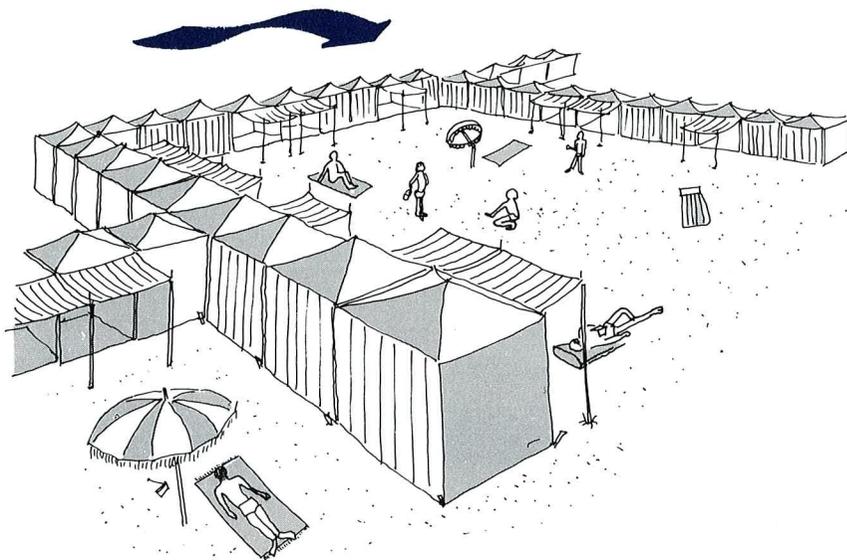
 Zone à probabilité importante pour que P soit ≥ 1 .

En d'autres termes, au niveau des espaces extérieurs et à l'aval d'une bande de 20 m environ de la lisière de l'espace (zone où le construit peut créer dans son sillage immédiat des anomalies aérodynamiques), les constructions constituent un système brise-vent « naturel » tout à fait notable.

III-3,2 Exemples de traitement d'espaces extérieurs par mise en place de rugosités

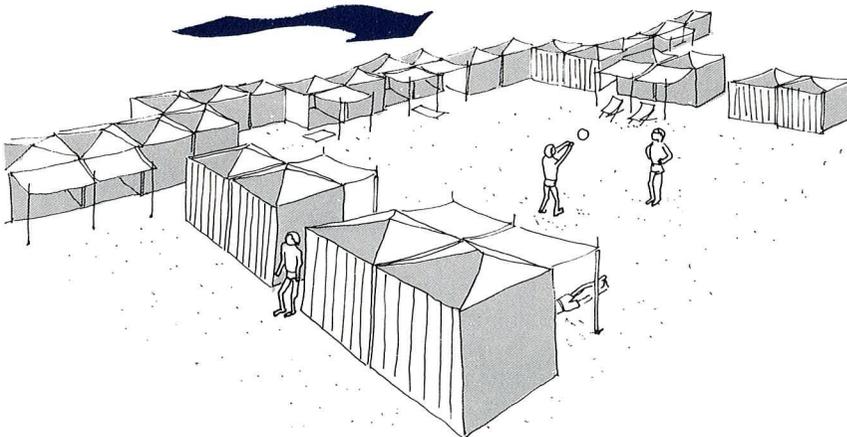
Protection contre le vent sur les plages

A partir des tentes ou cabines de bain standard (6 m³ environ), une juxtaposition de « mailles » en U orientées sous le vent et de côté inférieur à 20 m introduit un facteur de protection « intérieur » à la maille compris entre 1,2 et 1,8 suivant les zones.

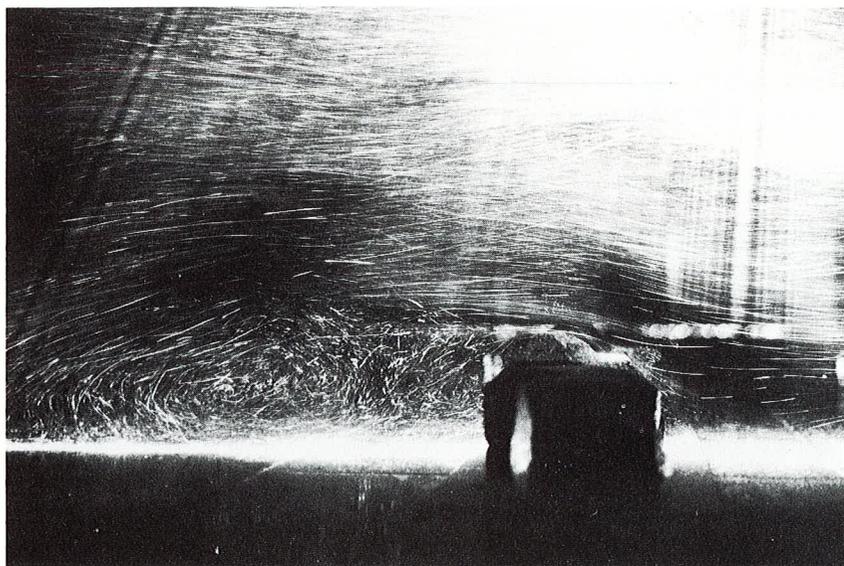
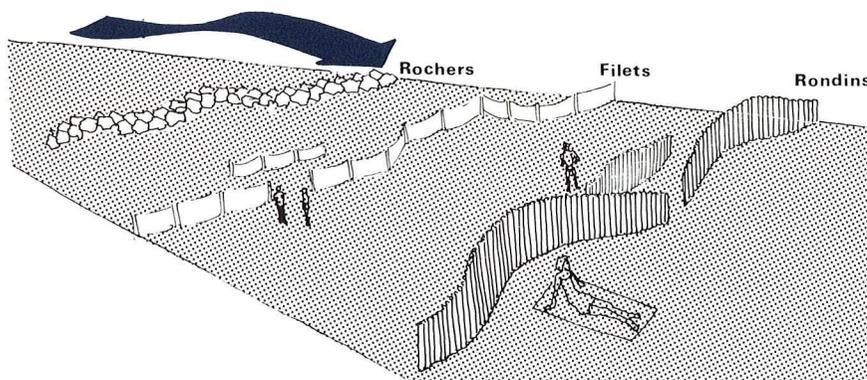


Dans la mesure où un espacement de l'ordre de 0,5 à 0,6 m est conservé entre chaque tente (ce qui résout sous le plan pratique le problème d'accessibilité), le facteur de protection devient homogène et voisin de $P = 2$ pour tout l'espace.

Au niveau du sol ($z = 0,4$ m) la protection $\left(\frac{v_r}{v_{z=0,4}^*} = P_{0,4} \right)$ est augmentée : $P_{0,4} > P = 2$.



Un autre type d'intervention consiste à créer perpendiculairement au vent des rangées de rocailles de hauteur 1 m (limite liée à la visibilité mesurée sur une plage) espacées de 10 à 12 m. Ces rangées interagissent pour créer un microclimat tel que la protection $P > 1,2$ (à hauteur d'homme : $Z \approx 1,5$ m).

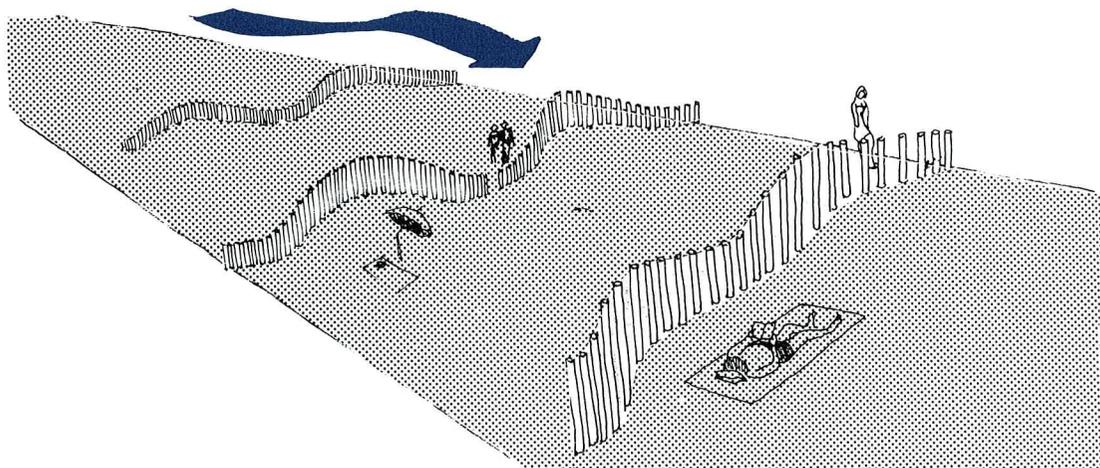


Visualisation de l'écoulement au passage d'une rangée de rocaille

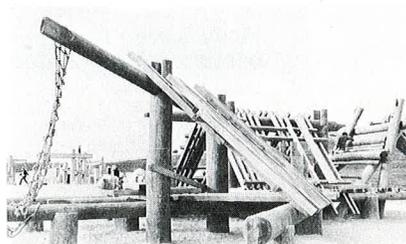
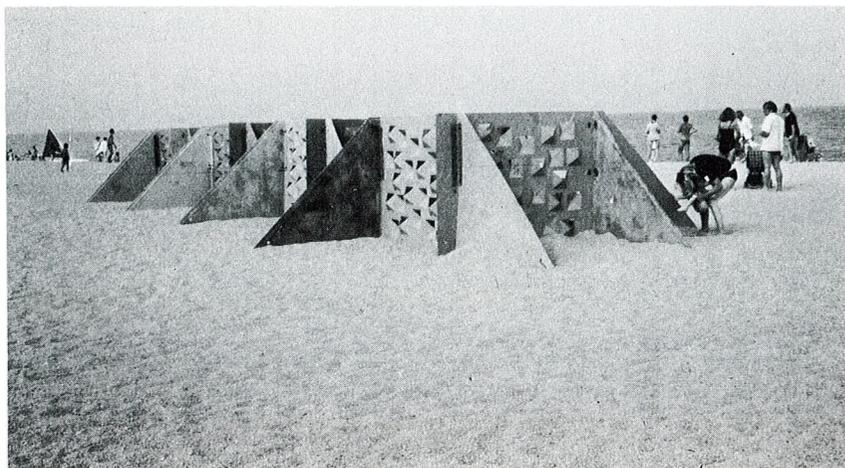


Le système peut être amélioré si une porosité de 0,4 à 0,5 est réalisée (rondins verticaux mal joints) :

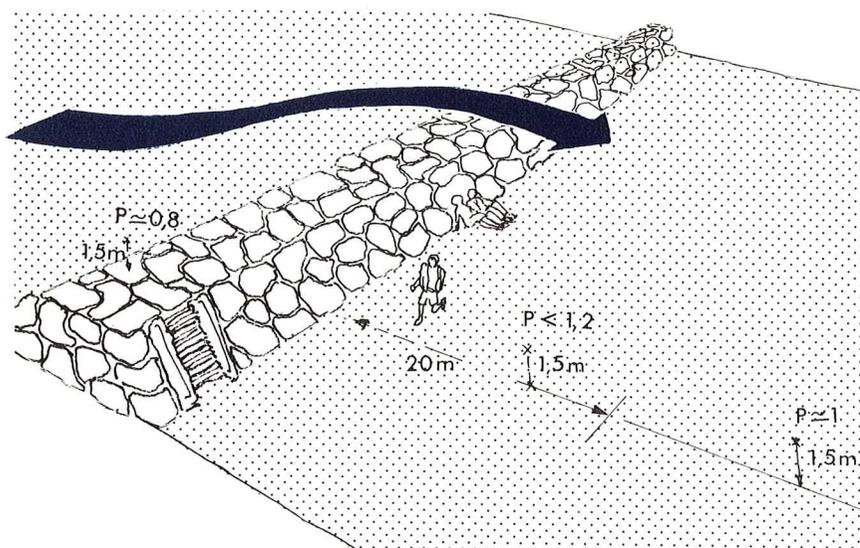
La protection $\left(\frac{v_r}{v_H^*} = P_H\right)$ dans la couche 0 à 2 m varie alors de $P_{0,5} \approx 3$ à $P \approx 1,5$.



D'une façon générale, tout « mobilier » de plage contribuera à la protection de celle-ci.

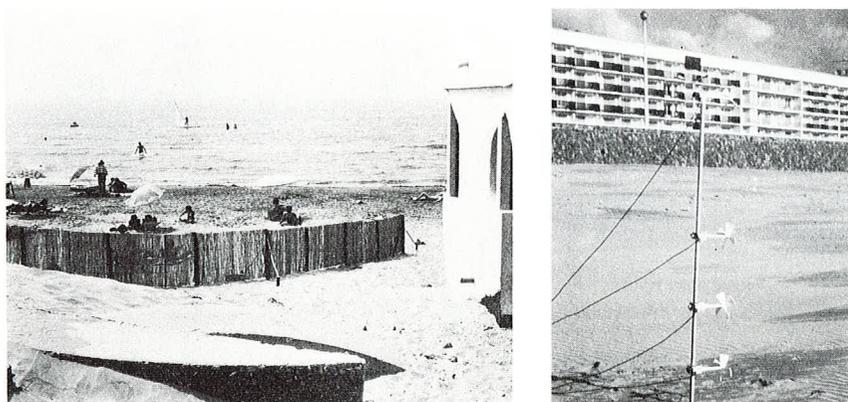


Jeux de plage faisant fonction de brise-vent



Le fait d'agir avec des éléments d'une hauteur ($h \approx 1$ m) inférieure à celle de la couche de confort qui préoccupe l'homme (0 à 2 m) rend l'action du dispositif moins performante dans la mesure où une partie du flux s'échappe directement par le dessus. A titre d'exemple, sur une jetée de roaille de 2 m de hauteur (et 3 m d'épaisseur), il n'y a pas protection et $P \approx 0.8$.

On retrouve bien évidemment à l'aval et sur une distance d'environ 20 m, un effet de protection.



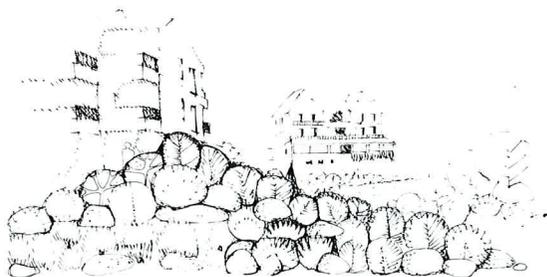
Étude (CSTB) du décollement du sable et de ses moyens de contrôle

Le confort sur les plages peut se coupler au problème du contrôle du décollement du sable. Un brise-vent type est proposé dans le paragraphe (IV-1,1)

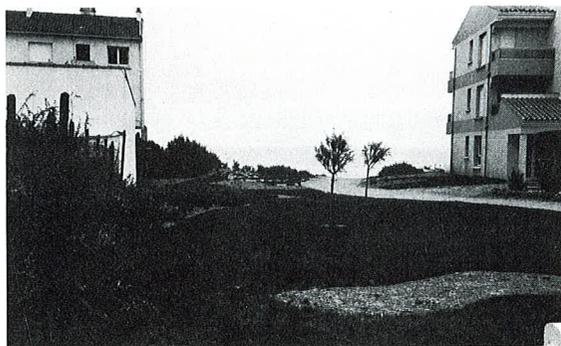
Protection contre le vent dans les espaces de jeux ou les squares

L'association de mouvements de terre, de roaille (hauteur environ 1 m) protégeant directement la végétation à leur aval (arbustes denses de hauteur moyenne 2 m) permet d'introduire une protection efficace ($1,2 < P < 2$) malgré un niveau d'action relativement bas (0 à 2,5 m). L'aménagement doit être réalisé alors en forme de maille (de 4 à 8 m de côté) ou en rideau relais (espacement d'environ 4 à 5 m) avec un jeu de chicane (pas de brèche « ouverte » au vent) si la circulation pédestre le nécessite.

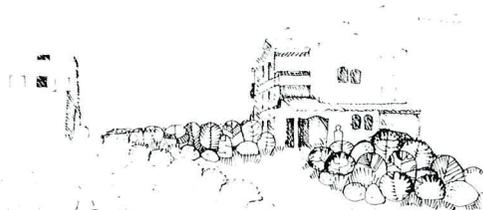
Pour l'exemple ci-dessous, ce dispositif peu sophistiqué a été adopté et permet de faire passer, entre les immeubles notamment, le niveau de la protection de $P = 0,8$ à $1,2$ ou 2 suivant les zones.



Proposition d'aménagement paysagé
(paysagiste ; M. F. Barnaud)



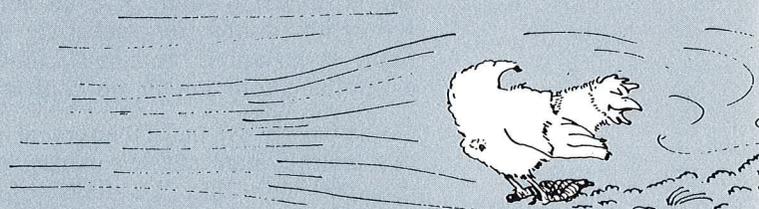
Espace balayé par les vents



dispositifs particuliers

IV

développement d'effets spéciaux	1	90
traitement des extrémités de brise-vent	2	94
exemples d'association de l'effet de guidage et de l'effet de dissipation d'énergie	3	96
traitement du microclimat d'une passerelle par effets de guidages ou de dissipation d'énergie	4	99



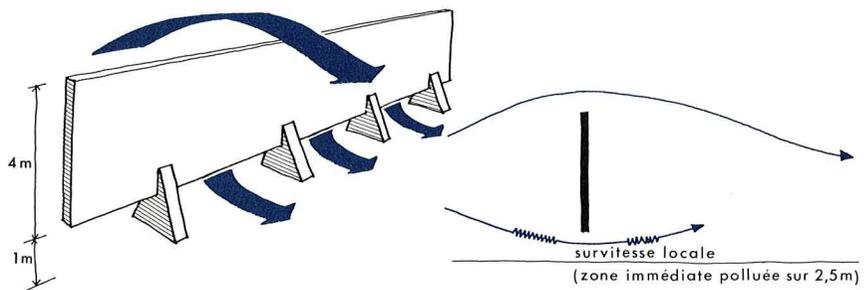
IV-1 Développement d'effets spéciaux

Pour un dispositif brise-vent, on ne peut pas jouer aérodynamiquement à la fois sur un système « à perte de charge » (fort laminage du flux) et à guidage (déflexion du flux par aube). L'un des deux principes l'emporte toujours sur l'autre. L'aérodynamicien pourra néanmoins sous certaines conditions parfaire un dispositif basé sur un principe en utilisant partiellement le deuxième (voir l'exemple des trempins tridimensionnels, paragraphe IV-3).

Un certain nombre de sophistications aérodynamiques ont été testées. Nous présentons ici les quelques dispositifs qui améliorent l'efficacité d'un élément brise-vent, sachant que les références seront, suivant les cas, le brise-vent opaque et les brise-vent à perméabilité homogène de 0,2 à 0,5 (les dimensions hors tout étant conservées constantes par ailleurs).

IV-1,1 Brise-vent à « ventilation de pied »

Pour éviter la recirculation de culot (au lieu de rendre perméable l'écran), on peut ventiler directement le sillage en perçant la base du brise-vent opaque :

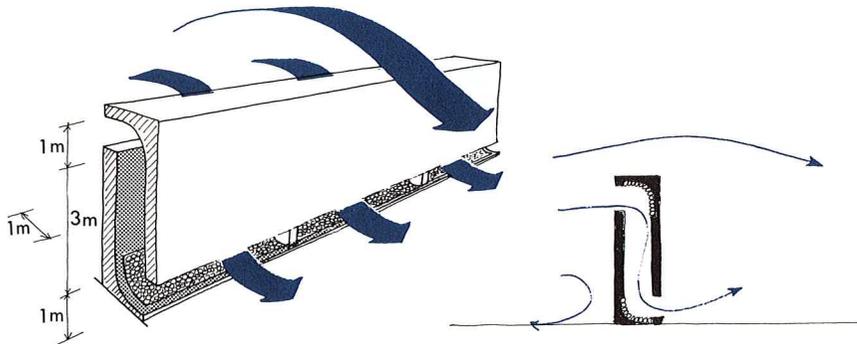


Par rapport à un écran opaque, le dispositif conduit à un gain de 10 % sur le sillage lointain $S_{1,2}$, un sillage proche du même ordre et une protection double de superficie au niveau du sillage immédiat (S_3). Seule la proximité immédiate (environ sur 2,5 m aval) de l'ouverture est polluée sous l'angle du confort.

Ce dispositif est particulièrement performant dans l'étude du contrôle des microclimats sur les plages, et notamment du décollement et du transport du sable. Le dispositif, en tant que brise-vent, retarde le décollement du sable et garde son efficacité lors des « vents de sable », la base ne se colmatant pas. A titre d'exemple, un écran de hauteur

1,30 m avec une ouverture de pied de 0,30 m a pratiquement la même efficacité qu'un élément de même hauteur et de perméabilité $\Phi = 0,50$.

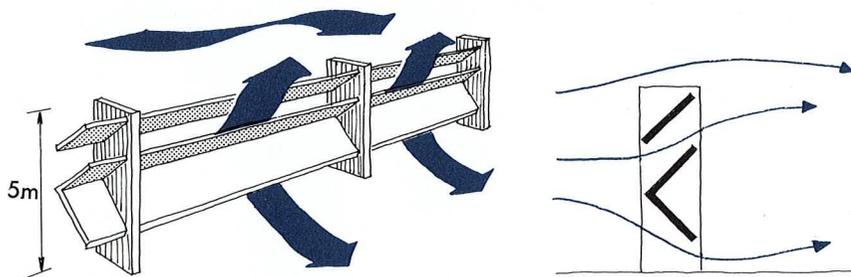
Le principe peut être « poussé » en conduisant la « dynamique de tête » à la base arrière de l'écran :



L'écran ainsi constitué présente des performances comparables à un écran de même dimension et de perméabilité homogène $\Phi = 0,2$ tant pour S_2 que pour $S_{1,2}$. Par contre, S_3 par rapport à notre référence se trouve réduite de l'ordre de 50 % mais reste deux fois plus importante que dans le cas d'un écran opaque.

Ce dispositif présente un intérêt évident dans le cas où les deux fonctions de brise-vent et d'écran acoustique (nécessité d'une opacité directionnelle absolue) sont recherchées simultanément. Dans l'application pratique, les parties en courbe sont tapissées intérieurement de laine de verre ou de charbon de bois (dans le sol), pour améliorer l'efficacité acoustique.

On peut ainsi développer l'alimentation du sillage en pied de brise-vent par un aubage :



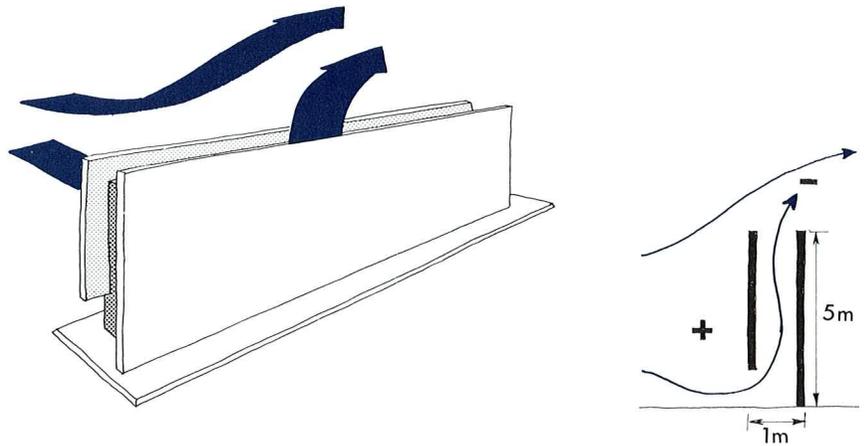
Le système de lames a essentiellement une fonction de dissipation d'énergie (même action que la perméabilité) mais l'on peut introduire une dissymétrie (aube en retour à 45° vers le bas) qui privilégie localement le flux de pied.

Ce dispositif présente rigoureusement les mêmes performances de protection qu'un écran (de même dimension), de perméabilité homogène $\Phi = 0,2$, et constitue par conséquent une interprétation esthétique et technologique intéressante.

Les ordres de grandeur des dimensions présentés sur les exemples doivent être respectés, dans la mesure où des variantes pourraient changer le rapport de force entre le guidage et les pertes de charge et, par là même, modifier l'efficacité des dispositifs.

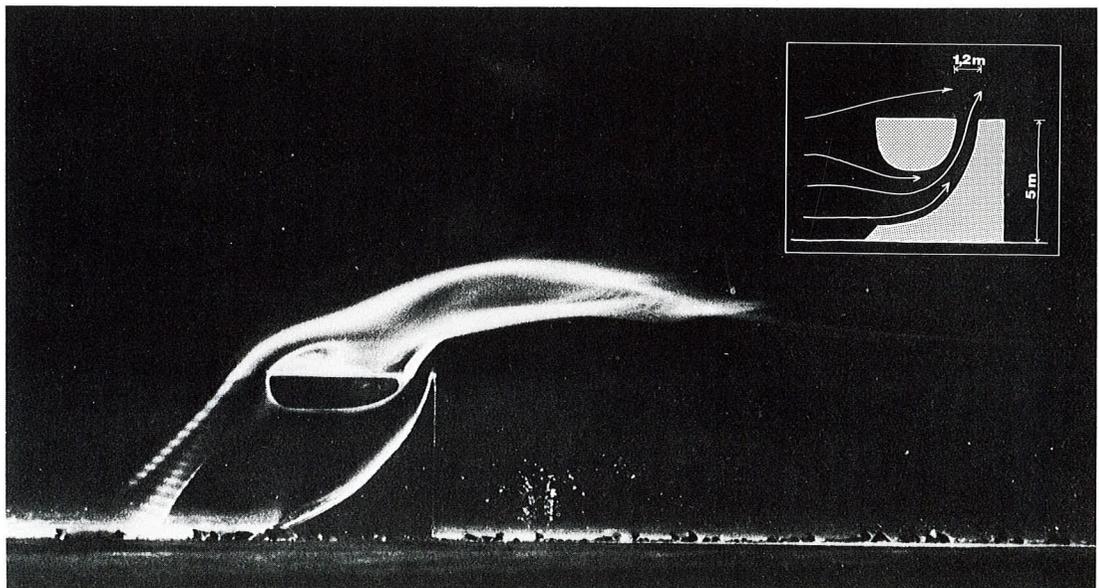
IV-1,2 Brise-vent à « rideau d'air »

En utilisant la surpression du vent (obstacle opaque) et la dépression en tête (décollement), on peut par canalisation développer un effet de cheminée.



Comparé à un écran opaque de dimensions semblables, les gains obtenus sont de 10 % sur $S_{1,2}$ et S_2 , le sillage immédiat restant inchangé.

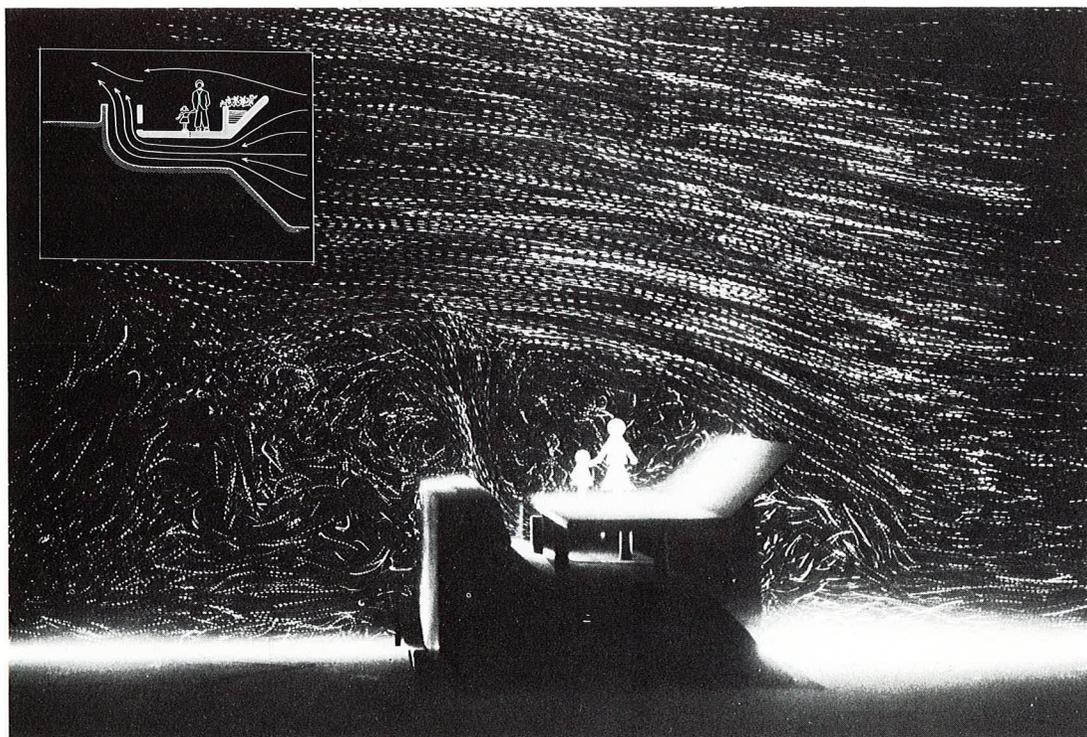
Le principe peut être développé par un carénage au vent en forme de collecteur.



Visualisation par fumée de l'effet cheminée

Dans ces conditions, tout se passe comme si la hauteur du brise-vent (opaque) était portée de 5 à 8 m (gain de 10 %) sur le sillage lointain $S_{1,2}$, et de 6 à 8 m pour le sillage proche et immédiat (gain de 20 % sur S_2 et S_3).

Une utilisation pratique de l'action du rideau d'air ainsi formée est la « bulle autoprotégée » qui trouve son application en cheminement de belvédères ou de passerelles suspendues (voir aussi paragraphe IV-4).



Bulle autoprotégée sur belvédère : visualisation laser (chronophotographie)

Le rideau d'air ainsi constitué surélève dynamiquement le flux incident et évite partiellement la retombée aval. Il y a création d'une véritable bulle de fluide mort (auto-protection).

Au niveau du cheminement et jusqu'à 2 m de hauteur, le facteur de protection est de l'ordre de 2 (référence à l'amont à 1,5 m du sol).

Ce principe présente l'avantage considérable de contrôler l'ambiance climatique tout en sauvegardant la vue.

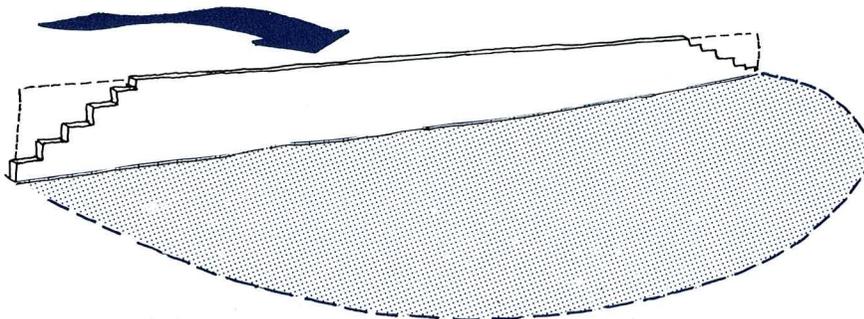
IV-2 Traitement des extrémités de brise-vent

La forte variation horizontale de vitesse (gradient horizontal de vitesse) à l'extrémité des écrans associée à la survitesse du contournement du coin (d'autant plus importante que la porosité est faible) sont particulièrement mal ressenties sous l'angle du confort et développement, en outre, deux tourbillons aval de coin qui réduisent localement une partie de l'effet de protection.

Les traitements suivants sont envisageables :

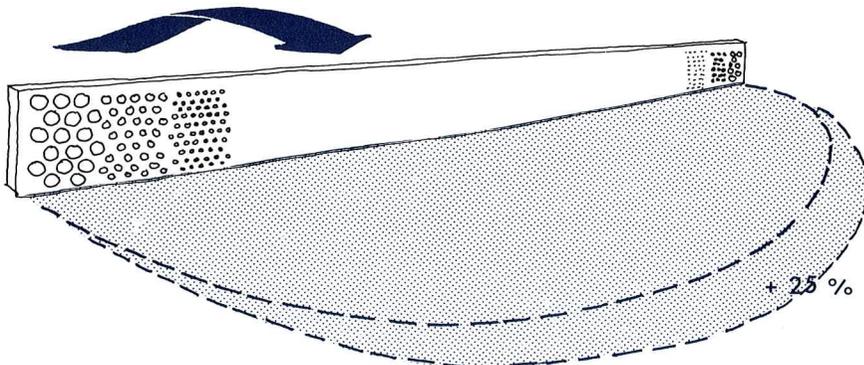
Cas des brise-vent opaques

— Une configuration d'extrémité en escalier donne une protection identique à celle obtenue avec un brise-vent opaque, de linéaire égal, à discontinuité de bout abrupte. Parallèlement, le fort gradient horizontal de vitesse disparaît ainsi que la survitesse de contournement.



Protection identique ($S_{1,2}$, S_2 et S_3) pour les deux géométries de coin

— Augmenter la porosité de manière progressive sur les 10 derniers mètres avant l'extrémité (par exemple de $\Phi = 0,2$ à $0,5$) conduit à la suppression de l'anomalie de coin et à une augmentation globale des aires $S_{1,2}$, S_2 et S_3 de l'ordre de 25 %.



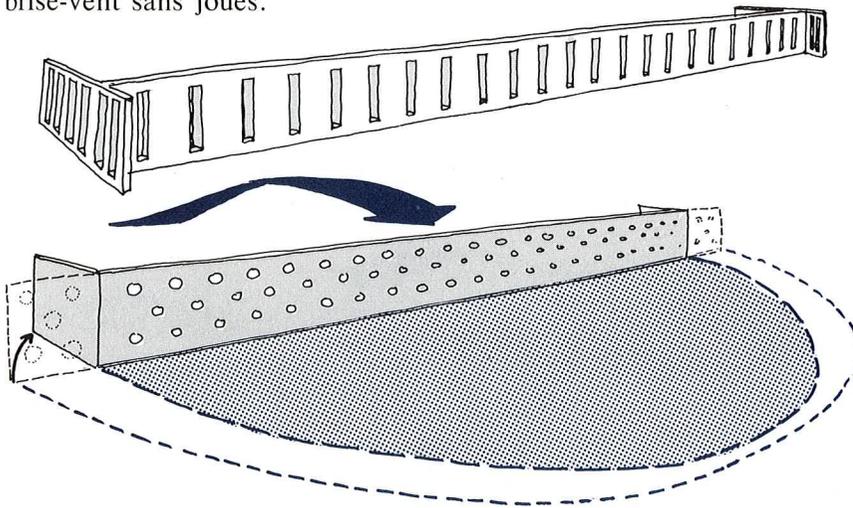
Le gain est de 25 % sur $S_{1,2}$, S_2 et S_3 en comparaison avec l'écran opaque de même dimension.

Cas des brise-vent poreux

— Pour un écran de perméabilité $\Phi > 0,20$, l'anomalie de survitesse et le fort gradient de coin n'existent plus.

— Pour des écrans tels que $\Phi \leq 0,20$, le fait d'adjoindre deux joues poreuses ($\Phi = 0,2$) remontant au vent d'environ 10 m, réduit l'anomalie de coin mais surtout induit un gain important sur les surfaces protégées soit une augmentation de 25 % sur $S_{1,2}$, 15 % sur S_2 et 25 % sur S_3 .

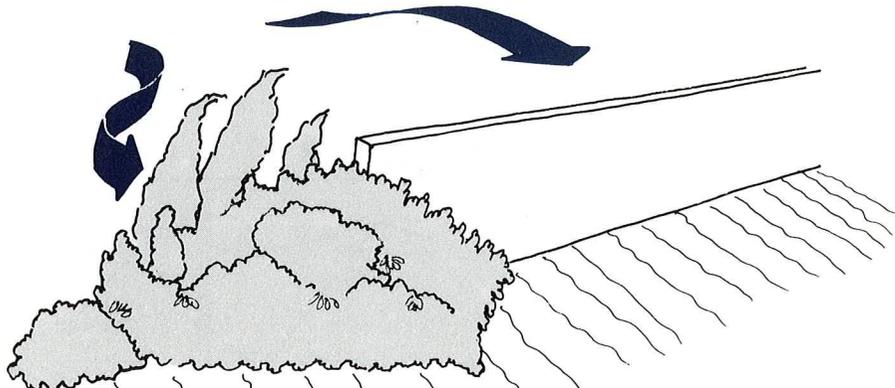
Pour $S_{1,2}$, S_2 et S_3 , gains moyens de 20 % environ par rapport au même brise-vent sans joues.



A linéaire égal, la protection est inférieure avec les deux joues

Dans la pratique, nous conseillons aux concepteurs d'éliminer la discontinuité des extrémités par le jeu de décrochement ou de porosité croissante. Cette action détruit l'anomalie de coin. En outre, pour les écrans de perméabilité $\Phi \leq 0,2$, l'adjonction d'éléments perméables remontant au vent améliore systématiquement l'effet de protection.

Pour répondre à ce traitement, la végétation associée à des mouvements de terre (et rocaille) peut parfaitement résoudre le problème.



Exemple de traitement végétal et minéral sur environ 15 mètres à l'extrémité de l'écran

L'utilisation de joues poreuses dans le cas d'écrans opaques conduit à des gains identiques sur les surfaces protégées et détruit l'anomalie de coin.

L'adjonction de joues opaques pour des écrans perméables améliore les zones protégées d'environ 10 à 15 % mais *renforce* l'anomalie de coin.

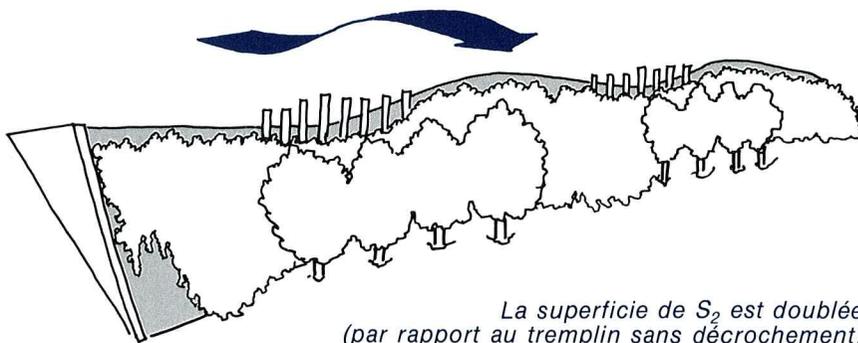
A linéaire égal et pour une perméabilité $\Phi = 0,2$, l'écran doté de deux remontées d'extrémité au vent de 10 m a des performances moins bonnes qu'un écran qui n'en possède pas (paragraphe III - voir tableau)

IV-3 Exemples d'association de l'effet de guidage et de l'effet de dissipation d'énergie

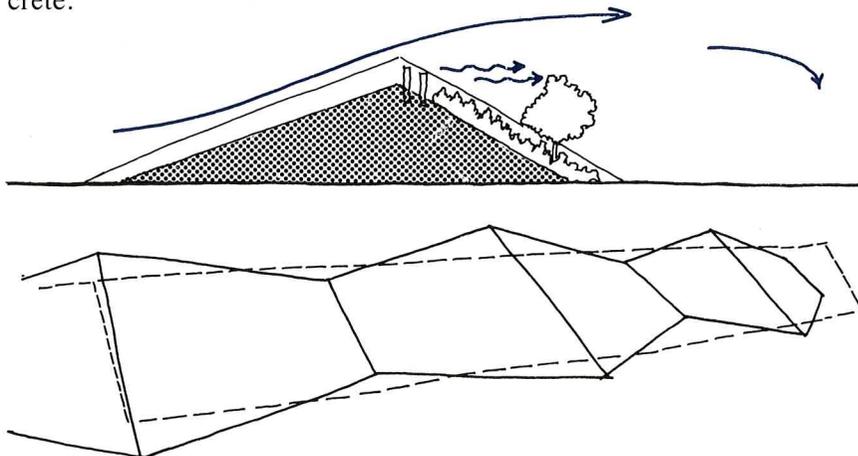
Tremplin pyramide avec brise-vent de tête

Dans le premier chapitre, nous avons évoqué dans quelles conditions dimensionnelles (hauteur 10 à 15 m, pente au vent 3/1 et sous le vent 2/1), l'effet tremplin fonctionnait.

Si l'on compare la protection (correspondant à l'aire S_2) derrière un tremplin de hauteur 10 m, d'une part, et d'autre part derrière un tremplin dont la crête est en dent-de-scie (hauteur comprise entre 8 et 12 m) avec un pas entre deux crêtes de 30 à 40 m et une obstruction partielle (50 % environ) des parties creuses en sommet (brise-vent de $\Phi = 0,5$ par exemple), on constate un gain sur S_2 de plus de 50 %.



Cette architecture de talus conjugue un effet majeur de tremplin et un effet auxiliaire de dissipation : le contournement tridimensionnel des crêtes (en pyramide) crée une accélération que l'on vient piéger localement par un élément à perte de charge. En pratique, ces éléments d'accrochage peuvent être réalisés à base de pieux, rondins, rocailles et végétation et seront toujours placés légèrement sous le vent de la crête.



Le pas de crête doit être inférieur à 40 m si l'on veut que ce dernier soit « vu » par le vent.

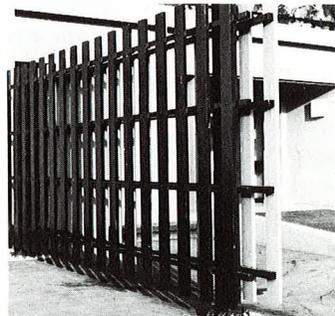
Passage sous immeubles avec couloir d'équilibrage

Les passages sous immeubles qui relient la face au vent en surpression à la face arrière dépressionnaire sont siège de survitesses et de tourbillons importants. Ceux-ci se prolongent largement à l'aval du passage (sortie en jet). Localement, P atteint 0,6 (ce qui correspond à une amplification de 70 %).

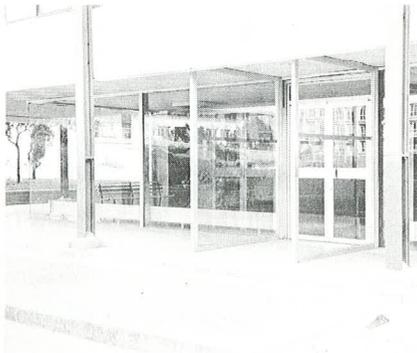


Survitesse au niveau des pilotis (visualisation par enduit)

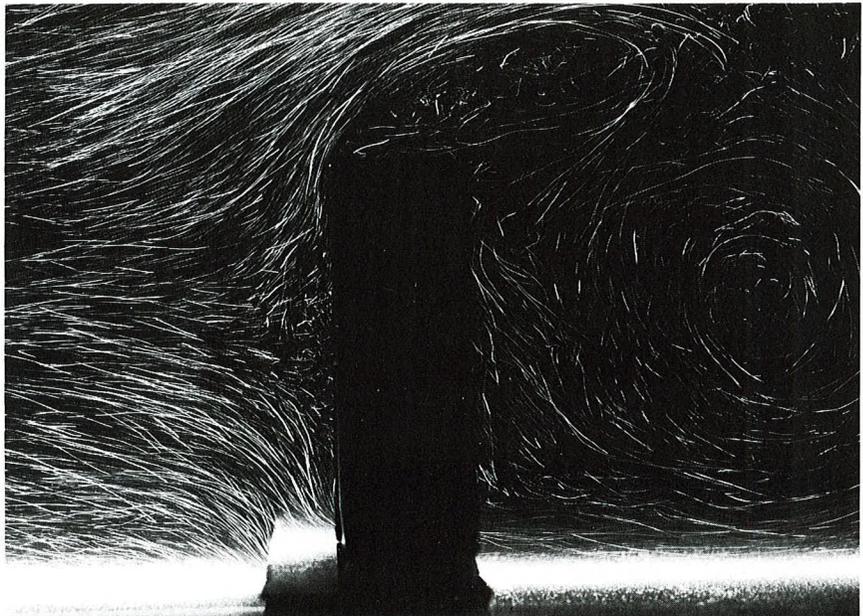
Une obstruction totale ou partielle du passage (porte avec sas, chicanes, écrans poreux, etc.) résoud aérodynamiquement l'anomalie mais pose le problème de la circulation pédestre ou encore de la perméabilité visuelle.



Exemples de traitement de sortie d'immeuble ou de passage sous immeuble

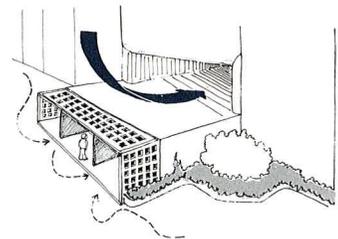
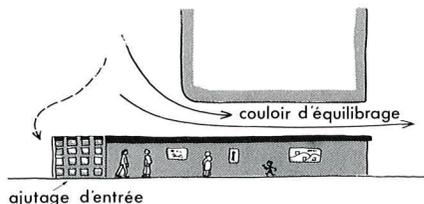


Dans le cas de passage suffisamment important (environ 5 à 6 m de hauteur et de largeur), un principe consiste à diviser le trou en deux canaux : l'un de guidage où l'on favorisera aérodynamiquement l'écoulement (équilibre des différences de pression), l'autre piétonnier où l'on freinera tant que faire se peut le flux, notamment au niveau de l'ajutage de rentrée.



Accélération du flux au niveau du couloir d'équilibrage

Le microclimat peut être amélioré ($P > 1$) en plaçant, dans la voie piétonnière, un cloisonnement perméable ($\Phi \approx 0,3$), en perméabilisation ($\Phi = 0,3$) l'ajutage de rentrée, en resserrant légèrement l'entrée au vent (pincement d'environ 10°) ou en adoptant des couloirs d'équilibrage supplémentaires latéralement.



Le système fait disparaître totalement l'anomalie au niveau du passage ($P > 1$) tout en sauvegardant la vue et la circulation pédestre.

Traitement du microclimat d'une passerelle par effets de guidages ou de dissipation d'énergie **IV-4**

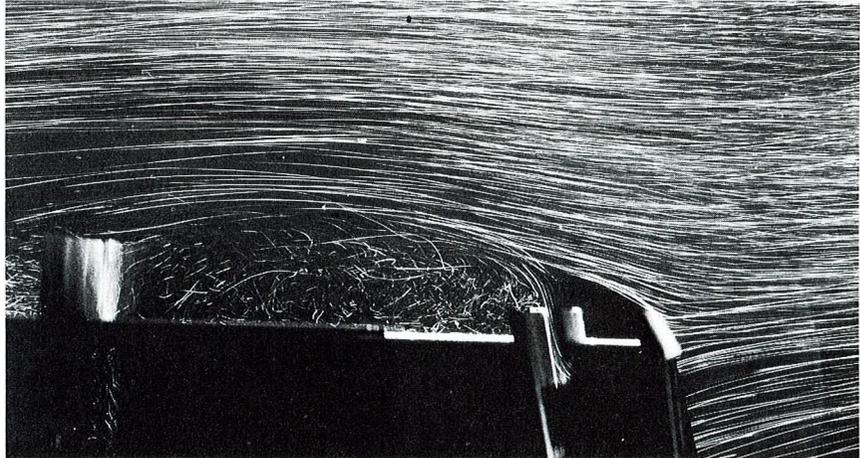
Nous avons présenté dans ce chapitre, le mécanisme de la bulle aérodynamique basé sur l'utilisation d'un rideau d'air.

Appliqué à un carénage de passerelle, le facteur de protection est tel que $P > 2$.



Visualisation laser (bulle autoprotégée)

Ce schéma suppose au demeurant une orientation privilégiée vis-à-vis des vents dominants.



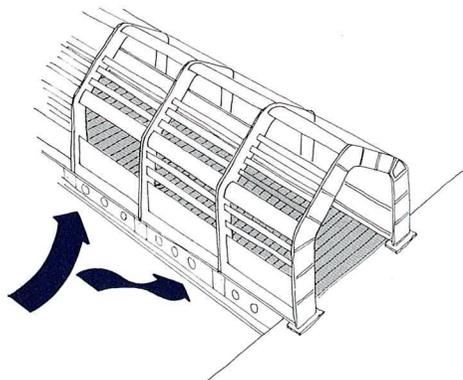
Application au carénage d'un tablier de pont (contrôle du microclimat pour les cyclistes et les véhicules) Maquette au 1/50

Deux types de traitement de passerelle peuvent être proposés pour lesquels $2 \leq P \leq 3$ quelle que soit la direction du vent :

Solution brise-vent

L'associativité des deux écrans poreux $\Phi \approx 0,5$ fonctionne de manière relativement indépendante de l'incidence du vent et de son sens.

Le dispositif est plus intéressant qu'un système à deux parois opaques non seulement pour la vision (obstruction partielle seulement) mais aussi pour la charge due au vent (dimensionnement de la passerelle).



Solution guidage

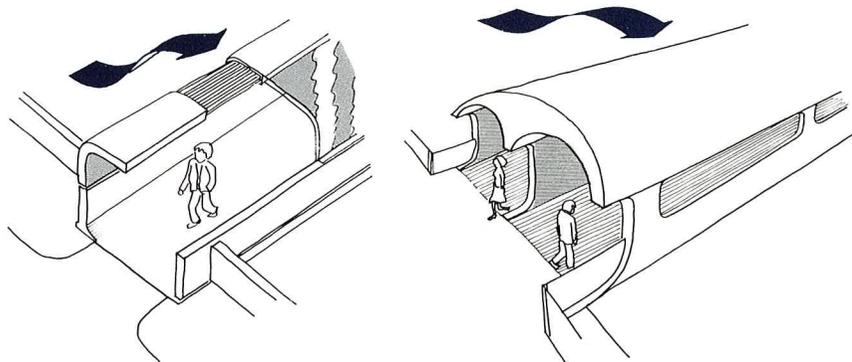
La protection est rigoureusement du même ordre ($P \approx 3$) que le « canal » étanche à l'air soit en surpression (ouverture au vent) ou en dépression (ouverture sous le vent).

L'avantage majeur du dispositif est de libérer la vue sur toute une face.



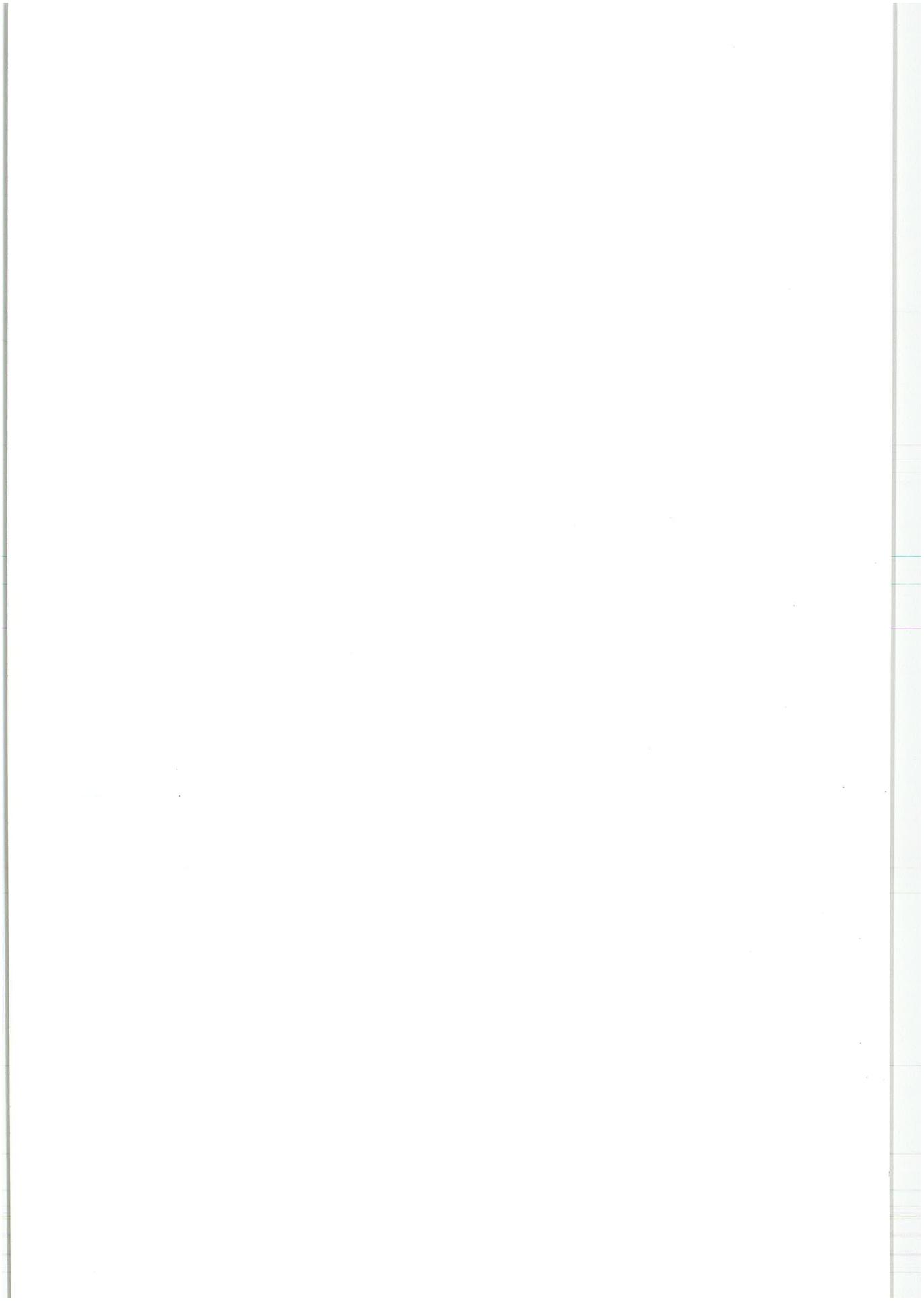
Visualisation laser (passage autoprotégé)

Il faut noter que si, dans le traitement de la passerelle par rideau d'air, les profils restent délicats, dans ce dernier cas, la géométrie du « boyau » importe peu. La seule condition est que le volume soit étanche sur trois côtés.



Le niveau de protection est très important ($P > 3$) quel que soit le sens du vent

Pour éviter les courants longitudinaux qui pourraient se développer le long de la « canalisation », il est recommandé d'orienter, autant que faire se peut, la passerelle perpendiculairement au vent dominant.



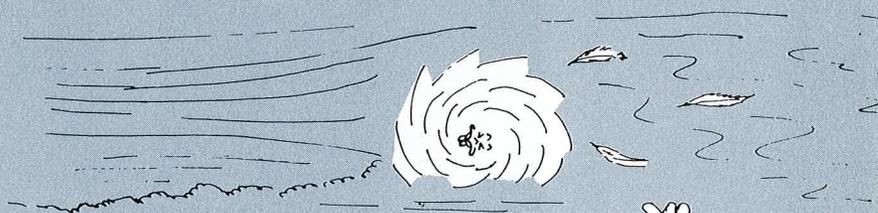
les brise-vent végétaux

V

caractérisation aérodynamique
de l'efficacité des écrans végétaux **1** 104

composition de l'écran végétal :
le point de vue aérodynamique **2** 111

contraintes de mise en œuvre **3** 113



V-1 Caractérisation aérodynamique de l'efficacité des écrans végétaux

V-1,1 Difficulté d'une typification aérodynamique de la végétation

Nous avons évoqué le rôle prépondérant de la porosité géométrique sur l'effet de protection. Or, dans le cadre d'écrans végétaux, la perméabilité est fonction :

De la vitesse du vent

La flexibilité des branches, l'orientation des feuillages, etc., rendront la protection variable avec le niveau du vent (et par suite variable d'un instant à l'autre).



Arbre déformé par le vent

De l'essence du végétal

Suivant la nature et la texture de l'arbuste ou de la haie, le « filtrage » introduit par ce type d'écran ne sera pas le même. A titre d'exemple : une haie de feuilles ou de végétaux à aiguilles ne conduiront pas au même degré de protection.



Haie de conifères efficace pour la protection des habitations

De la forme et de l'épaisseur de la masse végétale

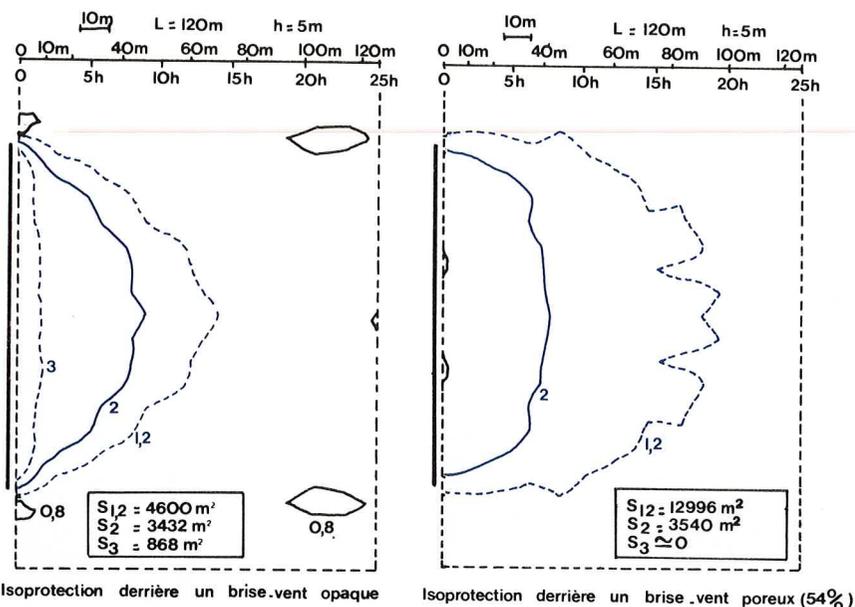
Et notamment de l'existence ou non d'une forte perméabilité de pied (arbuste à tronc).



Rideau d'arbres modelés par le vent



Arbre en hiver : organisation des branches en fonction des vents dominants



Exemple de géométries d'isoprotections à la hauteur $z = 1,5\text{ m}$, derrière un mur plein et un filet poreux (tracés à partir des résultats directs des mesures)

Ces isoprotections peuvent être traduites en durée de gêne annuelle (pour le seuil $v_s = 6\text{ m/s}$).

A titre d'exemple, nous allons calculer la protection induite par un écran brise-vent grossièrement perpendiculaire au vent de Tramontane (référence aux données météorologiques de la station de Perpignan — chap. I) et placé en rugosité de rase campagne. Dans cet exemple,

$$P = \frac{1}{\psi}; \bar{U}_{\text{ref}} = \bar{U}_{\text{météo}}; C_r = 0,62; K = 0,20 \text{ d'où}$$

$$\bar{U}_{\text{os}} \approx 7,3P_j$$

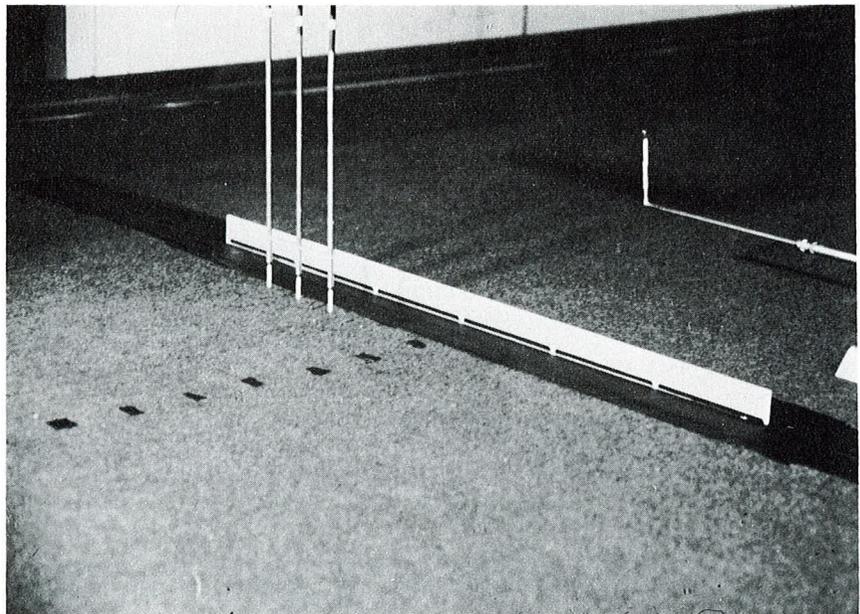
Aux facteurs de protection $P = 1,2; 2$ et 3 correspondent les durées annuelles de gêne suivantes :

	Durée annuelle pendant laquelle le seuil est atteint ou dépassé	Pourcentage du temps annuel
Devant le brise-vent	2 000 heures	23 %
Derrière le brise-vent :		
jusqu'à l'isoprotection $P = 3$	jamais	0 %
jusqu'à l'isoprotection $P = 2$	200 heures*	2 %
jusqu'à l'isoprotection $P = 1,2$	1 500 heures*	17 %
*Durée maximale, atteinte sur l'isoprotection.		

Ces ordres de grandeur illustrent l'influence du facteur de protection sur la réduction du temps de gêne.

II-3 Quantification de l'effet de protection

A partir de différents types de brise-vent placés dans un contexte réaliste d'utilisation (reproduction du phénomène vent, de l'environnement, etc.), une étude systématique en soufflerie a permis de quantifier le niveau de protection et les aires associées.



Mesure en soufflerie reproduisant le vent naturel (échelle 1/200) de la protection à l'aval des différents types d'écran (sondes anémométriques)

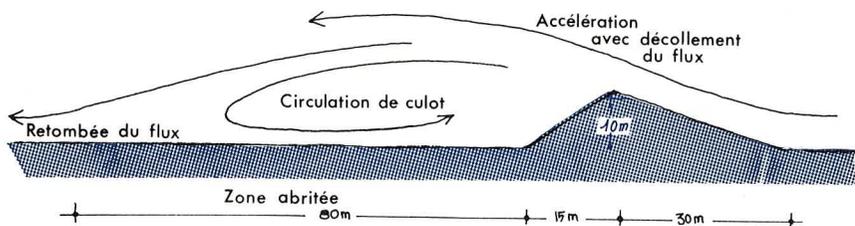
Les comparaisons ont été réalisées à partir du réseau d'isovaleur du facteur de protection $P = 1,2; 2$ et 3 , et des aires $S_{1,2}$, S_2 et S_3 associées.

II-3,1 Influence de l'aérodynamique propre des brise-vent

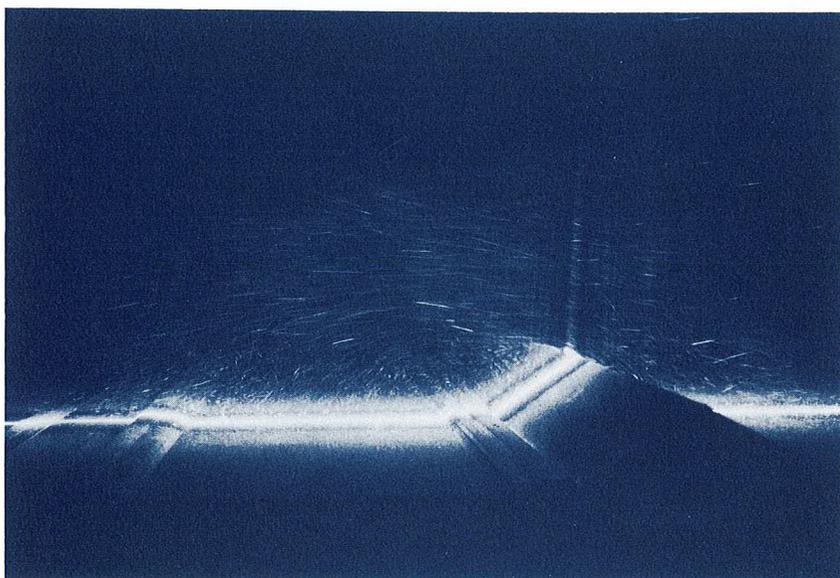
Influence de la forme et des dimensions d'un brise-vent

Si la « profondeur » (dimension dans le sens du vent) de l'obstacle est au moins de l'ordre de 30 m (dimension non négligeable devant l'échelle λ_x du vent) et si l'obstacle est opaque, la géométrie joue alors un rôle (profil de la face au vent notamment).

L'exemple du talus tremplin fixe les dimensions pour lesquelles l'effet se fait sentir.



Schématisation de l'écoulement au passage d'un talus tremplin



Visualisation laser

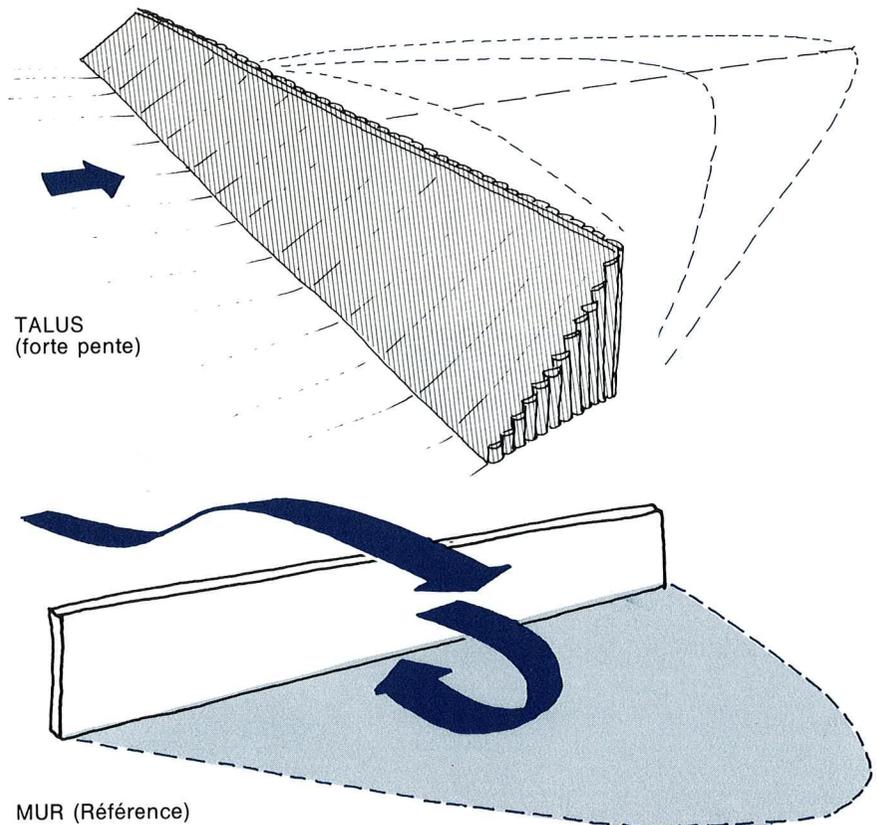
Dans le cas des brise-vent urbains, les écrans ou les structures brise-vent (outre certains cas pour la végétation) ont une épaisseur négligeable par rapport à l'ordre de grandeur évoqué et l'effet de guidage n'existe pas.

Le flux franchit alors cette barrière sans « glisser » sur l'obstacle et le contournement s'effectue pratiquement indépendamment de sa forme. Ce phénomène est encore plus évident dès que des courants traversants existent (perméabilité de l'obstacle).

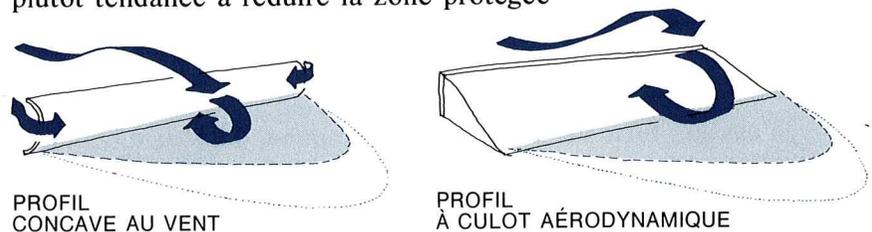
Ainsi, les démarches de profilage, (même à partir d'éléments opaques au vent), n'aboutissent pas à un gain significatif sur l'effet de protection.

Exemple de géométries différentes :

La protection est du même ordre ($S_{1,2}$, S_2 , S_3) dans le sillage, à hauteur et longueur égales

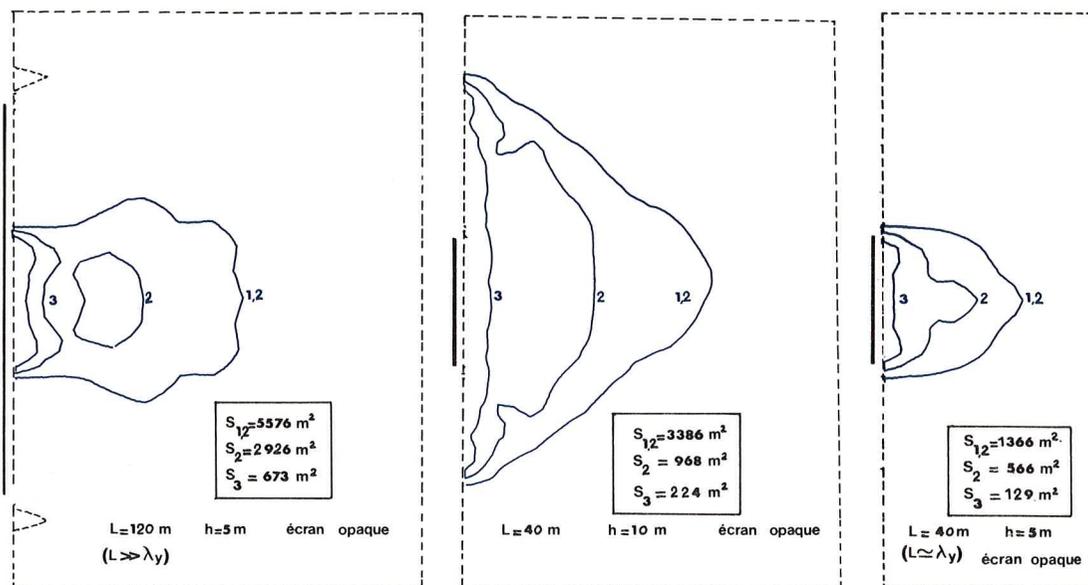


Pourtant, les culots profilés ou des courbures concaves au vent ont plutôt tendance à réduire la zone protégée



En conséquence (dans cette gamme de dimensions), le brise-vent plan opaque ou poreux semble la *forme* à retenir, d'autant qu'il est simple de mise en œuvre et que « l'épaisseur » nécessaire à sa réalisation est indifférente.

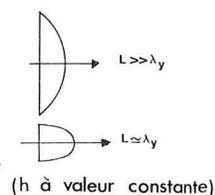
Si la forme n'a qu'un rôle très secondaire pour des éléments d'échelle faible dans l'axe du vent, les dimensions transversales de l'obstacle (hauteur et longueur) jouent un rôle prépondérant (notamment sur S_2 et S_3). Les *mécanismes de contournement* et d'alimentation du sillage des écrans vont être différents suivant les dimensions (et tout particulièrement la longueur L) par rapport aux échelles transversales λ_y et λ_z (ordre de grandeur - chap. I) du vent. Par suite, la géométrie et la superficie S d'un niveau de protection donné P vont être modifiées.



Exemple de géométries d'aires protégées pour différentes longueurs d'un écran opaque (tracés à partir des résultats directs des mesures)

La longueur du brise-vent, qui est au moins (dans notre étude) du même ordre que l'échelle transversale du vent λ_y , jouera comparativement un rôle plus important que la hauteur qui vérifie toujours $h \ll \lambda_z$.

La géométrie des aires protégées peut grossièrement se rattacher à une demi-ellipse de grand axe matérialisé par le brise-vent pour $L \gg \lambda_y$ et une demi-ellipse de petit axe matérialisé par le brise-vent pour $L \approx \lambda_y$.



Cette dissemblance s'explique par une proportion hauteur-longueur différente associée à un « effet d'extrémité » relativement plus grand dans le cas où $\lambda_y \approx L$.

Cette différence de géométrie s'estompe dès que l'objet brise-vent « s'efface » devant le vent, notamment lorsque la perméabilité de l'écran augmente.

On a pu estimer, dans la gamme de longueur allant de 20 m à 120 m, pour la fourchette de hauteur comprise entre 2,5 m et 10 m et pour des écrans dont la perméabilité (rapport de la surface des trous à la surface

Compte tenu de l'influence de la perméabilité, notamment, l'évolution du sillage immédiat S_3 n'est pas significative en fonction de la hauteur. On peut estimer néanmoins que, dans le cas d'écran strictement opaque et tel que $L \approx \lambda_y$, l'évolution de S_3 est proportionnelle à h .

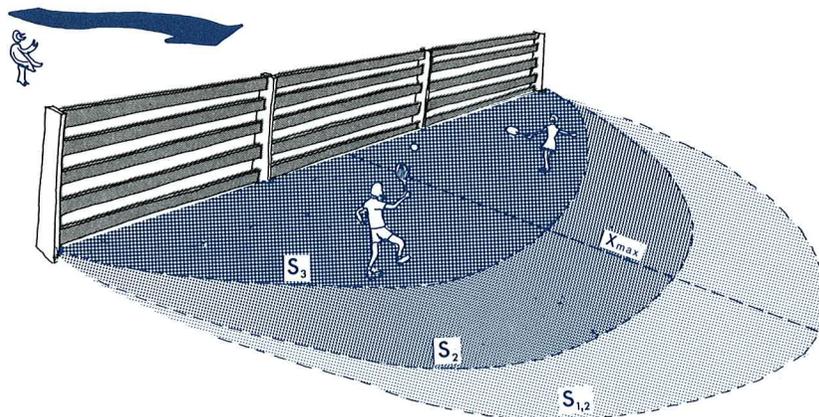
La distance (x_{max}) jusqu'à laquelle l'effet du brise-vent se fait sentir est grossièrement proportionnelle à $h^{0,6}$.

frontale) reste inférieure à 50 %, les tendances suivantes en fonction du niveau de protection cherché :

S_3 proportionnel à $L^{1,5}$

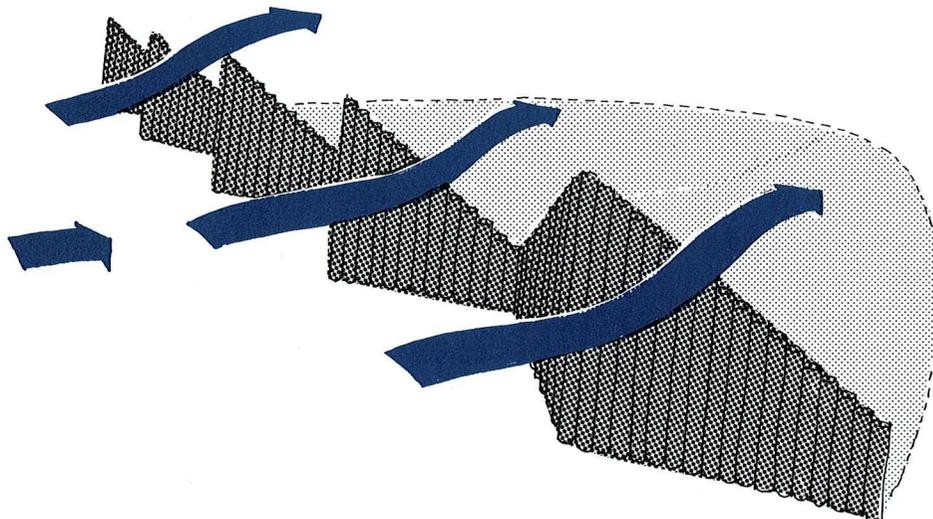
S_2 proportionnel à $L^{1,3} \cdot h^{0,7}$

$S_{1,2}$ proportionnel à $L \cdot h^{0,6}$



Sous l'angle pratique, en gardant en mémoire l'importance de la hauteur et de la longueur sur l'effet de protection, on peut améliorer l'efficacité d'un écran plan *opaque* notamment en lui donnant un linéaire en ligne brisée associé à une crête en dents de scie. Ce principe introduit une dispersion tridimensionnelle du vent, et par là même, une meilleure protection dans le sillage.

Les aires protégées (S) sont accrues par rapport à un écran rectiligne $h = 5$ m et $L = 120$ m d'environ 10 % pour $3,5$ m $< h < 6,5$ m avec un pas tel que 5 m $< l < 20$ m.



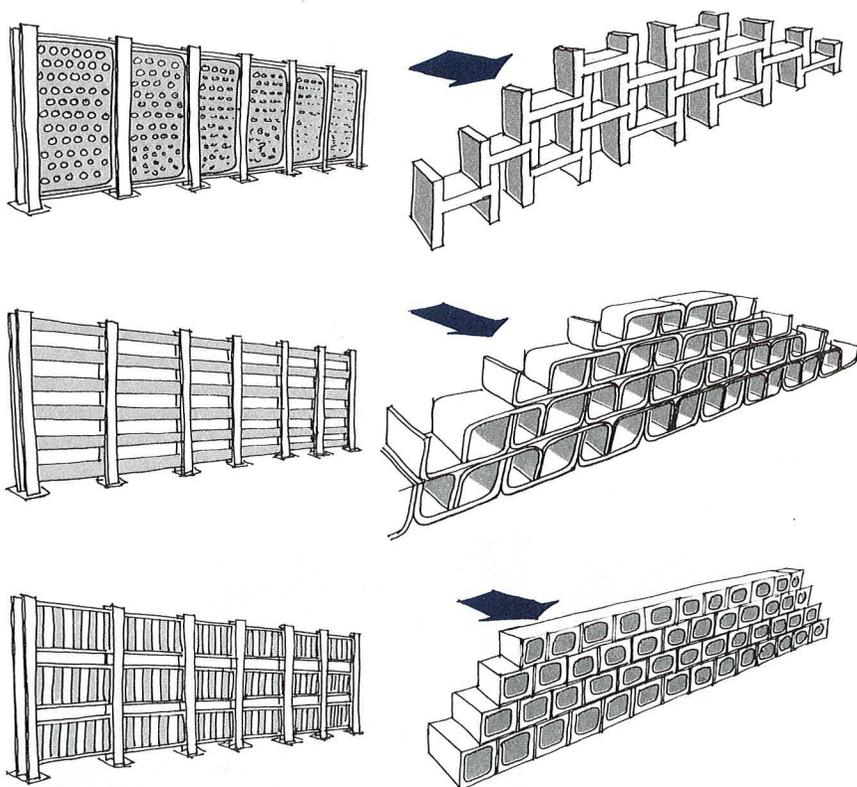
Influence de la perméabilité d'un brise-vent plan mince

Par définition, la perméabilité sera caractérisée par une porosité géométrique

$$\Phi = \frac{\text{surface des trous}}{\text{surface totale}}$$

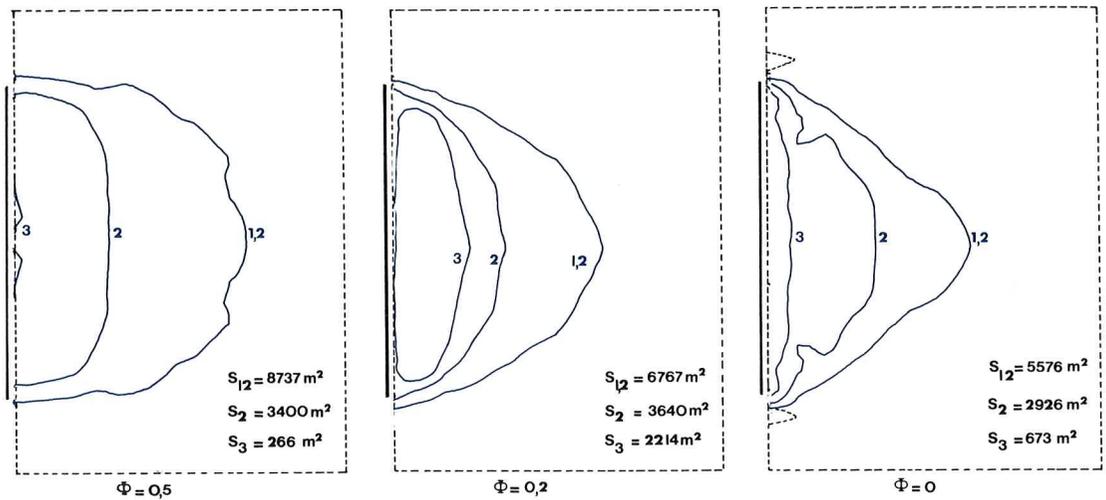
La notion de porosité géométrique Φ ne paraît pas être suffisante en soit : ainsi, des brise-vent de même porosité vont laminer les flux d'air qui les traversent de manière différente suivant les dimensions des trous, leur forme (ajutage) et le type de matériaux utilisés (rugosité interne différente par exemple). De même une haie végétale parfaitement opaque à l'œil induira un sillage totalement différent de celui d'un mur opaque.

Aérodynamiquement, il faudrait introduire les notions de perte de charge (chute de « pression » au passage des orifices) ou de force de traînée (coefficient de résistance à l'écoulement air), mais ces paramètres, aisément accessibles en soufflerie, deviennent très difficilement transposables dans la pratique. Compte tenu du contexte d'application où les contraintes techniques (type de matériaux, etc.) et esthétiques sont très importantes, nous avons conservé la notion simple de porosité géométrique en lui affectant quelques clauses d'utilisation pratique.



Exemples de réalisations d'écrans perméables (porosité géométrique variable)

La perméabilité d'un écran introduit dans son sillage un effet protecteur supplémentaire systématique (en référence au cas opaque).



Exemple de protection obtenue derrière deux écrans perméables soumis à un vent de type campagne ($h = 5$ m et $L = 120$ m) (référence : $\Phi = 0$)

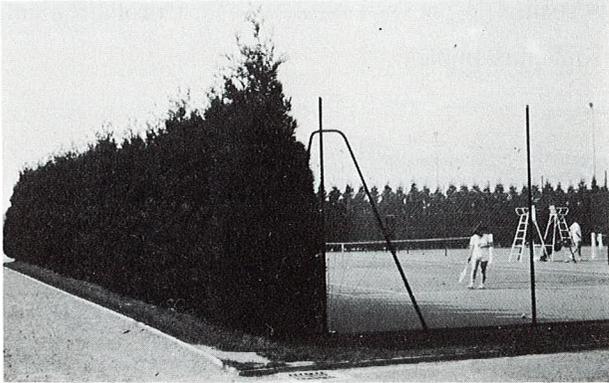
Ainsi, nous pouvons quantifier l'influence de la perméabilité :

- Si l'on recherche un effet de protection modéré sur une superficie maximale ($S_{1,2}$), la porosité géométrique optimale homogène devient environ $\Phi = 0,5$.



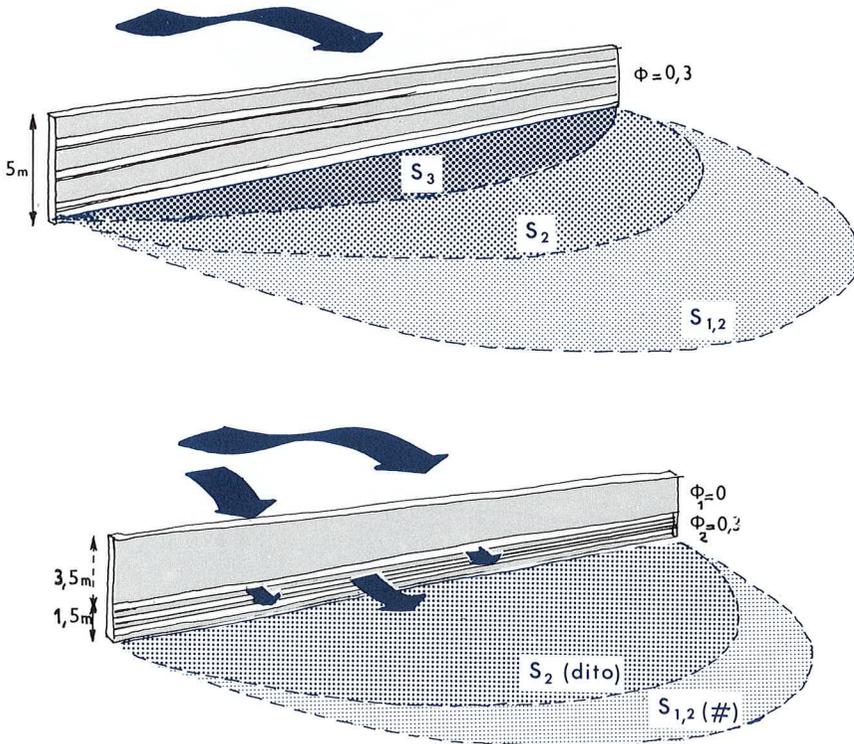
Protection des cultures à l'aide de haies (perméabilité correspondante $\Phi \approx 0,5$)

- Pour une protection poussée (aires correspondant soit à S_2 ou S_3), la porosité géométrique homogène optimale (maximum conduisant à une surface protégée) est obtenue pour $\Phi \approx 0,25$. Au-delà de $\Phi \approx 0,7$ les zones à forte protection n'existent plus ($S_3 < S_3 \approx 0$).



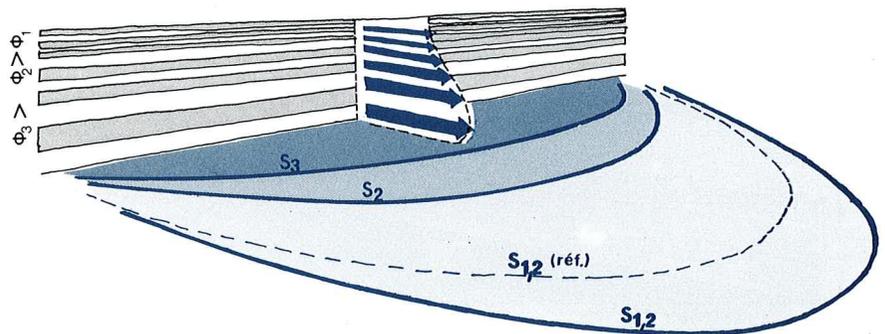
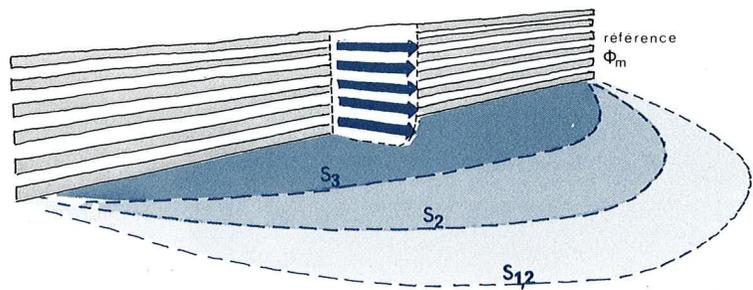
Protection d'un tennis par filet et écran végétal opaque (Φ correspondant $\approx 0,2$)

- Dans le cas des écrans à distribution de porosité non uniforme, la perméabilité en pied de l'écran impose directement le niveau de protection dans le sillage proche (soit de 0 à 10 h).

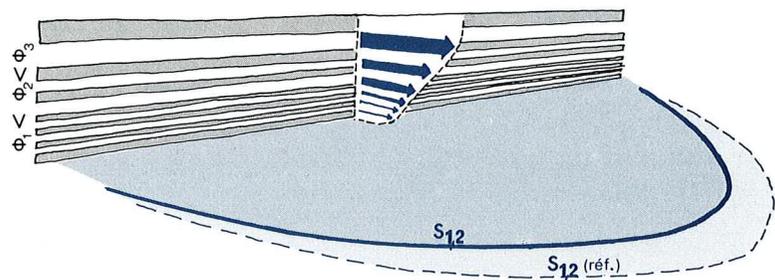


Les aires S_3 et S_2 d'un brise-vent homogène avec $\Phi = 0,3$ sont pratiquement semblables à celles d'un écran opaque dont 1,5 m de la hauteur présente cette perméabilité à partir de la base.

- Une distribution décroissante de porosité géométrique donne une ventilation privilégiée du sillage en pied. Cette dissymétrie introduit toujours un gain notable sur la superficie du sillage lointain $S_{1,2}$ par rapport au cas homogène de porosité ϕ_m égale à la moyenne arithmétique des porosités ($\phi_m = \frac{\phi_1 + \phi_2 + \dots + \phi_p}{p}$). Corollairement, les aires S_3 et S_2 sont plus faibles.



- Une distribution croissante de porosité introduit une réduction systématique de l'aire $S_{1,2}$ par rapport au cas homogène.

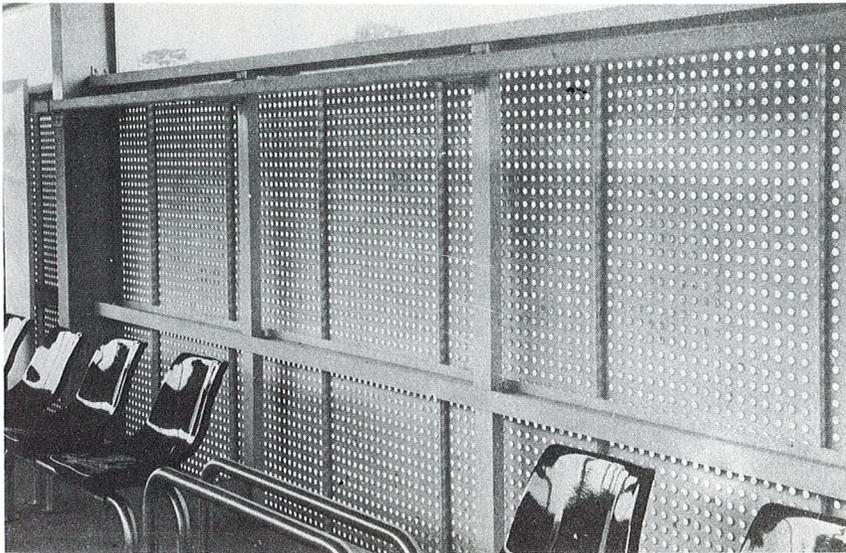


Sous l'angle de l'application, l'emploi d'une distribution variable de porosité géométrique demande un «doigté» aérodynamique indispensable, et la prudence conseille dans la majorité des cas une répartition homogène de la perméabilité.

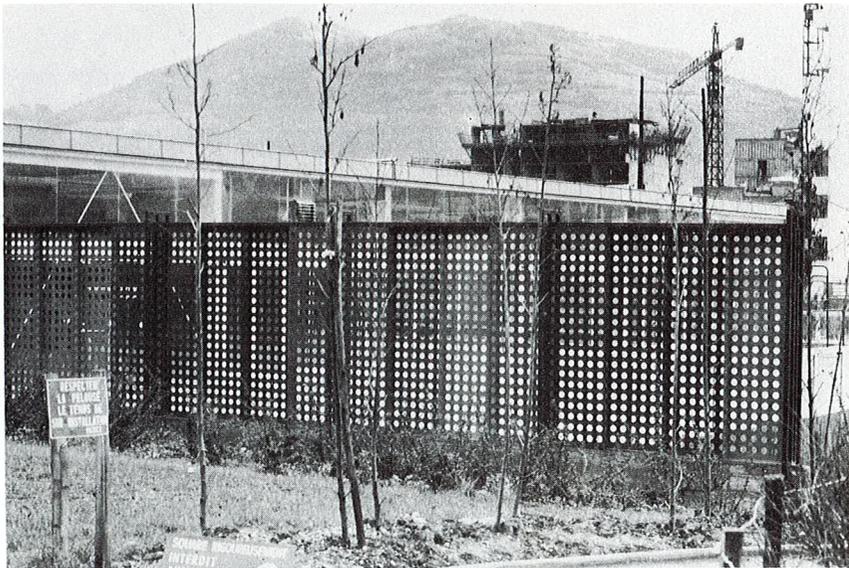
Commentaires pratiques sur la notion de perméabilité

La notion de porosité géométrique utilisée dans notre quantification est sans ambiguïté pour les écrans minces ou de faible épaisseur tels que tôle perforée, filets, grillage, etc. Il est conseillé, néanmoins, de conserver des orifices (trous) dont le diamètre soit *supérieur à quelques millimètres*.

Protection par tôle perforée



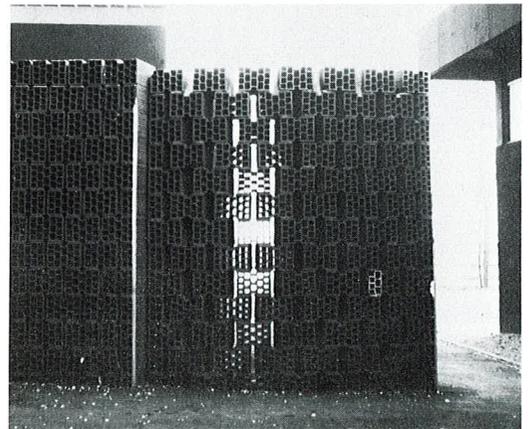
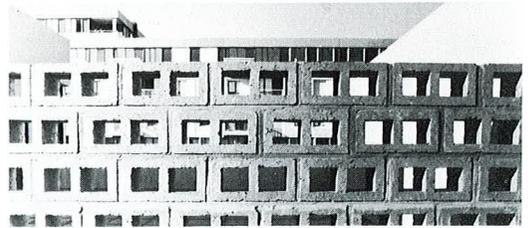
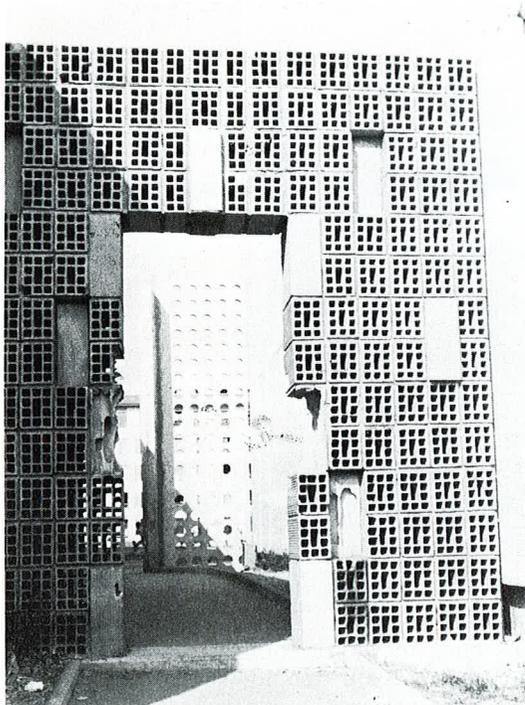
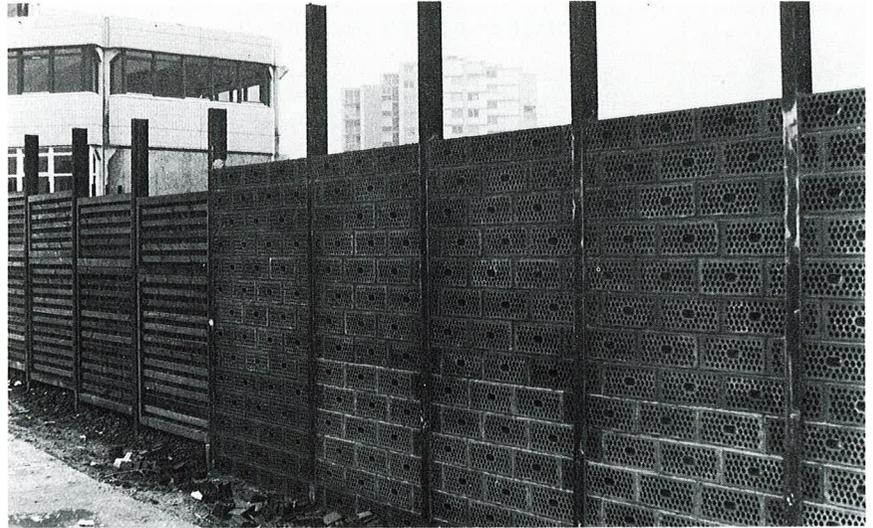
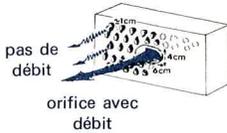
(diamètre 2 cm
 $\Phi = 0,15$)



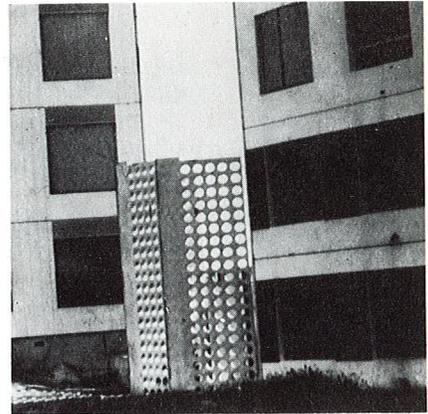
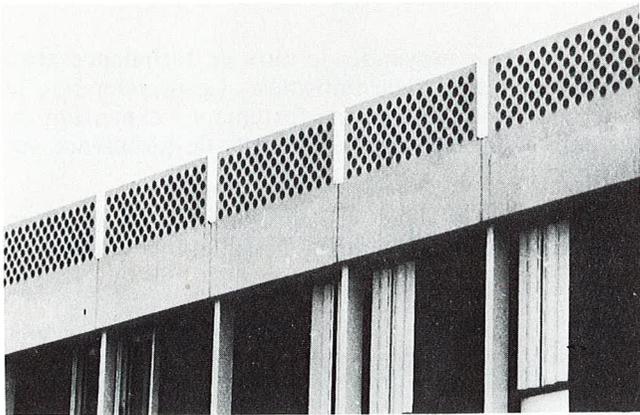
(diamètre 5 cm
 $\Phi = 0,45$)

Pour des matériaux présentant une certaine épaisseur, une dissipation supplémentaire apparaît à l'intérieur de l'orifice (la porosité géométrique effective est réduite), et il faut encadrer la notion de perméabilité de conseils pratiques d'utilisation :

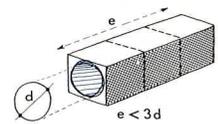
— La perméabilité ne doit pas être constituée par des orifices trop petits et dépend de l'épaisseur du matériau. Ainsi, un trou de 1 cm de diamètre ne débitera pas d'air (équivalent opaque) pour une profondeur (épaisseur du matériau) de l'ordre de 10 cm, sauf si la porosité globale de l'élément écran est telle que $\Phi > 0,3$.



Exemples de briques perméables ou de panneaux béton perméables

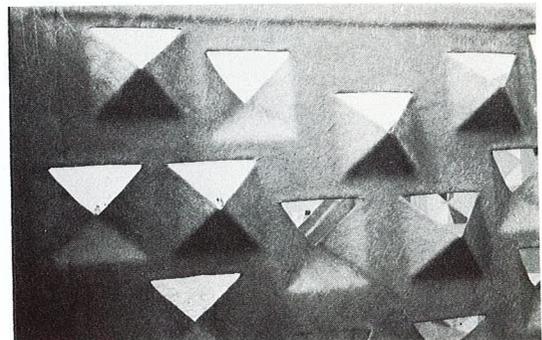
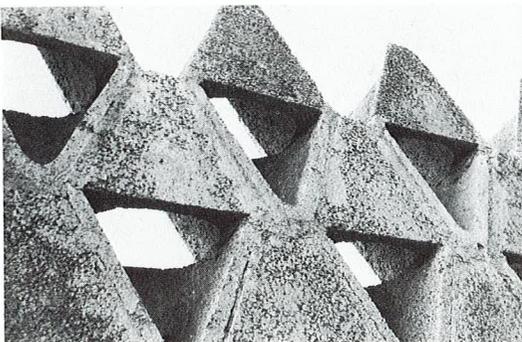


D'une façon générale, la définition de porosité géométrique gardera son sens physique tant que *l'épaisseur du matériau restera inférieure à 3 fois le diamètre du trou*.



Dans le cas de structure épaisse où les orifices ont une profondeur supérieure à 6 fois le diamètre du trou, la porosité géométrique effective du matériau devra être multipliée par un coefficient de l'ordre de 0,6 pour retrouver la porosité équivalent à celle d'un écran plan mince (métal ou filet).

- Pour une porosité globale donnée, la répartition des orifices doit être la plus *homogène possible*. En nous référant au confort de l'utilisateur, il est conseillé de choisir le diamètre des *orifices dans la gamme 2 cm à 15 cm*, avec les limites déjà évoquées pour l'épaisseur.
- Pour des formes d'orifice particulières telles que l'axe du trou n'est plus horizontal, il faudra avoir recours aux aérodynamiciens pour estimer la perméabilité effective.



Trous à axe oblique

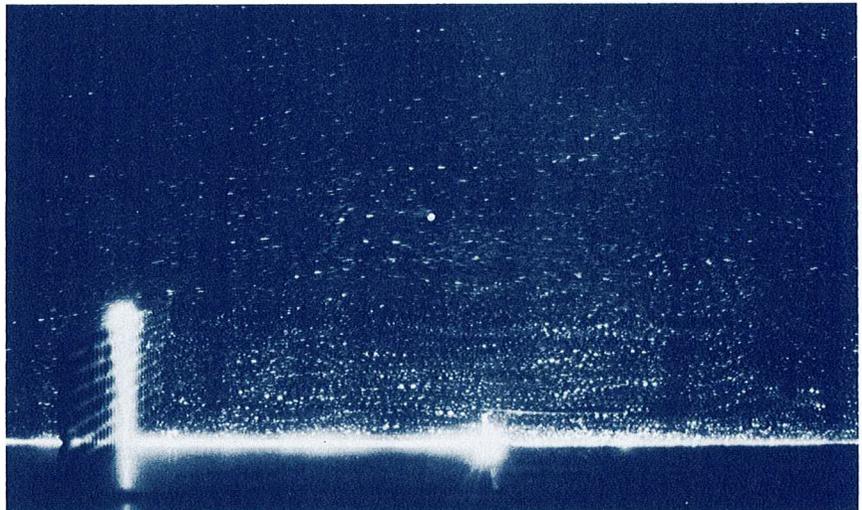
- Dans le cadre de l'écran végétal qui est l'objet d'une analyse spécifique (chapitre V), la porosité géométrique est un « descripteur d'équivalence ».

II-3,2 Influence des caractéristiques du vent amont

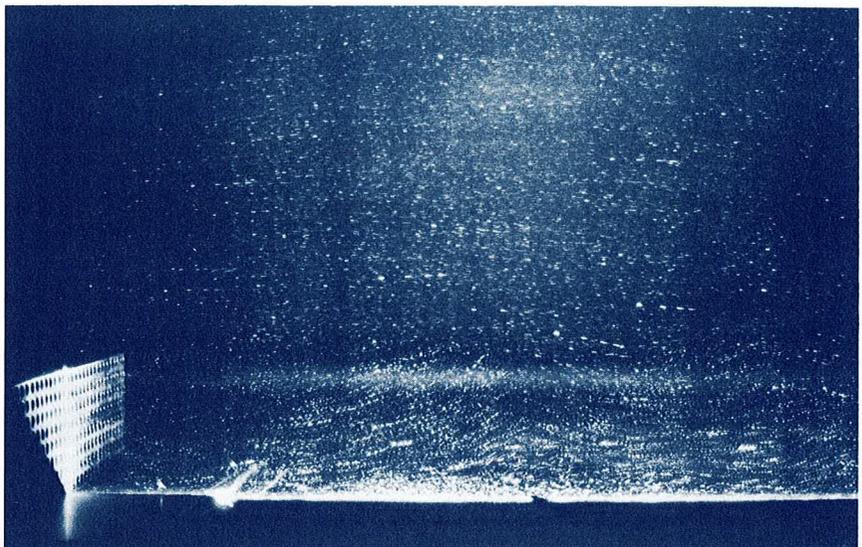
La variation verticale de vitesse moyenne, le taux de turbulence ainsi que l'échelle du vent interagissent avec l'obstacle. Le premier fixe le champ de pression, le deuxième conditionne fortement l'expansion du sillage et nous avons déjà évoqué le rôle de l'échelle de turbulence sur la ventilation du sillage.

Ces exemples mettent bien en avant la nécessité de reproduire correctement, en laboratoire, les caractéristiques du vent naturel si l'on veut pouvoir appliquer à la vraie grandeur les résultats obtenus sur modèle. A une autre échelle, les effets topographiques devront aussi être pris en compte et reproduits.

A titre d'exemple, nous donnons deux visualisations du sillage d'un écran poreux ($\Phi = 0,2$) pour des écoulements d'« agitation » turbulente différente.

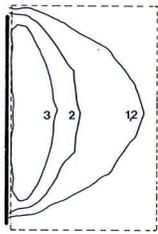


Vent incident
du type campagne

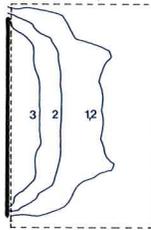


Vent incident
du type ville

Visualisation de l'expansion du sillage derrière un écran poreux ($\Phi = 0,2$) pour différents taux de turbulence



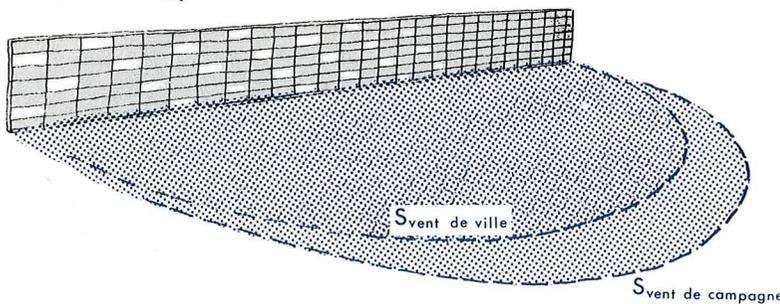
$\Phi = 0,2$
 $S_{1,2} = 6767 \text{ m}^2$
 $S_2 = 3640 \text{ m}^2$
 $S_3 = 2214 \text{ m}^2$ } vent de campagne



$\Phi = 0,2$
 $S_{1,2} = 6244 \text{ m}^2$
 $S_2 = 3036 \text{ m}^2$
 $S_3 = 1800 \text{ m}^2$ } vent de ville

Protections à l'aval d'un écran perméable ($\Phi = 0,2, h = 5 \text{ m}$ et $L = 120 \text{ m}$) pour deux types de vent incident

La nature hautement turbulente du courant incident altère pour partie l'organisation du sillage obtenu dans le cas du vent de campagne, le sillage de l'obstacle se dilue plus vite et, par suite, la protection est réduite. La perte d'efficacité est plus importante dans le sillage proche (S_3 et S_2) que dans le sillage lointain. Globalement, la diminution des aires protégées ($S_{1,2}$, S_2 et S_3) due à l'augmentation du niveau de la turbulence est d'autant plus importante que la porosité géométrique de l'écran est forte.



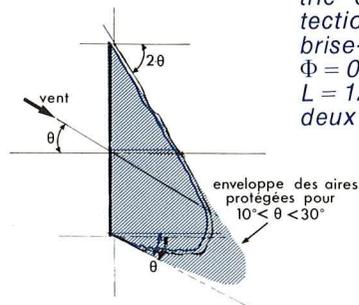
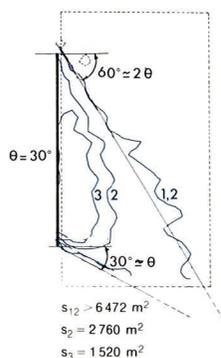
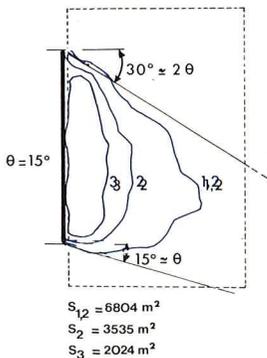
$\Phi = 0,2$
 Réduction de 20 % des aires protégées en vent de ville (par rapport au vent de campagne)

$\Phi = 0,5$
 Réduction de 30 % des aires protégées en vent de ville (par rapport au vent de campagne)

Il faut bien remarquer que nous ne traitons ici que de la réduction d'efficacité d'un écran brise-vent placé en écoulement de ville sous la seule influence des caractéristiques *statistiques* du vent (le paramètre directeur est la turbulence); c'est-à-dire que l'influence de l'environnement proche n'est pas intégrée. Ce point très important fera l'objet d'un développement particulier (paragraphe II-5).

Influence de l'incidence du vent II-3,3

Les aires maximales de protection ($S_{1,2}$, S_2 et S_3) correspondent à l'incidence nulle. Dès que l'incidence s'écarte de la normale ($\theta > 10^\circ$), la déformée des iso-values est grossièrement insérée dans un triangle défini comme ci-dessous :



Exemples de géométrie d'aires de protection derrière un brise-vent poreux $\Phi = 0,2, h = 5 \text{ m}$ et $L = 120 \text{ m}$ pour deux incidences

Le sillage lointain $S_{1,2}$ voit sa géométrie se déformer mais reste relativement constant (tant que $0^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$). Par contre, le sillage proche (S_2 et S_3) est beaucoup plus sensible à l'orientation et évolue grossièrement suivant une loi en $\cos^3\theta$, pour $\theta \leq 30^\circ$.

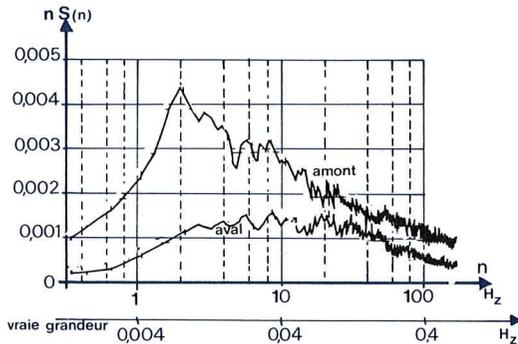
D'une façon générale :

- Plus l'écran sera poreux ($\Phi = 0,5$ par exemple), moins il sera sensible à l'incidence (tant que $0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$);
- Pour les longueurs peu importantes, de l'ordre de 5 à 6 m (soit pour $L \ll \lambda_y$) l'influence de l'incidence détruit très rapidement le phénomène de protection.

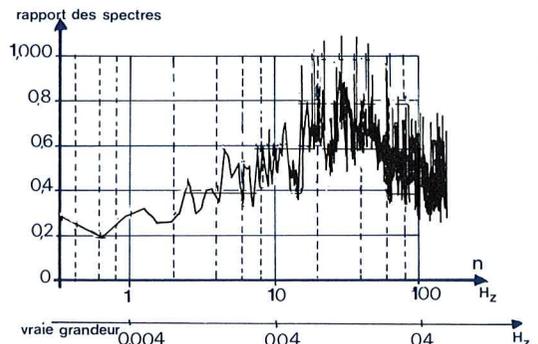
Sous forte incidence ($\theta > 45^\circ$), bien qu'il subsiste encore une petite zone protégée (influence du frottement sur la rugosité brise-vent notamment), on peut estimer que l'écran a perdu sa fonction de brise-vent.

II-3,4 Analyse spectrale des zones protégées

L'étude de la turbulence, à l'aval des dispositifs brise-vent, en terme de répartition d'énergie (densité spectrale $S(n)$) par bande de fréquence (n) conduit aux remarques suivantes :



Répartition de l'énergie turbulente derrière un brise-vent poreux ($z = 1,5$ m, $h = 5$ m, $L = 120$ m et $\Phi = 0,2$) dans les zones où $P \geq 2$



Rapport des spectres devant et derrière le brise-vent

1 Hz = 1 cycle/seconde

Dans la zone à forte protection $P \geq 2$ (S_2 ou S_3) l'atténuation est pratiquement uniforme pour toutes les fréquences jusqu'à 0,05 Hz et légèrement moins marquée au-delà. Le niveau total de turbulence (σ) est réduit de 40 % à 75 % suivant les points. Nous rappelons que, dans cette partie du sillage, la vitesse moyenne locale est réduite d'au moins 50 %. En conclusion, sous l'angle de la réduction des effets dynamiques du vent (turbulence), la limite aval de la zone protégée pourra être assimilée à l'isovaleur $P = 2$.

La zone de sillage pour laquelle la protection vaut $2 < P \leq 1,2$ correspond à une zone de transition : le niveau de turbulence total (σ) reste du même ordre que celui amont, mais il y a atténuation environ jusqu'à 0,025 Hz et amplification due à la présence de l'obstacle brise-vent jusqu'à 0,2 Hz. Cette « perturbation turbulente » est d'autant plus grande que l'obstacle est moins perméable.

Dans le sillage lointain ($P < 1,2$), le spectre de turbulence a retrouvé son état initial amont.

Une analyse similaire a été réalisée derrière les écrans végétaux. Les conclusions sont tout à fait similaires et l'absence dans le spectre de fréquences privilégiées propres à la végétation tend à montrer que la flexibilité de cette dernière *n'intervient pas directement* (évolution de la perméabilité sous la sollicitation vent).

Dans les mesures où aucune fréquence privilégiée n'apparaît de manière significative à l'aval des écrans brise-vent quelque soit leur perméabilité, on ne peut espérer contrôler, par ce type de dispositif, une bande privilégiée de fréquence dans le sillage (par exemple, le plus sensible pour le confort de l'utilisateur) par le jeu d'un maillage à orifice étudié.



Arbre pliant sous la rafale

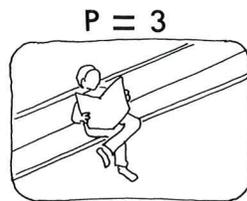
II-4 Bilan : expression empirique des aires protégées

A partir de mesures systématiques des aires protégées (à 1,5 m du sol : $S_{1,2}$, S_2 et S_3) en fonction des caractéristiques du brise-vent « isolé » (sans environnement bâti) et du vent incident, l'expression empirique suivante a pu être établie :

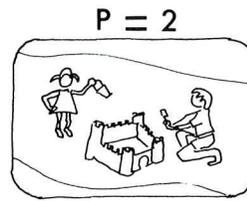
$$S_p = S_o \cdot k_p \cdot C_h \cdot C_L \cdot C_\phi \cdot C_\theta \cdot K$$

avec :

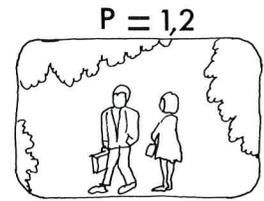
- P l'indice de protection ($P = 1,2$; 2 ou 3 correspond à $S_{1,2}$, S_2 et S_3)
- S_o la surface en m^2 de l'écran (hauteur \times longueur)
- k_p la constante de protection :



$$k_p = 0,6$$

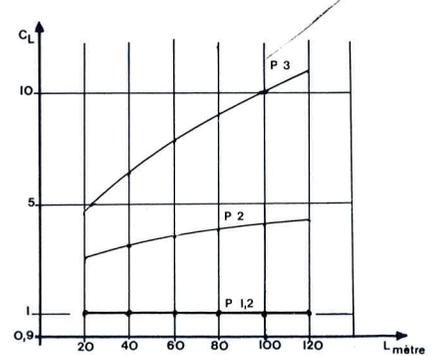
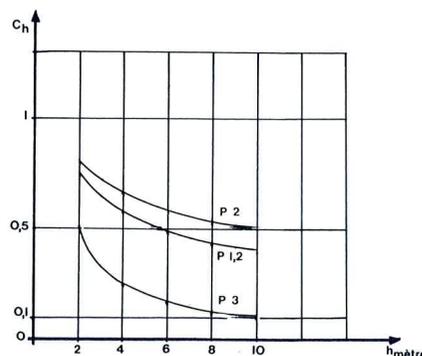


$$k_p = 1,6$$

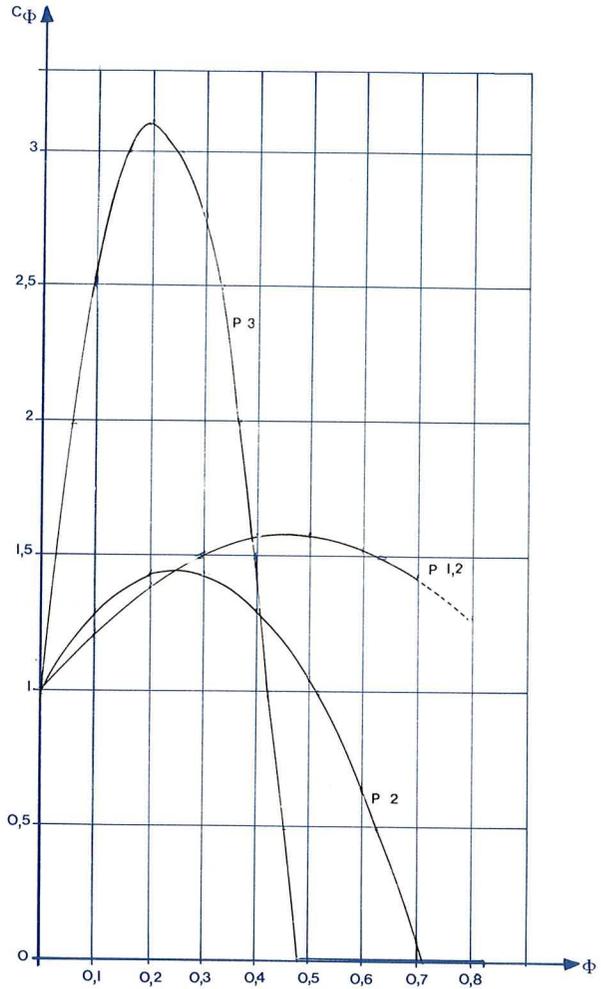


$$k_p = 16,5$$

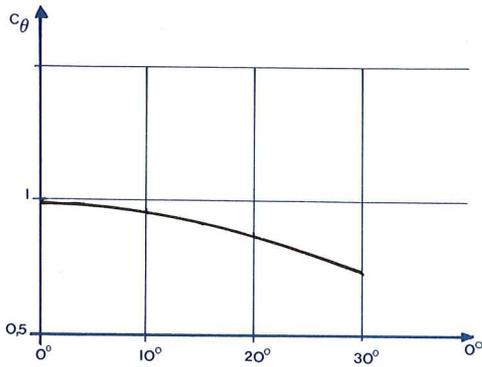
- C_h le coefficient de hauteur dont la variation est fournie par le graphe ci-dessous pour la fourchette $2\text{ m} < h < 10\text{ m}$
- C_L le coefficient de longueur dont la variation est indiquée dans le graphe ci-dessous pour la fourchette $20\text{ m} < L < 120\text{ m}$



— C_Φ le coefficient de perméabilité dont l'évolution dans la gamme de porosité géométrique $0 < \Phi < 0,7$ est donnée dans le graphe ci-contre



— C_θ le coefficient d'incidence dont la course ci-dessous indique l'évolution en fonction de l'indice θ par rapport à la perpendiculaire au brise-vent

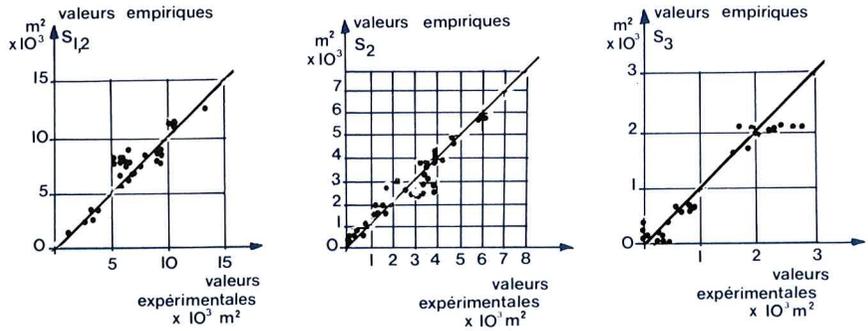


— K le coefficient de site tel que :

Vent incident du type	Porosité moyenne de l'écran Φ_m	K
Rase campagne	quelconque entre 0 et 0,7	1
Zone urbanisée	0,2	0,8
	0,5	0,7

L'expression empirique S_p permet d'approcher à 15 % près $S_{1,2}$, à 25 % près S_2 et à 30 % près S_3 .

La dispersion maximale est obtenue pour S_3 ce qui s'explique par le fait que le sillage immédiat est directement gouverné par la distribution et la géométrie des orifices de l'écran.



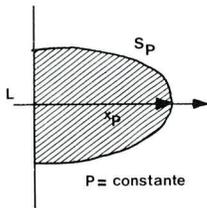
Plus précisément les expressions empiriques $S_{1,2}$, S_2 et S_3 s'expriment sous la forme analytique suivante :

$$\begin{aligned} S_{1,2} &= 16,5 h^{0,6} L(-2,7\Phi^2 + 2,5\Phi + 1) K \\ S_2 &= 1,6 h^{0,7} L^{1,3} (-7\Phi^2 + 3,6\Phi + 1) \text{Cos}^2\theta K \\ S_3 &= 0,6 L^{1,5} (-47\Phi^2 + 20\Phi + 1) \text{Cos}^2\theta K \end{aligned}$$

avec les limites sur h , L , Φ , θ et les valeurs de K identiques à celles du paragraphe ci-dessus.

$$\text{Si } \Phi \geq 0,7 \text{ alors } S_2 = 0$$

$$\text{Si } \Phi \geq 0,5 \text{ alors } S_3 = 0$$



Nous avons déjà mentionné que la géométrie des aires S_p sous incidence perpendiculaire du vent ($\theta = 0$) est très grossièrement assimilable à une demi-ellipse dont l'un des axes est le brise-vent

Afin d'aider l'utilisateur, on peut estimer par *défaut* la demi-longueur de l'autre axe x_p , la valeur de S_p ayant été calculée au préalable :

$$x_p \geq \frac{4S_p}{L\pi}$$

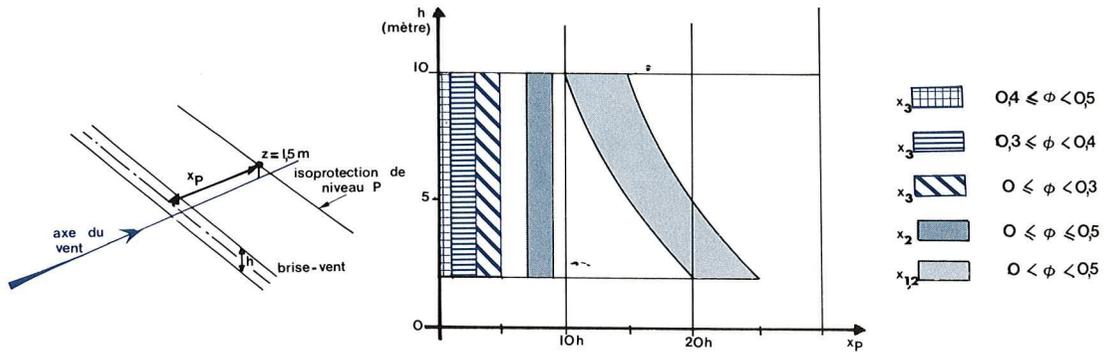
Pour des incidences $\theta \neq 0$, nous renvoyons au paragraphe II-3 pour le tracé des géométries des aires protégées.

Cette approche est réaliste tant que $L > 40$ m (soit $L > \lambda_y$). Pour une longueur équivalente ou inférieure, l'expression ci-dessus continue à s'appliquer uniquement pour x_2 et x_3 . Pour $x_{1,2}$ il faut alors réduire la valeur calculée de 30 %. Dans ce dernier cas, la ventilation transversale du sillage est très marquée, ce qui atténue l'effet de protection.

Dans le cas de protection de voies de circulation (autoroutes, canaux) pour lesquelles des linéaires importants ($L \gg 120$ m) de brise-vent peuvent être nécessaires, nous avons estimé la distance aval (perpendiculairement à l'écran) jusqu'à laquelle un niveau de protection P se faisait sentir.

Nous avons évalué alors trois distances $x_{1,2}$, x_2 et x_3 pour divers types de perméabilités et de hauteurs de brise-vent soumis perpendiculairement à un vent du type campagne.

Les *ordres de grandeur* fournis (graphe ci-contre) *restent indicatifs* et ont été rattachés arbitrairement à la hauteur de l'obstacle brise-vent.



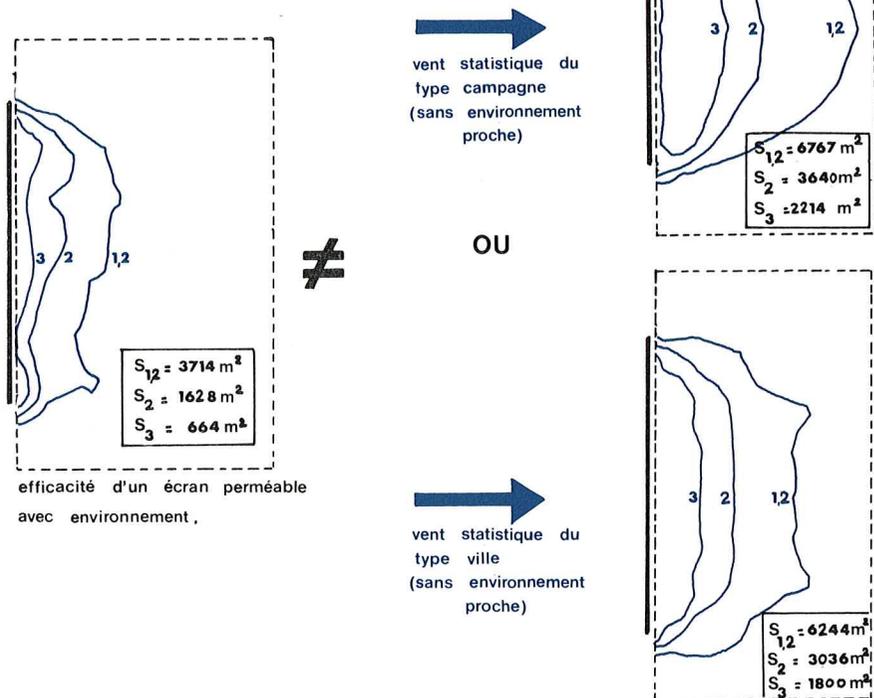
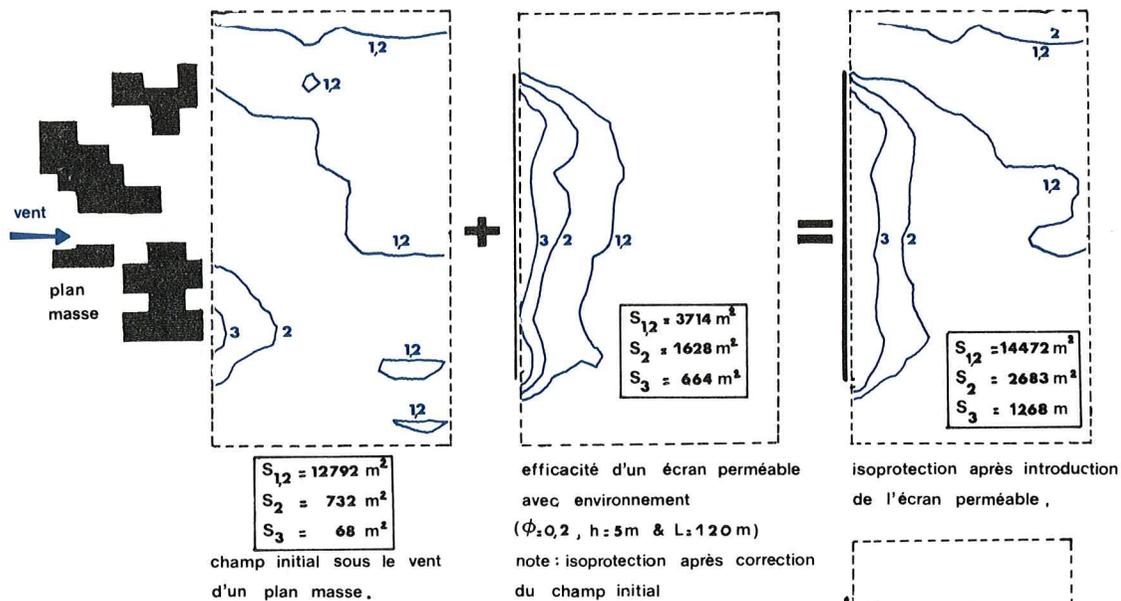
Application au contexte urbain : influence de l'environnement immédiat **II-5**

L'estimation des aires protégées a été réalisée dans le cas de brise-vent isolés, sans environnement proche, en présence d'un vent statistique (campagne ou ville); c'est-à-dire qu'aucun sillage ou effet de masque particulier n'est venu altérer le fonctionnement du brise-vent.

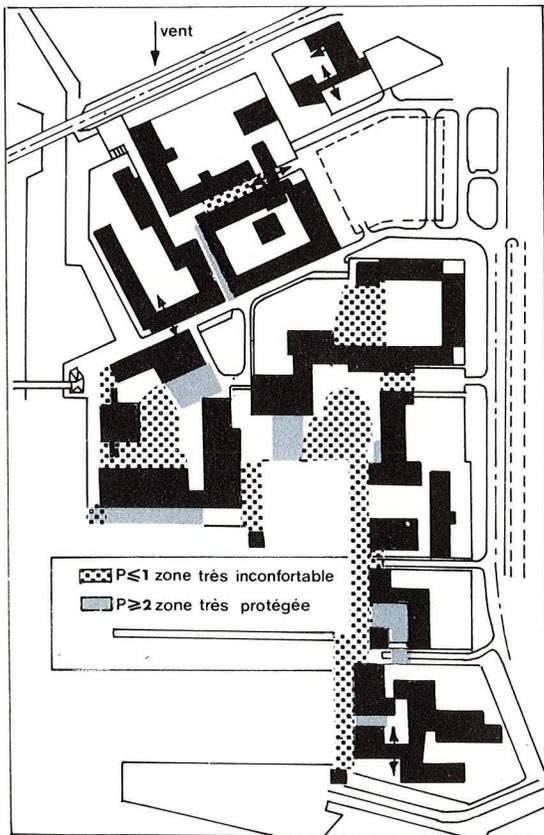
Au cœur ou sous le vent d'un plan masse, les caractéristiques de l'écoulement alimentant le brise-vent vont être dépendantes du vent mais aussi de l'environnement immédiat qui se combine avec la *présence même* de l'écran.

On constate que la protection derrière un brise-vent placé en champ de vitesse et de turbulence très hétérogène voit son efficacité diminuer. Ainsi le sillage immédiat S_3 peut être réduit de 70 %, le sillage proche S_2 de 55 % et le sillage lointain $S_{1,2}$ de 45 % par rapport aux résultats obtenus derrière le même obstacle en vent de type campagne. Or, dans cette perte d'efficacité, on ne peut expliquer qu'une réduction de 20 % (coefficient de site K) pour la nature du vent devenue statistiquement du type ville (voir paragraphe II-2). En conséquence, la réduction des aires protégées derrière un brise-vent en zone urbaine est fortement marquée par l'environnement immédiat.

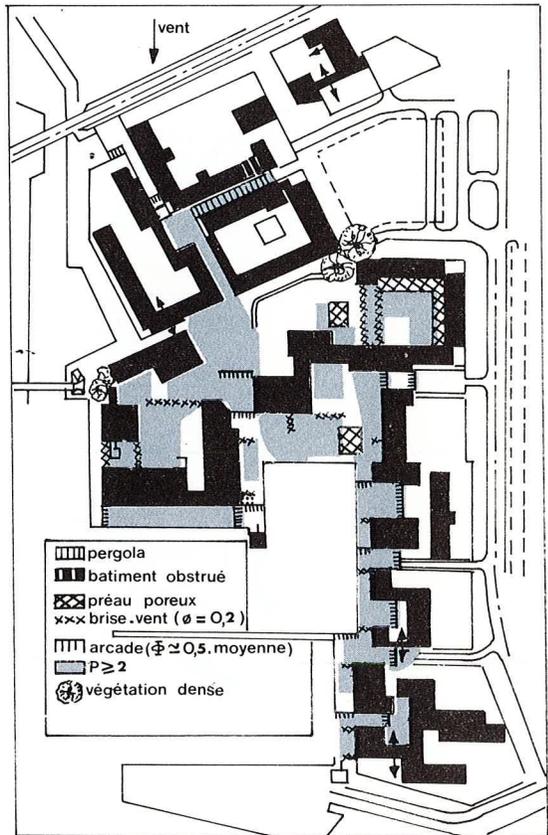
Il faut cependant remarquer que la perte d'efficacité de l'écran brise-vent n'est pas uniforme et qu'elle est d'autant plus faible que le niveau de vent est élevé, donc par conséquent que l'on a vraiment besoin du brise-vent.



Ainsi les écrans déjà présentés (ou une interprétation aérodynamique de ceux-ci) pourront être utilisés avec succès dans le contrôle d'ambiance climatique comme l'illustre l'exemple pratique ci-dessous.

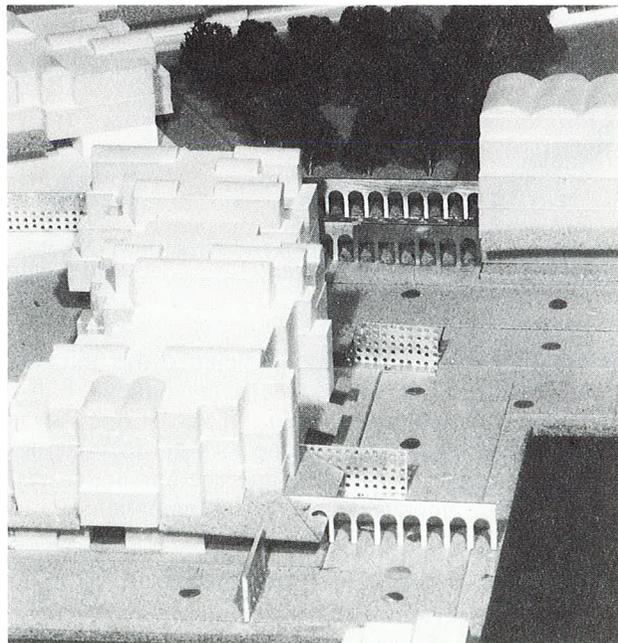


Bilan initial



Bilan final avec brise-vent

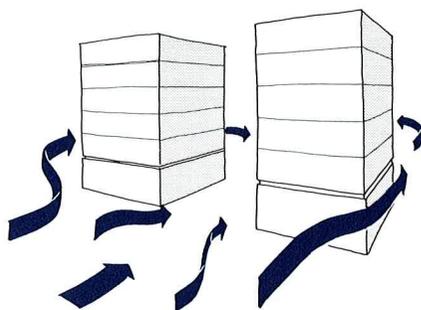
Répartition des zones à faible et forte protection avant et après traitement du plan masse



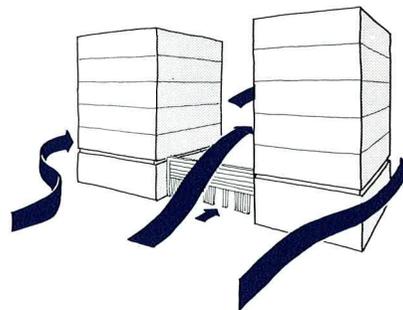
Maquette soufflerie au 1/200

En conclusion, bien que marqués par la présence de l'environnement immédiat, les écrans brise-vent peuvent introduire des protections notoires. Il est difficile, compte tenu de la complexité des problèmes que pose le contrôle des microclimats dans les ensembles bâtis (dispositions de bâtiments, niveau de l'anomalie à traiter et son échelle, considérations fonctionnelles, esthétiques ou technologiques, etc.) de donner des conseils pratiques généraux. Il faudra avant tout conserver en mémoire deux principes :

- Privilégier la protection d'un secteur conduit généralement à la détérioration d'un autre (où le problème du confort ne se pose pas forcément dans les mêmes termes).

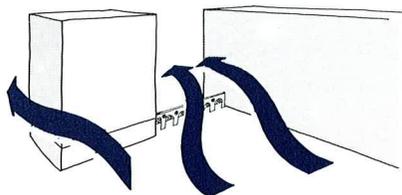


Avant traitement-accélération de coin

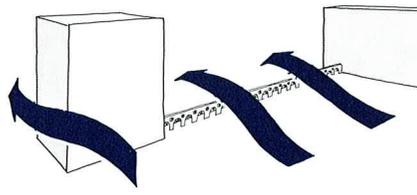


Après traitement-anomalies de coin accrues

- Plus la zone est exposée ou l'anomalie aérodynamique élevée, plus l'efficacité relative de l'action du brise-vent sera grande.



Rendement élevé du brise-vent



Rendement faible du brise-vent

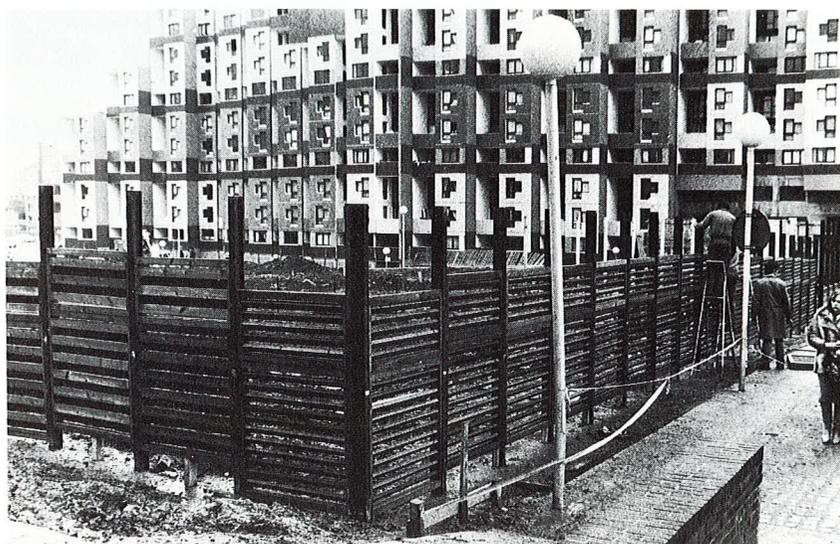
Il est clair que l'utilisation judicieuse des interventions brise-vent (ou contrôle des écoulements) dans les milieux bâtis demande une expérience aérodynamique certaine, d'autant que, sur un principe donné, on peut trouver pratiquement une infinité de variantes d'exécutions. Dans ces démarches, on ne peut que recommander vivement une symbiose étroite entre aménageurs et aérodynamiciens.

Enfin, si une optimisation poussée est envisagée ou si une forte protection est recherchée ou encore si la résolution efficace d'un accident aérodynamique est demandée, il est indispensable de travailler sur modèle et d'avoir recours à une étude spécifique en soufflerie.

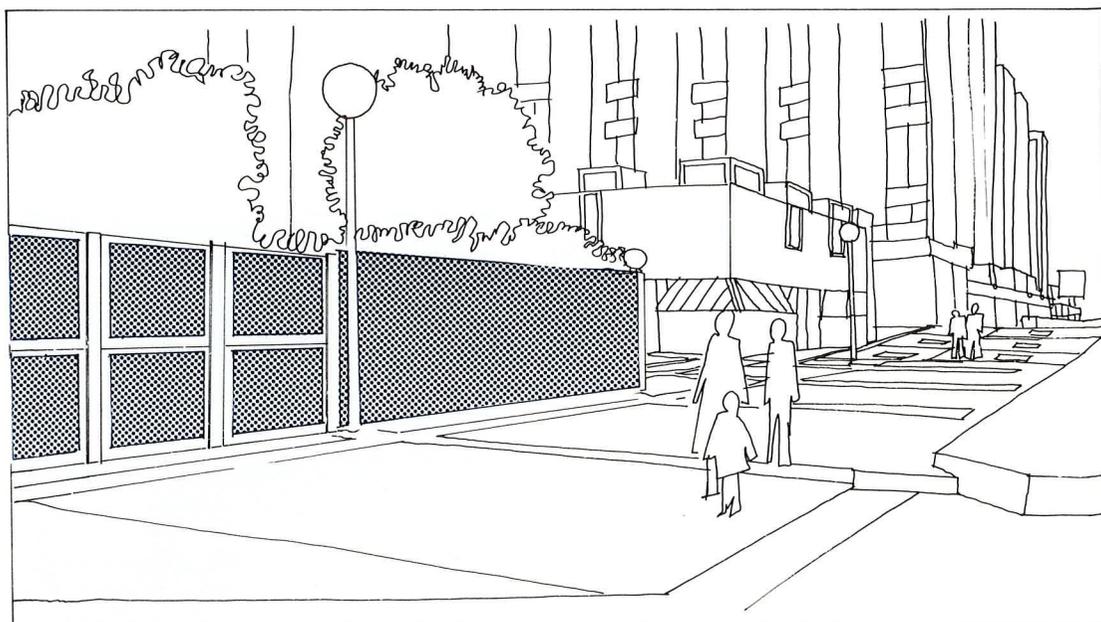
Exemple pratique : vérification en vraie grandeur de l'efficacité de divers écrans brise-vent II-6

Dans le cadre du contrôle de l'ambiance climatique des voies de circulation pédestre, le CSTB et l'EPALÉ*, on réalise une expérimentation en vraie grandeur sur l'efficacité de plusieurs types d'écrans perméables de porosité géométrique (ou estimée porosité équivalente) comprise entre 0,2 et 0,35.

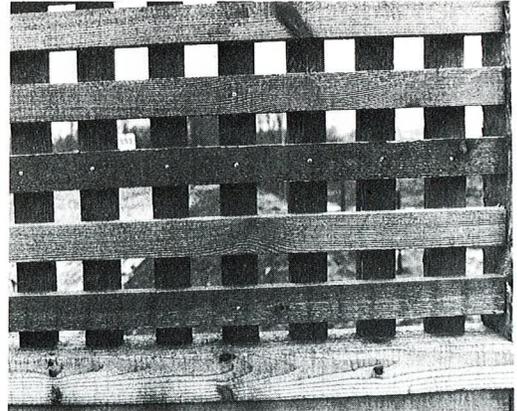
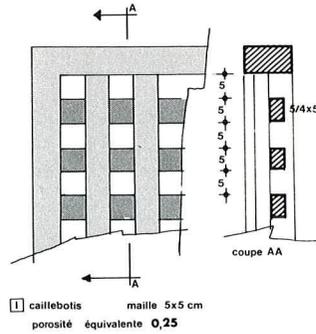
* Établissement Public d'Aménagement de la ville nouvelle de Lille-Est



Le site expérimental (vent incident peu perturbé par l'environnement bâti)

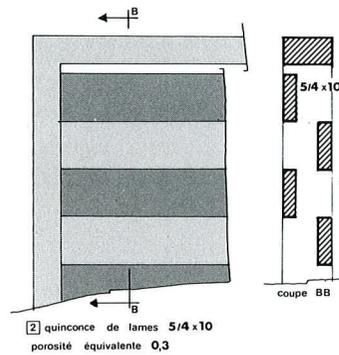
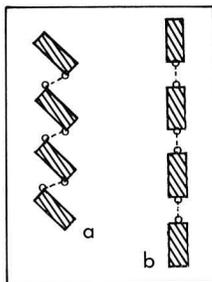


Ces écrans étaient constitués (hauteur 2 m) de caillebotis en bois ou de lames parallèles inclinées ou en quinconce.



Écran caillebotis
 Φ équivalent $\approx 0,2$

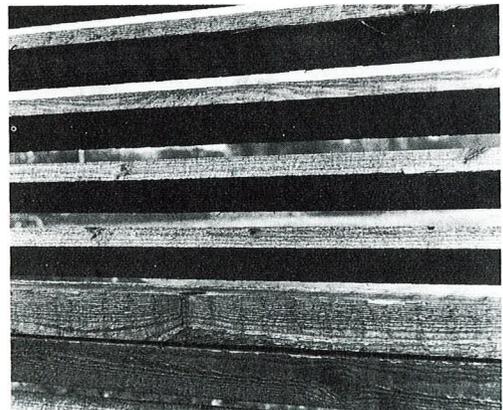
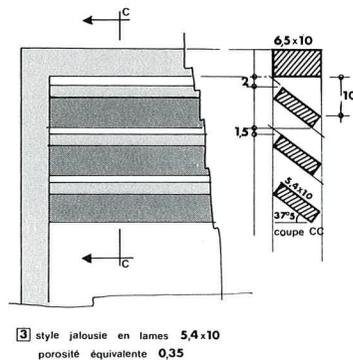
La porosité équivalente est une notion très grossière qui se calcule en « dépliant » en plan le brise-vent comme si des liaisons fictives existaient entre deux lames successives.



Écran à lames en quinconce
 Φ équivalent $\approx 0,3$

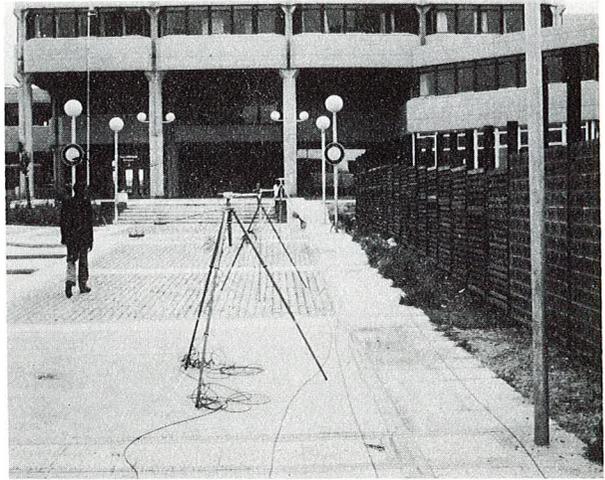
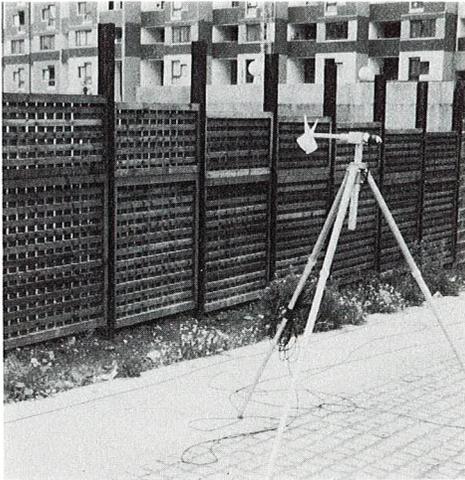
a Liaisons virtuelles entre les lames
 b Écrans « déployés » permettant de calculer la porosité équivalente

Écran « déployé »



Écran à lames inclinées
 Φ équivalent $\approx 0,35$

Les mesures ont confirmé la qualité des pressions obtenues sur modèle en soufflerie : la géométrie des isovalues de protection $P = 2$ et $P = 3$ sont rigoureusement identiques derrière l'écran en caillebotis et derrière le grillage fin utilisé sur la maquette et de porosité géométrique 0,2.



Mesures anémométriques sur le site

De même, x_3 correspond dans les deux cas à 5 h (mesure aval sur l'axe central du brise-vent).

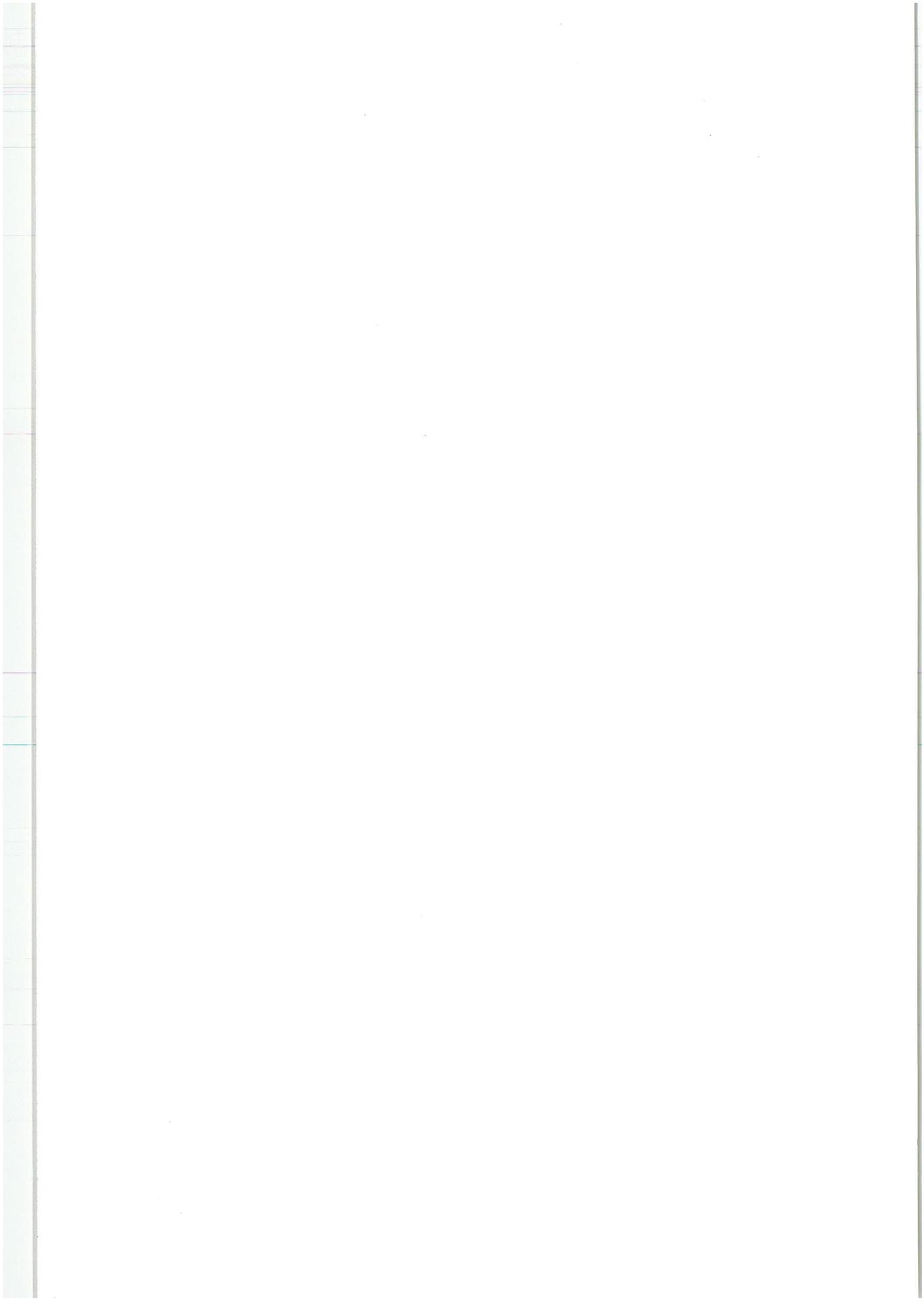
L'isovaleur $P = 1,2$ n'a pas pu être déterminée de manière suffisamment précise en vraie grandeur (manque de points de mesure notamment).

Les mesures réalisées derrière les écrans à lames donnent, en comparaison avec l'écran à caillebotis, des protections pratiquement identiques (S_2 et S_3) sauf pour l'écran à lames inclinées où la surface S_3 se trouve réduite de 15 % (et X_3 passe de 5 h à 3 h).

La perception de protection derrière un mur en briques de perméabilité géométrique inférieure à 0,1 est ressentie rigoureusement de la même manière que celle obtenue à l'aval d'un mur. Il est à remarquer que la brique utilisée présentement a une majorité d'orifices de diamètre 1 cm environ et que nous avons vu au paragraphe II-3.1.2 le mauvais fonctionnement d'une telle perméabilité.

Au niveau de l'impression ressentie (après enquête) les usagers préfèrent nettement la protection obtenue derrière le dispositif à caillebotis. Deux raisons peuvent être avancées comme explication :

- La perméabilité optimale pour une protection poussée derrière un écran plan est relativement « pointue » et se situe à 0,20. Ce résultat est en plein accord avec les conclusions aérodynamiques déjà présentes.
- La protection doit être aussi homogène que possible et avoir des orifices ou mailles de dimensions relativement petites (5 cm \times 5 cm) vis-à-vis du corps humain.



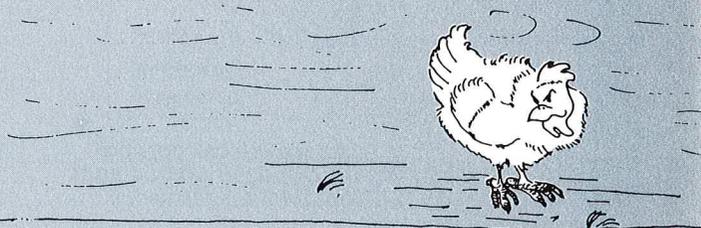
association de brise-vent

III

association de brise-vent
plan poreux **1** 78

association
de structures tridimensionnelles
pour une protection moyenne **2** 81

association d'obstacle
ou de rugosité **3** 83



III-1 Association de brise-vent plan poreux

III-1,1 Dispositions optimales pour une protection poussée

Dans certaines conditions, la protection est accrue par le jeu de l'interaction de plusieurs brise-vent poreux.

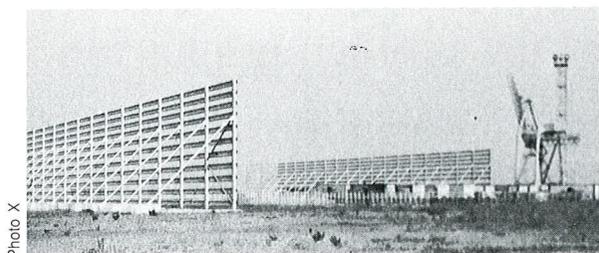


Photo X

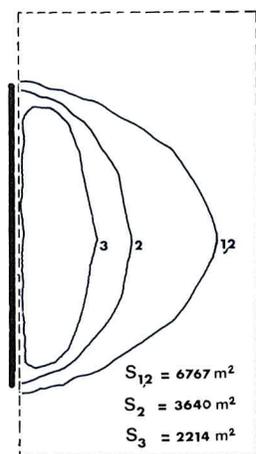
Association d'écrans perméables (structures en palanches) Port autonome de Fos-sur-Mer



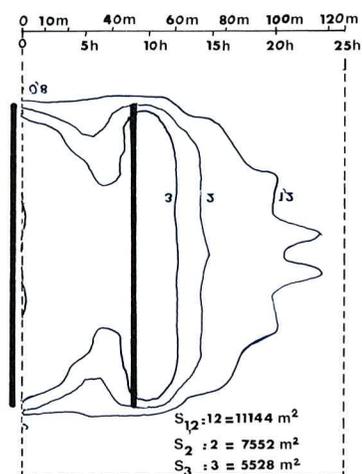
L'optimisation du « système » de plusieurs écrans poreux résulte d'une combinaison entre les taux de perméabilité, leur évolution d'un écran à l'autre et les espacements correspondants.

La recherche systématique d'une *protection poussée*, dans le cas de deux écrans poreux plans parallèles soumis à un vent de type campagne, conduit aux conclusions suivantes :

- la perméabilité optimale déjà évoquée correspond à $\Phi = 0,2$;
- dans la gamme des dimensions $L = 120$ m et $h = 5$ m, l'interaction est maximale pour un espacement compris entre 8 et 10 h.



Les isovaleurs derrière un dispositif unique sont indiqués en référence



Isoprotection derrière deux brise-vent poreux ($h = 5$ m, $L = 120$ m, $\Phi = 0,2$) espacés de 9 h

Cette brochure est réalisée et éditée par le

**CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT
(PARIS)**

Les recommandations et conseils pratiques contenus dans ce guide sont fondés pour l'essentiel sur les études faites depuis 1976 par la Division Aérodynamique du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (Établissement de Nantes - chef de centre : Jacques Bietry).

Ces études ont été menées avec la participation effective de Jacques Gandemer, chef de division, Guy Barnaud, Gérard Grillaud, Henri Maille, ingénieurs, Henri Alaïme, Françoise Cardinal, Claude Ortion, Jacky Mary, techniciens supérieurs, Joël Dahler, technicien, Marie-France Barnaud, dessinatrice, Jacqueline Migot, secrétaire.

Les recherches sur la mise en œuvre des écrans végétaux et l'analyse des choix pratiques des brise-vent ont été réalisées par Alain Guyot, architecte du Groupe Ambiance Bioclimatique de Marseille, de même que l'expression architecturale des illustrations.

préface

Lorsqu'on analyse l'habitat et son environnement du point de vue de son vécu et de son organisation, on peut relever plusieurs sujets de réflexions.

Tout d'abord, il est le résultat momentané d'un tissu de relations qui s'est créé à partir de considérations politiques, sociales, culturelles, économiques et également climatiques. De ce dernier point de vue, l'empreinte des données climatiques est plus ou moins forte suivant les régions.

En région méditerranéenne, par exemple, le souci de capter le soleil en hiver, de s'en protéger l'été, d'une part, ainsi que d'assurer des espaces extérieurs abrités du mistral, d'autre part, influe directement sur le confort des usagers. Le rôle joué par ces facteurs est souvent de caractère modifiant, parfois de caractère déterminant dans la qualité du cadre de vie.

Il suffit pour cela d'observer la façon dont s'est organisé l'habitat traditionnel. Nous y remarquons des espaces largement ouverts au sud, donc vers le soleil, et également très fermés au nord, le dos tourné au vent ; les logements y ont peu d'ouverture, des haies d'arbres viennent renforcer la protection recherchée.

Ce simple constat n'est pas fait dans une optique passéiste et affective, mais il permet de faire ressortir l'impact réel de ces particularités climatiques locales car, en ce temps-là, l'utilisateur avait une prise directe sur la production de son habitat et n'y intégrait que l'essentiel d'un savoir acquis et transmis par plusieurs générations.

Aujourd'hui, qu'en est-il de ce souci d'adapter l'habitat aux contraintes du climat et notamment aux effets du vent ? L'éclatement du tissu urbain, produit d'une pensée fonctionnaliste, l'apparition des immeubles de grande hauteur, la pauvreté du traitement des espaces publics ont bien souvent eu pour résultats d'aggraver et d'amplifier les excès du climat : accélération du vent à l'angle des bâtiments, tourbillons et rafales entre deux constructions.

Ces effets accidentels du vent perturbent le bon développement des activités de l'homme au point d'engendrer une gêne plus ou moins permanente, voire même de mettre en cause sa sécurité (renversement d'un piéton par effet de surprise).

Nous ne pouvons que remettre à sa juste place cette préoccupation du phénomène vent présente :

- au niveau du génie civil pour ce qui concerne les efforts sur les structures ;
- au niveau de l'agriculture au sujet du rendement de la production agricole ;
- au niveau de la thermique du bâtiment sur les questions relatives à la perméabilité des façades et au renouvellement d'air sauvage ;
- au niveau de l'habitat à propos de la qualité microclimatique des espaces extérieurs.

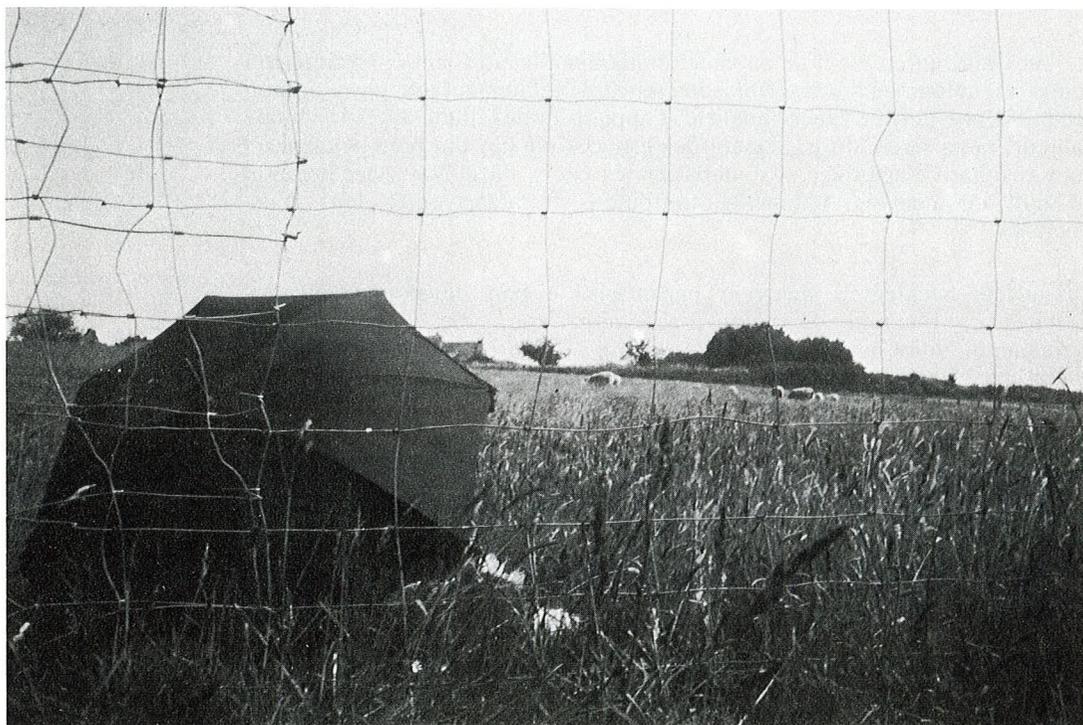
Sur ce dernier point, un document de synthèse, fruit d'une collaboration entre aérodynamiciens et architectes, a permis de faire le point sur les écoulements particuliers du vent en milieu bâti et de formuler des conseils pratiques sur la forme et la disposition des bâtiments, afin d'éviter que celui-ci ne représente une gêne ou un danger pour le piéton.

Cependant, pour des raisons diverses, il n'est pas toujours possible d'optimiser les effets de protection recherchés grâce aux constructions. Dans certains cas, les contraintes d'urbanisme ne permettent pas de disposer, comme on le souhaiterait, les bâtiments; dans d'autres cas, l'intervention n'est faite qu'au sens d'un environnement déjà existant (réhabilitation des espaces, par exemple), aménagement des accès et de l'esplanade d'un espace public en centre ville. Pour cela, il faut avoir recours à des aménagements localisés complémentaires, permettant de contrôler, sur des surfaces limitées, les effets du vent.

C'est pourquoi il est apparu indispensable de rédiger aujourd'hui un nouveau document montrant clairement les moyens de traitement possibles de protection du vent par les systèmes brise-vent et leurs dérivés.

Cet ouvrage est destiné à tous ceux qui ont une part de responsabilité dans l'aménagement de l'espace, notamment aux architectes et paysagistes, afin de les aider dans l'exercice de leur profession et d'aiguiser leurs réflexes par rapport à ces problèmes. Car c'est à eux qu'en définitive incombe la mise en forme des besoins élémentaires à satisfaire.

*A. GUYOT, architecte
Groupe ABC Marseille*



LA PROTECTION CONTRE LE VENT

AÉRODYNAMIQUE DES BRISE-VENT
ET CONSEILS PRATIQUES

Étude réalisée par

Jacques GANDEMER
ingénieur aérodynamicien
CSTB Nantes

Alain GUYOT, architecte
Groupe Ambiance Bioclimatique, Marseille

Juin 1981

Diffusion :
CENTRE SCIENTIFIQUE ET
TECHNIQUE DU BATIMENT



4, avenue du Recteur-Poincaré
75782 Paris Cedex 16

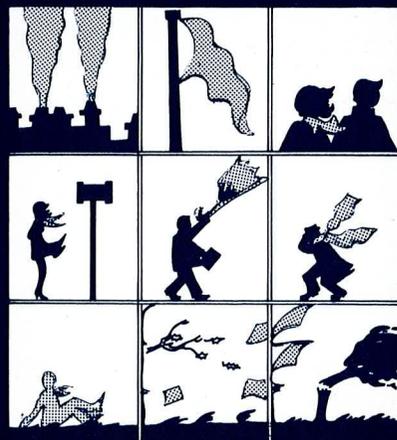


Magnum photo

table des matières

introduction		9
le vent et les ambiances climatiques	I	11
contrôle du vent à l'échelle locale : aérodynamique des brise-vent	II	39
association de brise-vent	III	77
dispositifs particuliers	IV	89
les brise-vent végétaux	V	103
autour des brise-vent	VI	117
conclusion	VII	127
bibliographie		128

**INTEGRATION
DU PHENOMENE VENT
DANS LA CONCEPTION
DU MILIEU BATI**



Auteurs
Jacques Gandemer
et Alain Guyot

Diffusion
La Documentation
Française
31, quai Voltaire
75340 Paris Cedex 07

CSTB
4, avenue du Recteur-
Poincaré
75782 Paris Cedex 16

introduction

L'ambiance dans les espaces extérieurs est gouvernée par un certain nombre de facteurs. Le vent est un des paramètres climatiques dont les manifestations conditionnent grandement le désagrément ressenti par l'homme.

La force du vent et son caractère turbulent peuvent être amplifiés par la disposition des constructions. Lorsque l'intégration du phénomène vent n'a pu être réalisée à la genèse d'un projet, il faudra trouver une méthode d'intervention et pouvoir fournir des moyens pratiques de contrôle des écoulements vent.

Pour des raisons d'échelle spatiale, l'action seule des brise-vent reste relativement moindre qu'une optimisation complète des masses bâties. Néanmoins, les interventions des brise-vent contribueront de manière très importante au contrôle des ambiances climatiques et permettront d'éviter les accidents aérodynamiques.

Outre l'optique du confort des espaces extérieurs, les actions de protection contre le vent sont fondamentales et particulièrement efficaces dans leur contexte d'application au génie civil.

Dans le cadre de ce travail, nous n'évoquerons pas les démarches d'optimisation aérodynamique des plans masses et renverrons au « guide méthodologique et conseils pratiques sur l'intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti ».

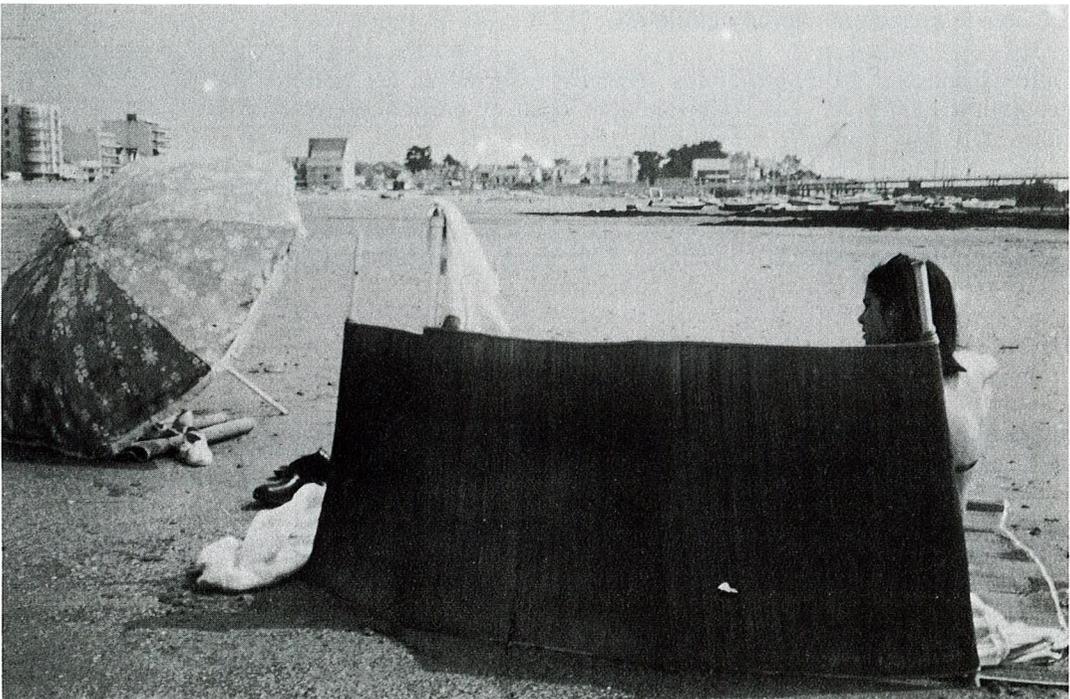
Le but du présent ouvrage est donc de fournir aux urbanistes et aux architectes et paysagistes, les moyens pratiques d'intervenir sur l'écoulement vent en présence de l'environnement construit ou non, et de quantifier l'effet de protection en fonction des caractéristiques du vent, de la nature de l'intervention et de son domaine d'application.

Les conseils fournis dans l'ouvrage sont directement opérationnels dans la majorité des environnements faiblement bâtis. Une légère adaptation aérodynamique est nécessaire dans le cadre de secteurs fortement urbanisés. Enfin, si un traitement poussé est recherché, la compréhension et le contrôle des phénomènes d'interaction entre le vent, les bâtiments et les éléments brise-vent, imposeront alors une étude spécifique sur modèle en soufflerie reproduisant le vent naturel.

Les résultats présentés reposent sur des recherches du CSTB entreprises depuis 1976 sous la tutelle du ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie. Les études aérodynamiques ont été essentiellement conduites en soufflerie, reproduisant les caractéristiques statiques et dynamiques du vent naturel. Les prévisions ont été confirmées sur le terrain lors de campagnes de mesures à partir de programmes d'urbanisation particuliers ou de programmes d'essais sur des structures expérimentales. Enfin, les écrans végétaux ont fait l'objet d'une démarche entièrement en vraie grandeur.

Afin de donner à cet ouvrage un caractère volontairement opérationnel, nous nous sommes efforcés de trouver un langage graphique et d'illustrer la majorité de nos propos par des exemples concrets intégrant même des démarches de génie civil ou d'esthétisme.

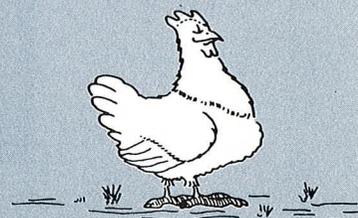
J. GANDEMER
ingénieur aérodynamicien
CSTB Nantes



le vent et les ambiances climatiques

I

les caractéristiques du vent	1	12
contournement des constructions par le vent	2	23
notion de nuisance due au vent	3	27
notion de fréquence de nuisance vent	4	30
facteurs affectant la fréquence de nuisance vent	5	31
estimation de la fréquence de nuisance vent	6	34



Ce chapitre consiste essentiellement en un rappel sur le phénomène vent et la notion d'inconfort associé.

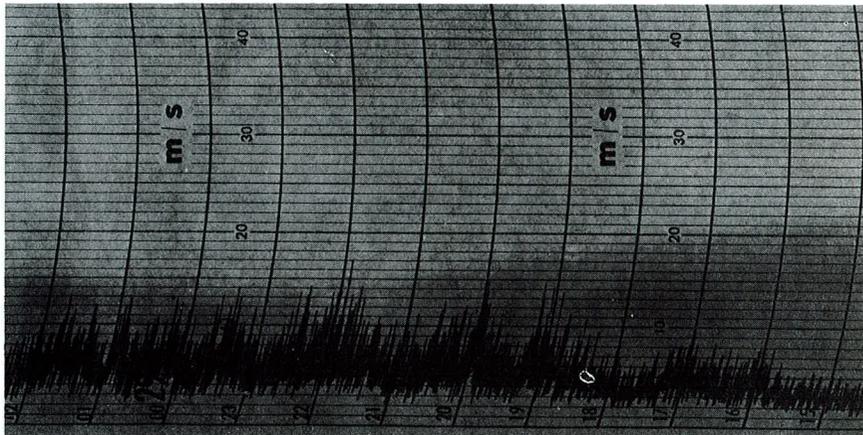
I-1 Les caractéristiques du vent

La gamme des fluctuations de vitesse pour laquelle l'homme a la sensation d'une turbulence correspond à des sauts de vitesse dans la gamme de temps de 1 à 10 secondes. Au-delà, le corps humain considère que le niveau global a changé et la notion « d'agitation » est estompée.

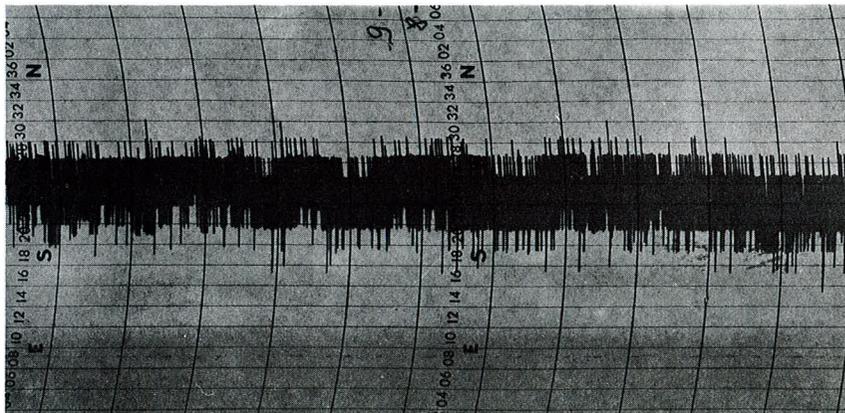
Le vent est un écoulement qui tend à équilibrer les zones de pressions différentes dans l'atmosphère.

Dans les basses couches (0 à 300 m environ), la rugosité du sol (végétation, constructions, etc.) induit des forces de frottement qui réduisent la vitesse moyenne \bar{U} du vent avec création d'une « agitation importante » ou turbulence.

Localement, la vitesse du vent va varier en grandeur et direction.

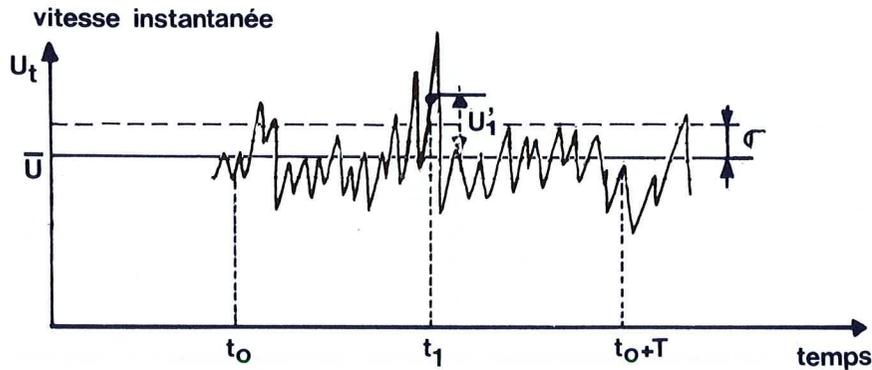


Enregistrement de la vitesse instantanée (m/s = mètre/seconde) du vent en fonction du temps (en heure)



Enregistrement de la direction instantanée (N = Nord, E = Est, S = Sud, W = Ouest) en fonction du temps (en heure)

L'écoulement turbulent vent peut être décrit par la superposition d'une vitesse moyenne \bar{U} (valeur surlignée) sur une période T assez longue (10 minutes par exemple pour les enregistrements météorologiques) et d'une vitesse fluctuante fonction du temps :



L'écart-type, homogène à une vitesse, est la racine carrée de la moyenne (valeur surlignée) sur la période T du carré des fluctuations de vitesse :

$$\sigma = \sqrt{\bar{U'^2}}$$

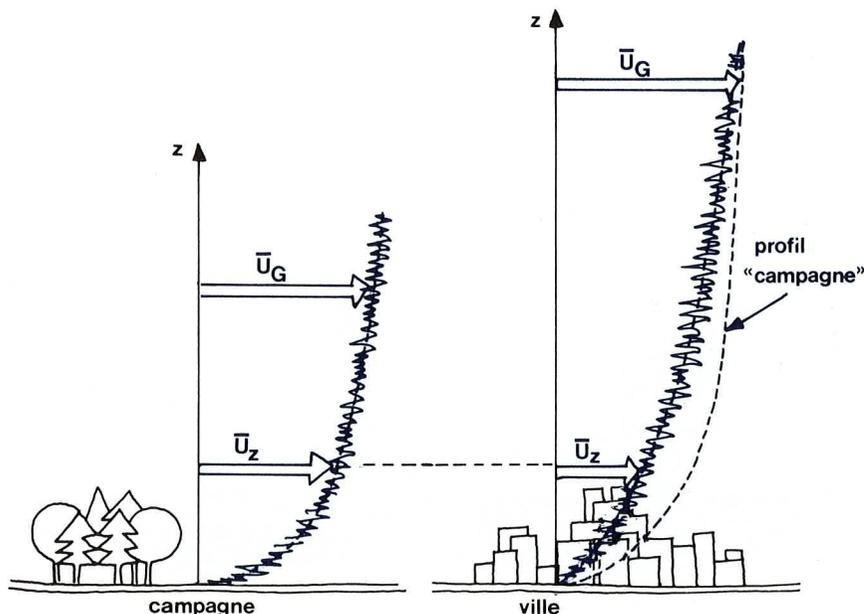
Par définition, il y aura autant de fluctuations de vitesse de part et d'autre de la valeur moyenne, c'est-à-dire que la moyenne sur la période T des fluctuations de vitesse est nulle $\bar{U}' = 0$.

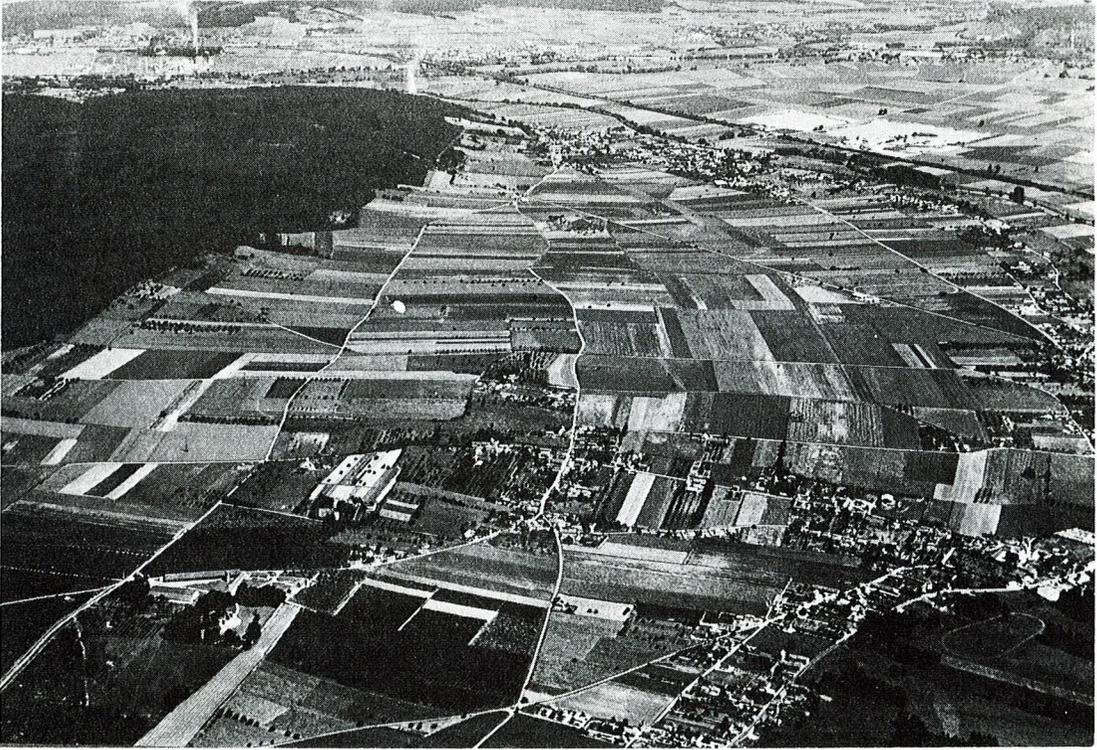
La pointe de la vitesse \bar{U} sur la période T vaut approximativement $\bar{U} + 3,5\sigma$.

La vitesse du temps t_1 vaut U_1 et s'écrit alors : $U_1 = \bar{U} + U'_1$

La turbulence, c'est-à-dire la dispersion de la vitesse autour de sa valeur moyenne, est caractérisée (sur la période T) par l'écart-type σ .

La vitesse moyenne du vent varie avec la hauteur z (d'où la notation \bar{U}_z), la rugosité du sol et la topographie éventuelle des sites.





Rugosités de classe II : ruse campagne

A la même hauteur z , la vitesse moyenne \bar{U}_z est plus grande dans un site de faible rugosité (exemple : campagne) que dans un site à rugosité plus forte (exemple : ville).



Rugosités de classe V : centre des grandes villes

Pour quantifier le phénomène vent et notamment sa force, on utilise une vitesse moyenne de référence \bar{U}_{ref} . Par convention, cette vitesse est prise à 10 m au-dessus du sol, en site plat et à faible rugosité (exemple : campagne).

Une autre référence serait la «vitesse du gradient» (\bar{U}_G) non perturbée par l'effet de rugosité ou de topographie. Cette donnée reste difficilement accessible en vraie grandeur.

En général, la vitesse de référence \bar{U}_{ref} correspond à la vitesse mesurée à la station météo $\bar{U}_{météo}$.

Parfois $\bar{U}_{météo}$ est très différent de \bar{U}_{ref} dans le cas où sa mesure est effectuée à une hauteur $z > 10$ m (exemple : sur un phare) ou dans un site à topographie marquée (exemple : Falaise du Cap de la Hève au Havre) ou encore dans le sillage d'obstacles bâtis (hangars d'un aéroport) ou sous le vent d'une forte urbanisation (exemple : Le Bourget est sous le vent de Paris). En conséquence, cette station doit être considérée comme uniquement représentative du secteur de son implantation. L'utilisation des données statistiques de cette station pour un autre lieu de construction (même proche) nécessitera un recalage climatique (mesure des coefficients de passage entre le site et la station météo pour tous azimuts).



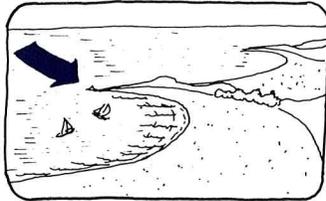
Station météo (CSTB Nantes)

La variation de la vitesse moyenne \bar{U}_z avec la hauteur et la rugosité peut être décrite par un modèle logarithmique :

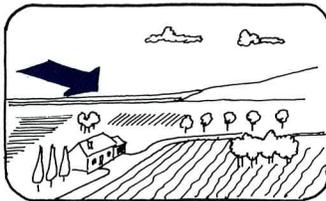
$$\bar{U}_z = k \bar{U}_{ref} \text{Log}_e \frac{z}{z_0} = C_z \bar{U}_{ref}$$

où z_0 est le paramètre de rugosité (différent de la géométrie de la rugosité). Il varie de quelques millimètres pour un vent venant de la mer à quelques mètres pour un vent de zone urbaine. Le coefficient k est fonction de la rugosité.

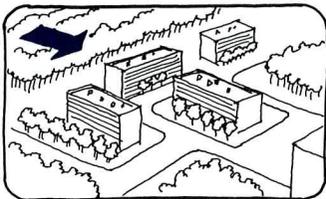
Pour les applications, il a paru suffisant de définir cinq classes de rugosité :



Classe I : océan - grand lac



Classe II : rase campagne (station météo)



Classe III : bocage, banlieue



Classe IV : zone urbaine



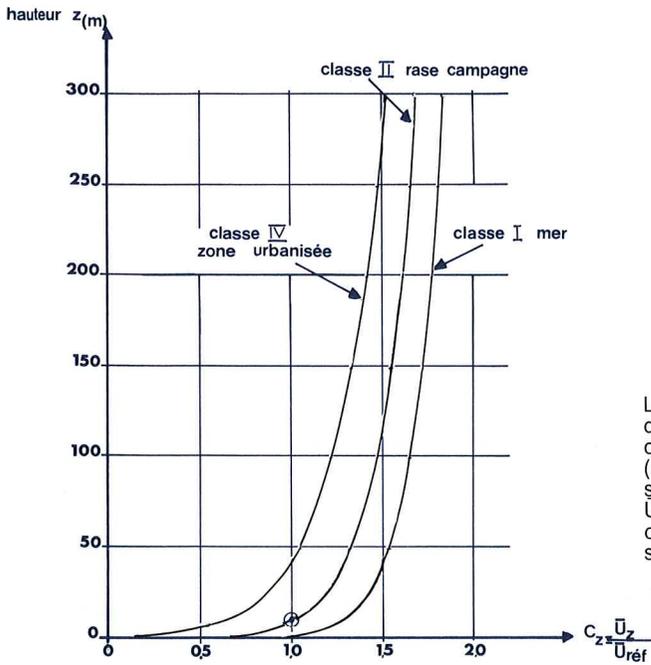
Classe V : centre des grandes villes

Le modèle logarithmique précédent n'est applicable qu'aux cas où le site présente une rugosité homogène sur plusieurs kilomètres. Dans le cas de changement de rugosité, les mécanismes de transition sont connus de manière imparfaite et les modèles théoriques proposés restent incertains.

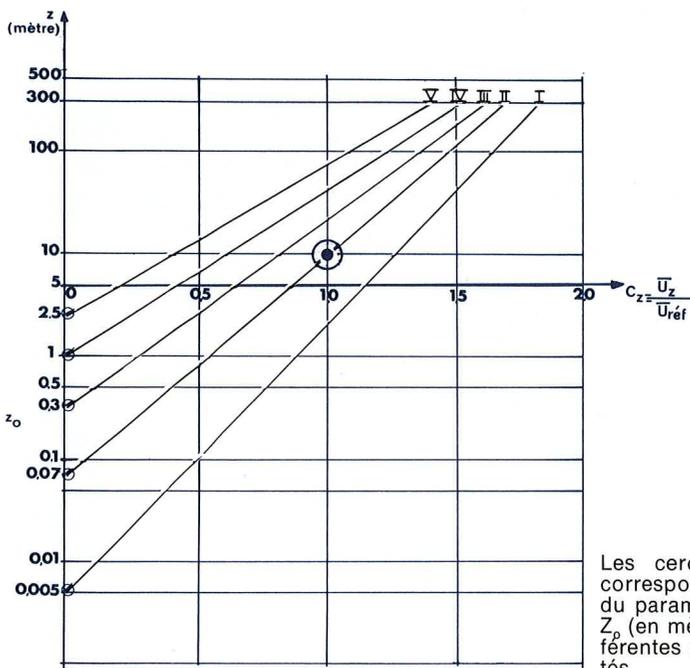
Les valeurs numériques de k et z_0 correspondant à ces classes de rugosité sont indiquées dans le tableau suivant :

classe de rugosité	I	II	III	IV	V
z_0 (en m)	0,005	0,07	0,03	1	2,5
k	0,166	0,202	0,234	0,266	0,292

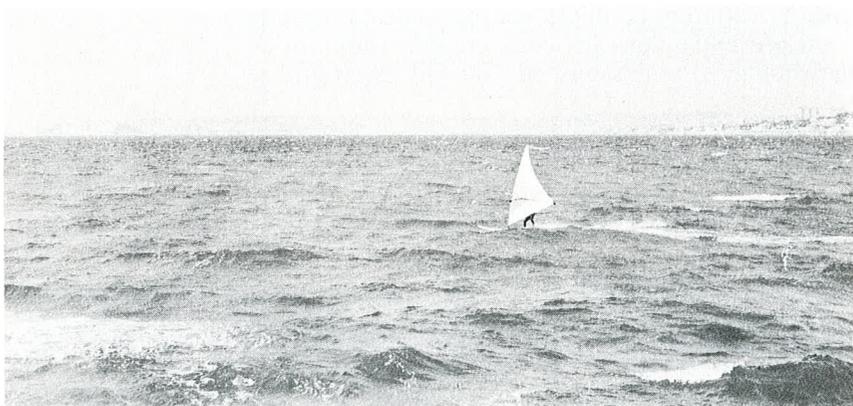
L'illustration pratique de la variation de la vitesse moyenne \bar{U}_z avec la hauteur et la rugosité est présentée dans les deux graphes (dont un en coordonnées semi-logarithmiques) ci-dessous où l'on fait apparaître le coefficient de hauteur et rugosité $C_z = \frac{\bar{U}_z}{\bar{U}_{ref}}$.



Le point entouré d'un cercle correspond aux conditions de référence ($z = 10$ m ; site plat ; rugosités de classe II ; d'où $U_z = U_{ref}$). En général, ces conditions sont celles des stations météorologiques



Les cercles sur l'axe z correspondent aux valeurs du paramètre de rugosité Z_0 (en mètres) pour les différentes classes de rugosités

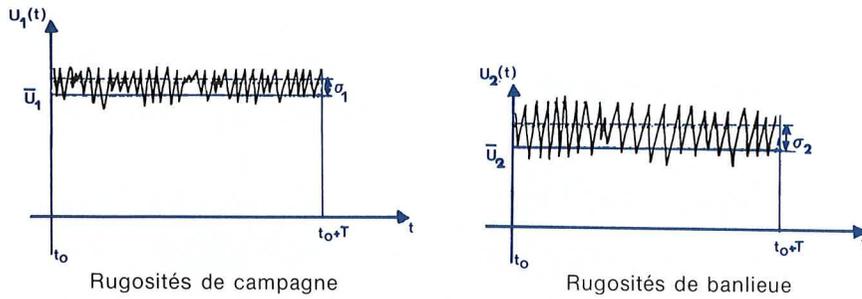


Rugosités de classe I : océan et grand lac

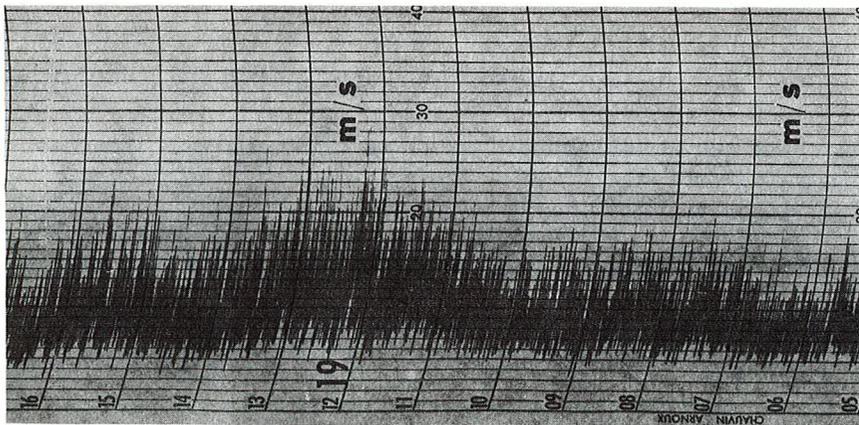


Rugosités de classe IV : zone urbaine

La turbulence (caractérisée par σ) est essentiellement fonction de la rugosité.



Schématisation de deux enregistrements synchrones de la vitesse du vent, à la même hauteur en rugosités de rase campagne et en rugosités de banlieue $U_2 < U_1$ et $\sigma_2 > \sigma_1$



Enregistrement de la vitesse instantanée du vent au CSTB Nantes ($z = 10$ m - rugosités de classe III)

La correspondance entre σ et la vitesse moyenne de référence s'exprime par :

$$\sigma = K \bar{U}_{ref}$$

avec

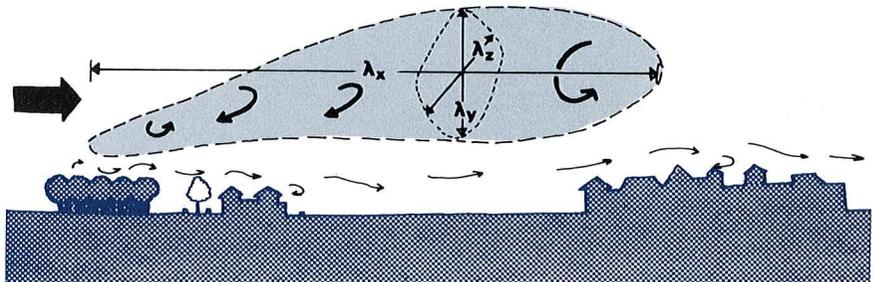
classe de rugosité	I	II	III	IV et V
K	0,17	0,20	0,21	0,23



Rugosités de classe III : bocage, banlieue

L'énergie disponible dans le vent n'est pas la même suivant la nature des tourbillons considérés (gros ou petits). Cette notion est exprimée par le spectre de turbulence, et prend toute son importance dans le cas de la stabilité des ouvrages en génie civil.

Les bouffées de turbulence du vent ou rafales ont des dimensions aléatoires mais dont on peut mesurer la valeur moyenne. Ainsi, l'importance spatiale des tourbillons croît avec la hauteur mais décroît avec la rugosité. Dans la couche de 10 à 60 m, on peut estimer que les échelles longitudinales λ_x sont grossièrement centrées autour de la valeur 100 m. Cette image dimensionnelle fixe « l'échelle dynamique » du vent.



Schématisation grossière d'une rafale de turbulence

- λ_x , échelle longitudinale (dans la direction de la propagation de la rafale)
- $\lambda_z \approx 0,5 \lambda_x$ échelle verticale
- $\lambda_y \approx 0,3 \lambda_x$, échelle transversale

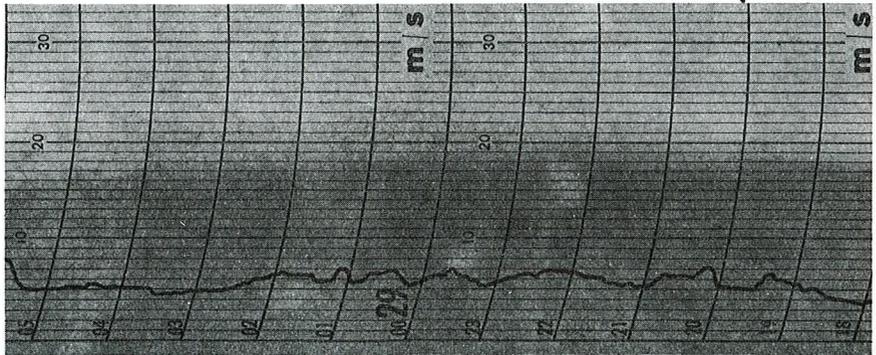
L'acuité de la gêne occasionnée par le vent dépend essentiellement de sa fréquence. Il est alors nécessaire de pouvoir se reporter aux statistiques obtenues dans les stations météorologiques qui disposent de nombreuses années de mesure (valeurs moyennes sur 10 minutes) toutes les 3 heures.

S.M.M./CLIM/ CALCULATEUR		STATION : LILLE		PERIODE 1962/1970																	
LATITUDE : 50.34 N		FREQUENCES MOYENNES POUR 1000 des VITESSES		NOMBRE D'OBSERVATIONS 26 292																	
LONGITUDE : 3.06 E		DE VENT EN FONCTION DES DIRECTIONS		VITESSE EN METRES PAR SECONDE																	
ALTITUDE : 47 M		ANNÉES ET HEURES CUMULEES		ROSE DE 18 DIRECTIONS																	
		MOIS : JANVIER																			
		00 HEURE T.U																			
	020	040	060	080	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	TOTAL	FF	
FF																					
M/S																					
22																					22
20																					20
19																					19
18																					18
17																					17
16																					16
15																					15
14																					14
13																					13
12																					12
11																					11
10																					10
9	1	1	2	1																	9
8	3	3	4	1																	8
7	6	8	8	3																	7
6	12	17	15	6																	6
5	20	28	23	10																	5
4	28	23	10	6																	4
3	37	51	43	23																	3
2	44	59	50	28																	2
1	48	62	54	32																	1
NOYFF	4,2	4,4	4,3	3,7	3																
NB : LE SIGNE * signifie une très																					
FREQUENCES DE VITESSES DE VENT E																					
	020	040	060	080	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	TOTAL	FF	
FF																					
M/S																					
22																					22
20																					20
19																					19
18																					18
17																					17
16																					16
15																					15
14																					14
13																					13
12																					12
11																					11
10																					10
9	1	1	2	1																	9
8	3	3	4	1																	8
7	6	8	8	3																	7
6	12	17	15	6																	6
5	20	28	23	10																	5
4	28	23	10	6																	4
3	37	51	43	23																	3
2	44	59	50	28																	2
1	48	62	54	32																	1
NOYFF	4,2	4,4	4,3	3,7	3,3	3,2	3,9	4,5	5,1	5,7	5,5	5,9	5,4	4,6	4,4	4,6	4,3	4,2	4,5		
NB : LE SIGNE * signifie une fréquence non nulle mais 0,5 pour mille																					
FREQUENCES DE VITESSES DE VENT EGALES OU SUPERIEURES () AUX SEUILS INDIQUEES DANS LES COLONNES EXTREMES																					
FREQUENCE VENT CALME 45																					

Tableaux statistiques types, disponibles dans les différentes stations météorologiques (*)

- ① Nom de la station : Lille (Lesquin)
- ② Direction d'où vient le vent :
Exemple : le secteur 80 est celui des directions comprises entre 70 et 90 degrés
- ③ Vitesse de vent :
Exemple : la classe 6 m/s correspond à $5,5 \text{ m/s} < \bar{U}_{\text{météo}} < 6,6 \text{ m/s}$
- ④ Nombre d'observations sur 1000 :
Exemple : 6 fois sur 1000 dans le secteur 80, la vitesse a dépassé 5,5 m/s et 108 fois, la vitesse a été telle que $U_{\text{météo}} < 5,5 \text{ m/s}$

(*) Météorologie Nationale, Service de la Climatologie 2, avenue Rapp, 75007 Paris



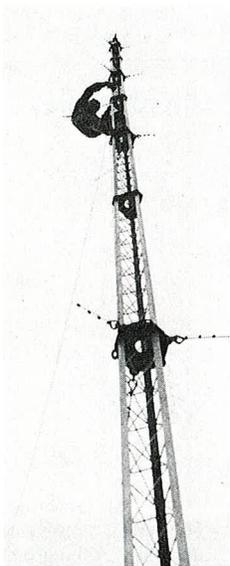
Enregistrement continu de la vitesse du vent (moyennée sur 10 minutes) disponible dans les différentes stations météorologiques

Par suite, il est indispensable de savoir relier ou recalcr la vitesse du vent \bar{U}_z dans le site à la hauteur z et le vent à la station météorologique :

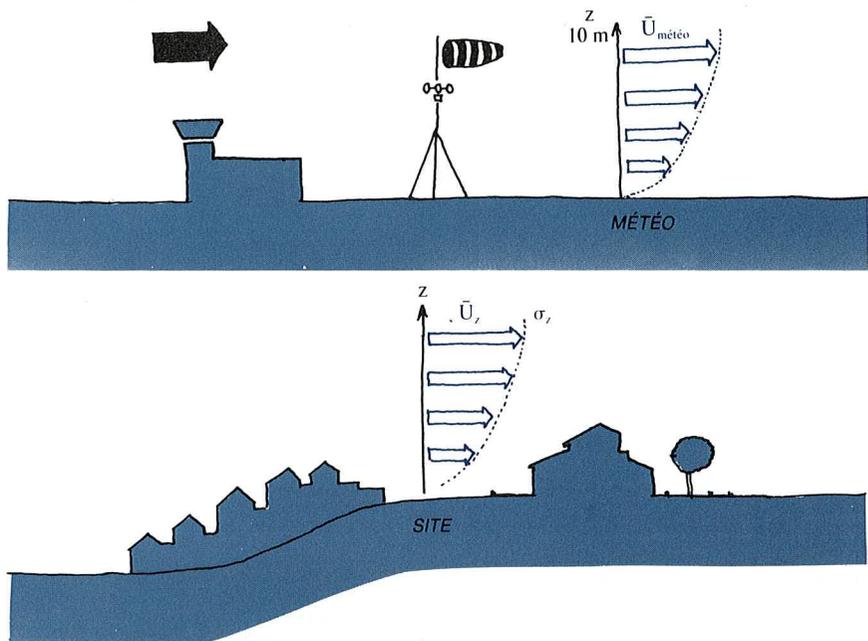
Si la station météorologique est représentative (site de rase campagne, plat) alors $\bar{U}_{ref} \approx \bar{U}_{météo}$ et le recalage théorique précédemment présenté s'applique (C_z et K).

Mais, s'il existe sur le site ou à la station météorologique un effet topographique ou encore si, dans le site ou à la station, la rugosité n'est pas homogène, le recalage théorique deviendra extrêmement difficile et il faudra avoir recours à un recalage climatique expérimental : la mesure synchrone du module de la vitesse sur le site et à la station permet de mesurer les coefficients de passage A et B en fonction de la direction et du vent : $\bar{U}_z = A \bar{U}_{météo}$ et $\sigma_z = B \bar{U}_{météo}$.

Le pylône de recalage sur le site devra se dégager suffisamment des rugosités bâties pour que les mesures soient significatives.

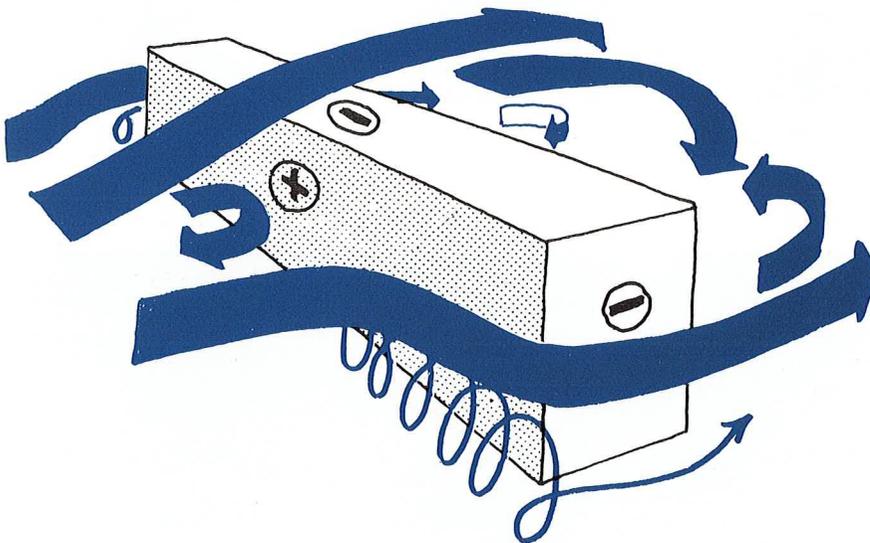


Pylône de recalage



Contournement des constructions par le vent I-2

Tout obstacle perturbe par sa présence l'écoulement vent en l'obligeant à le contourner. Ainsi, sur la face au vent apparaît une surpression (+) avec échappement de l'écoulement vers le haut et rouleau tourbillonnaire (interaction avec le sol). Latéralement, les filets fluides décollent au niveau des arêtes en induisant le long des parois des zones dépressionnaires (-).



Schématisme du contournement d'une construction par le vent (+ surpression, - dépression)

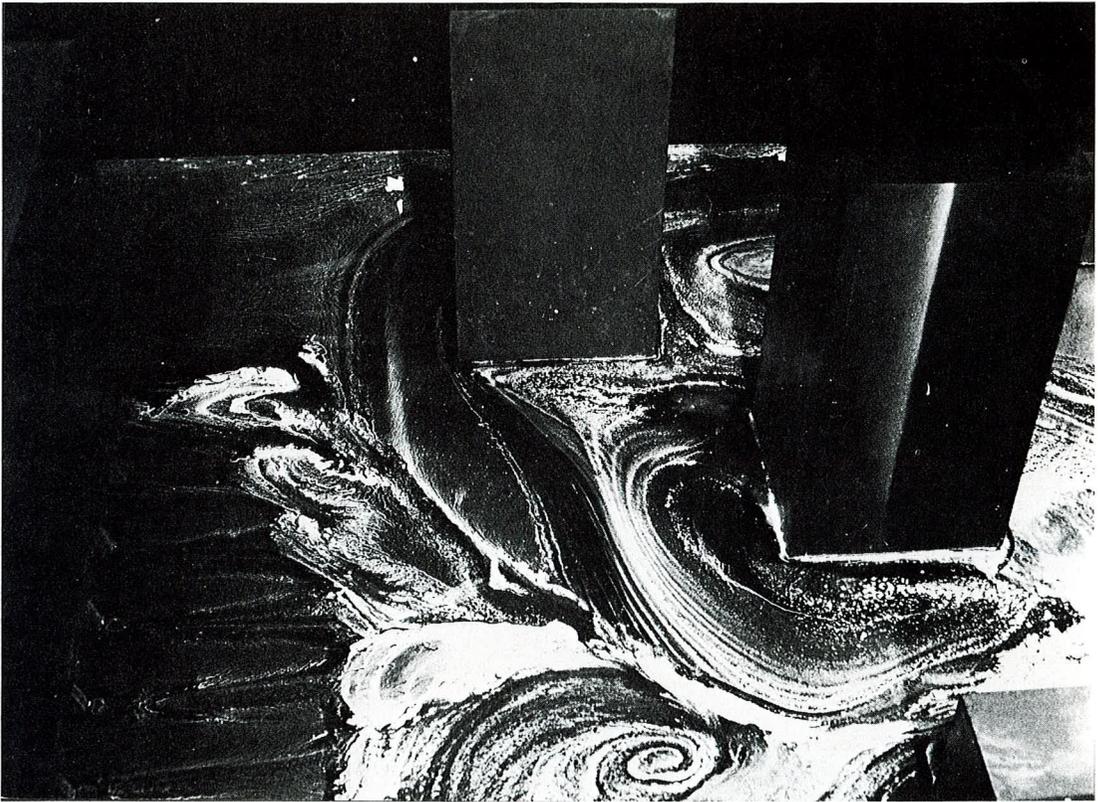
Sous le vent de l'obstacle, des mouvements tourbillonnaires importants se développent pour former le sillage. Loin à l'aval, cette turbulence disparaît et on retrouve les caractéristiques générales de l'écoulement amont. Cette représentation ne doit pas être vue de manière figée mais plutôt comme un état moyen dans le temps autour de laquelle l'ensemble fluctue plus ou moins suivant les zones.

Les dimensions, les formes et la position relative des masses bâties vont conditionner les distributions et les niveaux de pressions sur ces obstacles. De là, dans les espaces extérieurs, l'apparition d'écoulement en survitesse (toute liaison entre zone de pressions différentes induit un flux d'équilibrage + → -) ou de secteurs fortement tourbillonnaires, qui seront source de nuisance pour le piéton par exemple.

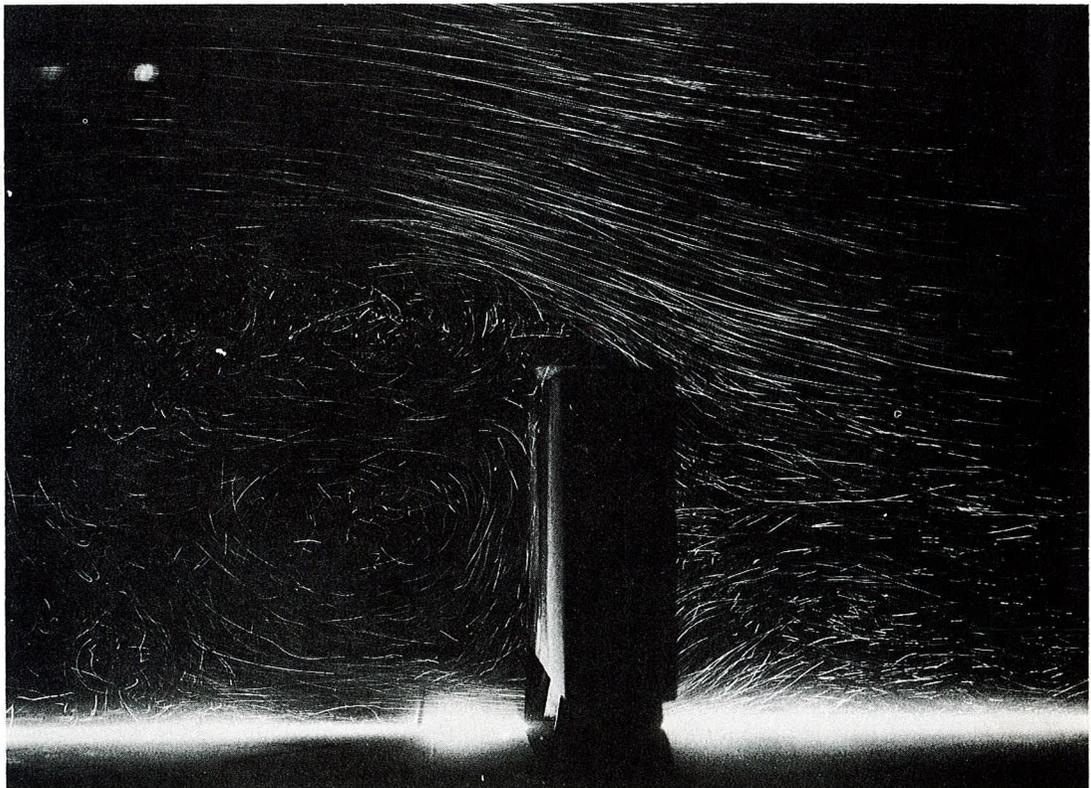
Plus les obstacles ou l'association de plusieurs d'entre eux auront des dimensions importantes :

- plus les pressions aérodynamiques (surpression ou dépression) liées au niveau de vitesse incidente (croissant avec la hauteur) seront différentes et par conséquent plus les écoulements induits seront rapides ;
- plus leurs effets de guidage sur les écoulements pourront être marquants.

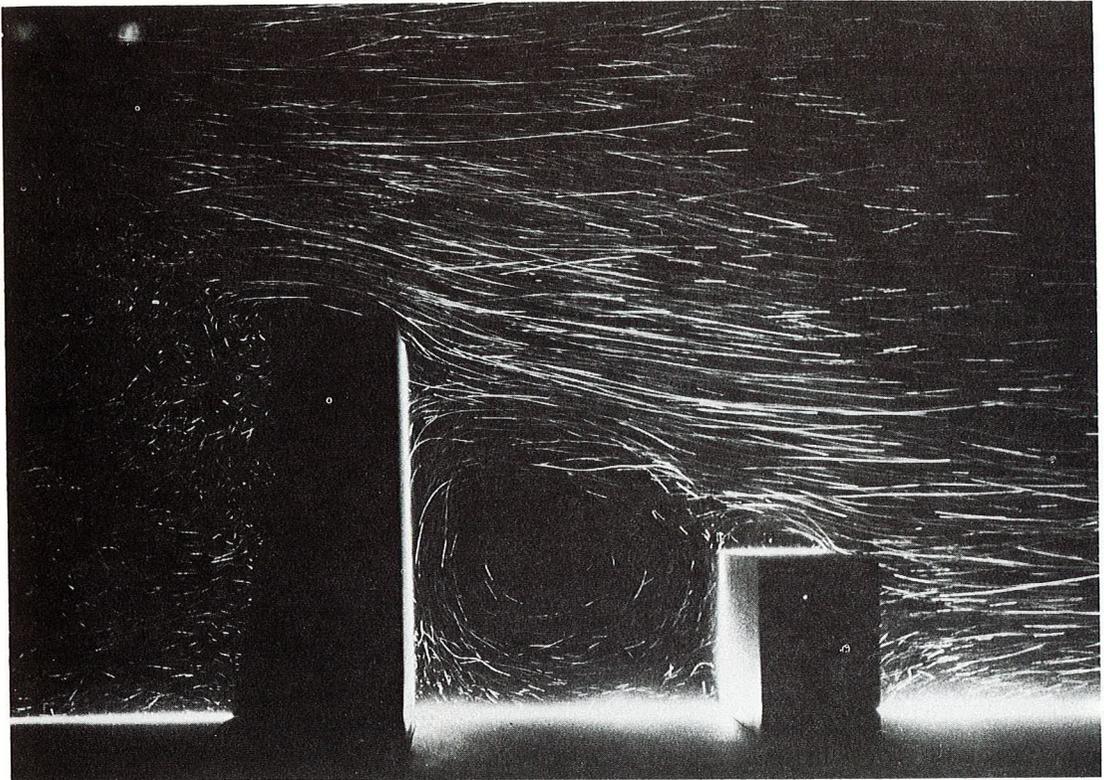
Par suite, leur rôle sera prépondérant sur le conditionnement du champ de vitesse entre les ensembles bâtis et la probabilité d'« accidents aérodynamiques » sera accrue.



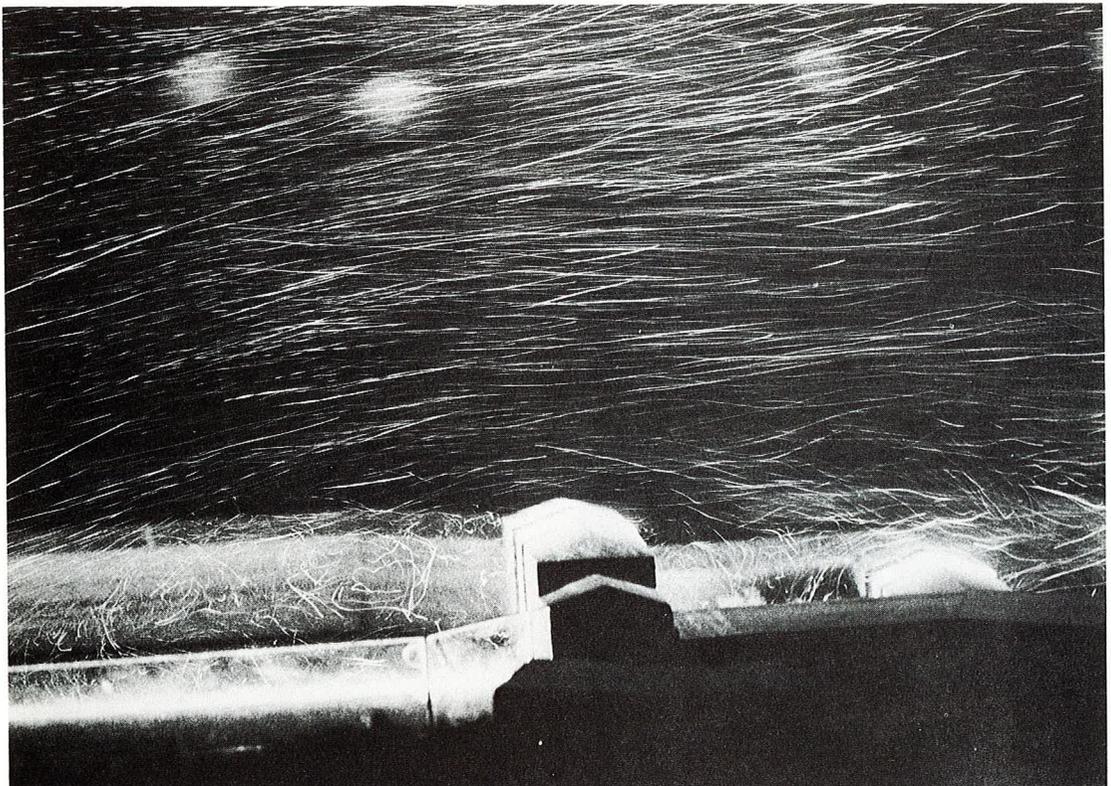
Survitesse aux coins des bâtiments



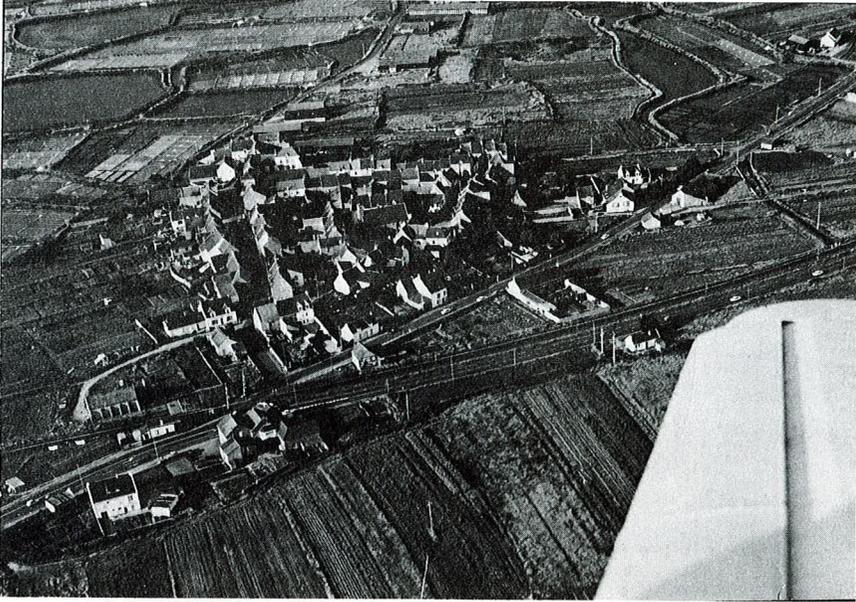
Accélération sous pilotis



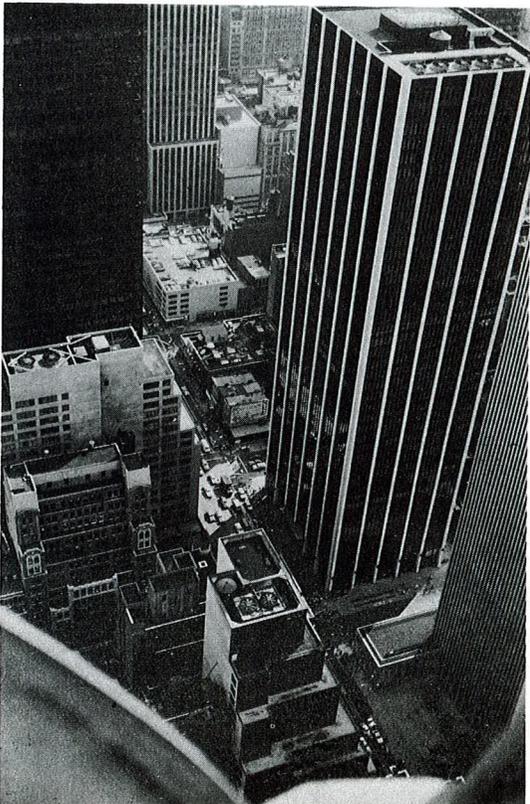
Rouleau tourbillonnaire entre immeubles



Agitation turbulente au sein d'un plan masse



Probabilité d'accidents aérodynamiques faible



Probabilité d'accidents aérodynamiques forte

Notion de nuisance due au vent I-3

La sensation de gêne due au vent est difficilement quantifiable, car elle résulte de la composition complexe de plusieurs facteurs :

L'action dynamique du vent

Lorsque le vent souffle, il induit une force sur l'obstacle « corps humain » proportionnelle au carré de sa vitesse. Ainsi, la force à combattre (et la manière dont les vêtements, cheveux, etc. sont « agressés ») va être d'autant plus importante que le niveau de vitesse (\bar{U}) sera élevé. De plus, du fait de la turbulence, cette force est variable dans le temps et l'espace et ce caractère de variabilité (lié à σ) oblige le piéton à une adaptation constante (recherche d'équilibre notamment) particulièrement gênante.





L'action thermique

Les échanges thermiques et physiologiques entre le corps humain et le milieu extérieur sont affectés par l'écoulement vent.

L'ambiance climatique

Les conditions météorologiques telles que le niveau de température, la présence de précipitations ou du soleil, etc. modifient grandement la sensation de gêne. De même, la saison et la latitude viendront pondérer la notion d'inconfort.

Le contexte humain

L'état physique ou psychologique de l'individu ainsi que son activité rendent particulièrement difficile la quantification de l'inconfort.

L'échelle Beaufort donne quelques manifestations en fonction de la vitesse du vent et des sensations ressenties.

Échelle Beaufort

Vitesse du vent (m/s)		Caractéristiques du vent
force	Z = 2 m	
2	1,5 à 3	Les visages ressentent la sensation du vent. Les feuilles bruissent
3	3 à 4,5	Les feuilles et les petits rameaux sont en mouvement permanent. Le vent déploie pleinement les drapeaux. Les cheveux sont dérangés. Les vêtements amples battent au vent.
4	4,5 à 7	La poussière et les papiers se soulèvent. Les branches s'agitent. Les cheveux sont décoiffés.
5	7 à 9	Les petits arbres avec des feuilles oscillent. La marche est légèrement perturbée.
6	9 à 11	Les grosses branches se mettent en mouvement. Le vent siffle dans les fils téléphoniques. Les parapluies sont utilisés avec peine. La marche devient très instable.
7	11 à 14	Les arbres sont totalement en mouvement. On éprouve de grosses difficultés à marcher contre le vent.
8	14 à 17	Les branches d'arbres se cassent. D'une façon générale, progression pédestre très difficile et dangereuse.
9	17 à 20	Risque d'être violemment projeté à terre sous l'effet des bourrasques.

En conséquence, la définition d'un critère de nuisance est difficile et il est impossible d'introduire un critère unique englobant tous les paramètres. Dans notre approche, seule la *gêne dynamique est prise en compte*, et la nuisance sera caractérisée localement (indice e) à 1,5 m du sol par le groupement $v = \bar{U}_e + \sigma_e$. Ce groupement sera comparé au « seuil de nuisance » ($v_s = 6$ m/s) communément admis à 1,5 m du sol, soit $\bar{U}_s = 5$ m/s et $\sigma_s = 1$ m/s. Cet état de référence correspond grossièrement aux premières manifestations déplaisantes du vent comme le soulèvement de poussières, l'irritation des yeux, le décoiffement des cheveux, etc. La turbulence associée est celle qui règne en rase campagne pour le niveau U_s de vitesse seuil. Par définition, il y aura inconfort ou nuisance, chaque fois que localement $v \geq v_s$.



Dans sa forme générale, le groupement nuisance lié à l'action dynamique du vent prend la forme : $\nu = \bar{U}_z + \gamma\sigma$. Comme nous venons de l'exposer, $\gamma = 1$ pour l'inconfort du piéton.

Pour la *sécurité* des piétons (chute), c'est la vitesse de pointe (force maximale) qui va faire chuter le piéton. Le groupement de nuisance correspondra alors à $\gamma \approx 3,5$. Il y aura nuisance « sécurité » chaque fois que $\nu \geq \nu_s$ pour un seuil grossièrement égal à 18 m/s.

Par contre, pour la perturbation de la navigation fluviale (type péniche) c'est la vitesse moyenne (effort moyen) qui conditionnera uniquement la poussée de dérive et $\gamma \approx 0$. A titre indicatif, le seuil de bonne navigation correspond pour un vent latéral à $\nu = \bar{U}_z \leq 4$ m/s (z à la hauteur du pont) et de navigation impossible à $\nu = \bar{U}_z \geq 10$ m/s.

I-4 Notion de fréquence de nuisance vent

Lorsque l'on exprime par exemple la nuisance vent en nombre d'heures, il faut conserver en mémoire que ce sont uniquement les séquences pendant lesquelles $\nu > \nu_s$ qui ont été retenues. Ainsi lors d'une tempête, certaines heures ne vérifieront pas la condition de nuisance et auront tendance à être considérées subjectivement comme faisant partie de la tempête.

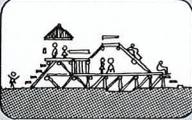
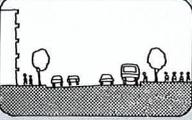
D'un autre côté, ces heures de nuisance ne sont pas complètement indépendantes les unes des autres et on peut estimer qu'elles se groupent plutôt annuellement entre 1 et 4 jours de suite.

Le paragraphe précédent traitait de la caractérisation quantitative de la nuisance vent, ou plutôt de son existence.

En pratique, le critère important est celui de la *fréquence d'apparition* F de cette nuisance. La gêne due au vent est inévitable dans les espaces extérieurs, elle sera tolérée ou acceptée par l'utilisateur si sa fréquence d'apparition reste modérée. En outre, la notion d'acceptabilité ou non acceptabilité d'un niveau de fréquence de nuisance donné sera dépendante de la fonction de l'activité de l'espace extérieur considéré.

La fréquence F peut s'exprimer en pourcentage du temps (durée pendant laquelle le niveau ν dépasse le seuil de nuisance ν_s) ou directement en nombre d'heures (durée moyenne de nuisance annuelle qui peut être pondérée par la saison ou le cycle jour/nuit).

Le tableau ci-après donne l'ordre de grandeur des fréquences généralement admises.

activités		limite supérieure de la gêne pour inconfort convenable (en pourcentage du temps annuel)
STATION IMMOBILE PROLONGÉE Terrasse de café, théâtre en plein air, piscine, etc.		quelques pour cent
STATION IMMOBILE DE COURTE DURÉE Jardin public, aire de jeux, rue commerçante, galerie, etc.		5 %
MARCHE NORMALE Promenade pédestre, passage piétonnier, entrée d'immeuble, etc.		10 %
MARCHE RAPIDE Parc auto, trottoir des avenues, belvédère, etc.		20 %

Facteurs affectant la fréquence de la nuisance vent **I-5**

La fréquence F dépend :

— du *climat* de la région considérée

Le niveau v dépassera le seuil de nuisance v_s d'autant plus souvent que les vents seront fréquemment forts.

— du *site* d'implantation

La topographie peut renforcer le vent (colline) ou l'atténuer (cuvette) ; une forte rugosité (ville) ou une faible (bord de mer) vont respectivement freiner le vent ou le laisser se développer.



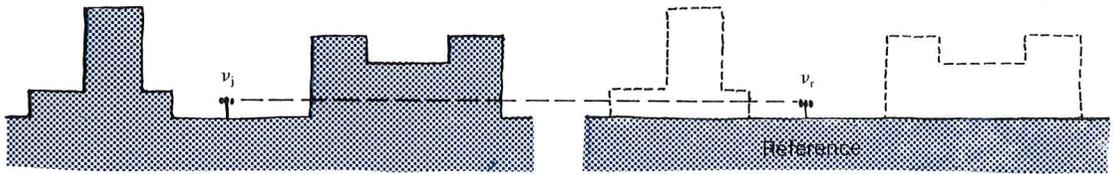
Effet topographique (Cap de la Hève)

— du positionnement du point dans le plan masse (ou le site)

Par exemple, au coin d'un immeuble ou sous un bâtiment à pilotis, le flux d'air sera accéléré.

On caractérise le champ de vitesse par le rapport adimensionnel Ψ entre le groupement de nuisance au point considéré (v_j) et celui que l'on aurait en l'absence du plan masse (v_r) à la même hauteur :

$$\psi_j = \frac{v_j}{v_r} \quad \text{ou} \quad v_j = \psi_j v_r$$

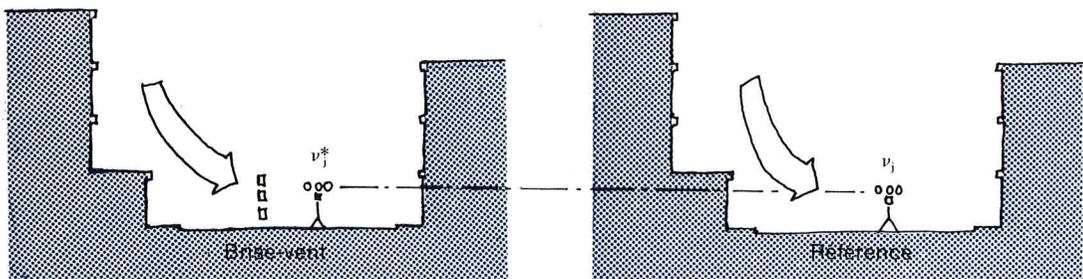


Le guide méthodologique («Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti») a été consacré en grande partie à l'étude des Ψ , ces valeurs étant mesurables en soufflerie.

- des *interventions* prises pour réduire la nuisance vent, notamment les systèmes brise-vent. On caractérise l'*efficacité* du dispositif brise-vent au point j sous le vent par le facteur de protection P_j :

$$P_j = \frac{v_j}{v_j^*} \quad \text{ou} \quad v_j^* = \frac{v_j}{P_j}$$

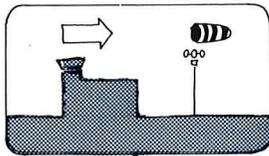
avec v_j groupement nuisance sans le système brise-vent et v_j^* le groupement nuisance derrière le système brise-vent à la même hauteur.



I-6 Estimation de la fréquence de nuisance vent

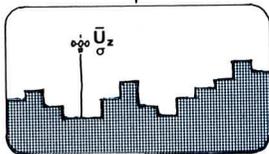
Pour estimer la fréquence d'occurrence du phénomène nuisance, il faut relier le groupement ν_j^* à la vitesse météorologique ($\bar{U}_{\text{météo}}$) de la station voisine afin d'utiliser la statistique de la vitesse $\bar{U}_{\text{météo}}$ établie sur plusieurs années.

MÉTÉO



A, B

SITE



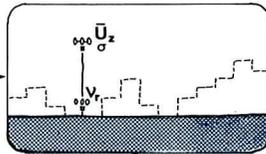
Le recalage climatique permet d'obtenir la correspondance

$$\bar{U}_z = A \bar{U}_{\text{météo}} \quad \sigma = B \bar{U}_{\text{météo}}$$

Note : si un recalage climatique expérimental n'est pas nécessaire

$$\bar{U}_z = C_z \bar{U}_{\text{météo}} \quad \text{et } \sigma K \bar{U}_{\text{météo}}$$

RÉFÉRENCE



Le groupement référence nuisance-vent s'écrit :

$$\nu_r = U_r + \gamma \sigma_r$$

où :

$$\bar{U}_r = C_r \bar{U}_{\text{ref}} = C_r \frac{\bar{U}_z}{C_z} = \frac{C_r}{C_z} A \bar{U}_{\text{météo}}$$

et :

$$\sigma_r = \sigma = B \bar{U}_{\text{météo}}$$

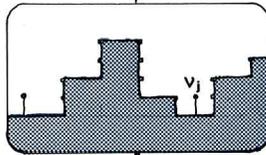
soit :

$$\nu_r = \left(\frac{C_r}{C_z} A + \gamma B \right) \bar{U}_{\text{météo}}$$

Note : Si $\bar{U}_{\text{ref}} = \bar{U}_{\text{météo}}$

$$\text{alors } \nu_r = (C_r + \gamma K) \bar{U}_{\text{météo}}$$

PLAN MASSE

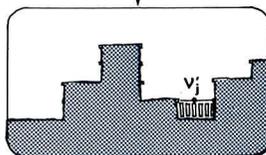


En soufflerie atmosphérique (maquette d'un projet) ou sur le terrain (constat), la mesure synchrone de ν_r et ν_j permet de calculer le

rapport $\psi_j = \frac{\nu_j}{\nu_r}$ et $\nu_j = \psi_j \nu_r$

$$\text{d'où : } \nu_j = \psi_j \left(\frac{C_r}{C_z} A + \gamma B \right) \bar{U}_{\text{météo}}$$

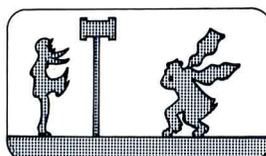
SYSTÈME BRISE-VENT



La mesure de ν_j^* derrière le dispositif brise-vent permet de détruire le facteur de protection du système :

$$P_j = \frac{\nu_j}{\nu_j^*} \quad \text{et} \quad \nu_j^* = \frac{\nu_j}{P_j}$$

FRÉQUENCE DE NUISANCE



Fréquence d'occurrence du phénomène nuisance :

$$\nu_j^* = \frac{\psi_j}{P_j} \left(\frac{C_r}{C_z} A + \gamma B \right) \bar{U}_{\text{météo}}$$

$$\text{Note : Si } \bar{U}_{\text{ref}} = \bar{U}_{\text{météo}} : \nu_j^* = \frac{\psi_j}{P_j} (C_r + \gamma K) \bar{U}_{\text{météo}}$$

Compte tenu des indications et des notations précédemment données, le schéma de la page 34 résume le cheminement qui permet de « passer » de $\bar{U}_{\text{météo}}$ à v_r puis à v_j et finalement à v_j^* .

Au point j, la nuisance vent apparaît lorsque le niveau de v_j^* égale ou dépasse le seuil de nuisance v_s ; c'est-à-dire aussi compte tenu de la relation entre v_j^* et $\bar{U}_{\text{météo}}$, lorsque la vitesse à la station météorologique dépassera une certaine valeur seuil \bar{U}_{os} :

$$\bar{U}_{os} = \frac{P_j}{\Psi_j} \frac{v_s}{\left(\frac{C_r}{C_z} A + \gamma B\right)}$$

Il y aura nuisance au point j dans le plan masse lorsque à la station, la vitesse moyenne $\bar{U}_{\text{météo}}$ sera supérieure ou égale à \bar{U}_{os} .

La vitesse du vent à la station météorologique dépassera la valeur seuil U_{os} d'autant plus souvent que cette valeur sera basse; ou encore, la nuisance au point j dans le plan masse sera d'autant plus fréquente que \bar{U}_{os} sera faible c'est-à-dire que :

- l'efficacité P_j du système brise-vent sera faible (valeur de P_j petite);
- l'anomalie aérodynamique sera grande ce qui correspond à des valeurs de Ψ_j élevées.

Si $F(X)$ désigne la fréquence avec laquelle la vitesse du vent à la station météorologique $\bar{U}_{\text{météo}}$ dépasse le niveau X (mètre/seconde), la fréquence de la nuisance vent au point j est donnée par $F(\bar{U}_{os})$.

Remarque sur l'influence de la direction du vent

Le paramètre de protection P_j est directement fonction de l'orientation du vent (par exemple, il n'y a pas de protection si le vent devient parallèle au brise-vent). De même, le niveau de l'anomalie aérodynamique Ψ_j va varier d'une direction de vent à l'autre compte tenu des effets d'interaction ou de masque au sein du plan masse. Enfin, l'effet de site (vent de type mer dans une direction, vent de terre dans une autre) ou la fréquence des vents forts (exemple vent de Tramontane et de Mistral) peuvent être fortement indexés par l'orientation du vent.

On peut admettre, en général, que les coefficients Ψ_j - P_j - A et B correspondant à une direction donnée du vent restent sensiblement invariants dans un secteur de $\pm 20^\circ$ autour de cette direction.

Pour calculer la fréquence de nuisance vent au point j, toutes directions de vent confondues, il faut donc théoriquement calculer la vitesse seuil \bar{U}_{os} et la fréquence de dépassement $F(\bar{U}_{os})$ pour chacun des neuf secteurs de 40° de la rose des vents.

En pratique, il suffit souvent de considérer un ou deux secteurs : par exemple, la Tramontane ou le Mistral, responsables de la majeure partie de la nuisance vent dans le Sud de la France, sont suffisamment directifs pour qu'il ne soit pas nécessaire de considérer plusieurs secteurs de vent.

Exemple d'application : cas de l'inconfort dans les espaces extérieurs

Dans ces conditions, nous aurons :

$$\begin{aligned} \text{hauteur de référence : } & z_r = 1,5 \text{ m} \\ & \gamma = 1 \\ & v_j = \bar{U}_j + \sigma_j \quad \text{au point j} \end{aligned}$$

$$\text{et} \quad v_s = 6 \text{ m/s}$$

$$\text{d'où} \quad \bar{U}_{os} = \frac{P_j}{\psi_j} \cdot \frac{6}{\frac{C_r}{C_z} A + B}$$

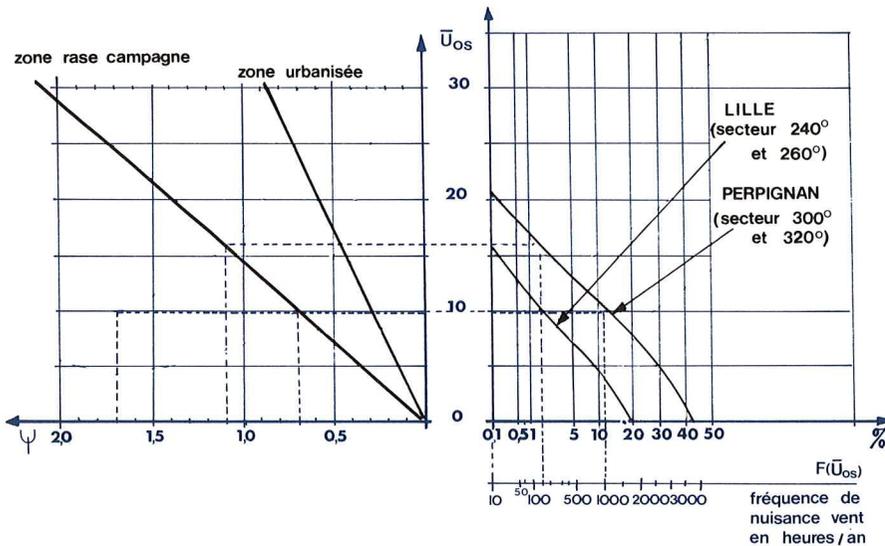
1^{er} cas

Fréquence de nuisance au sein d'un plan masse sans brise-vent ($P_j = 1$), la station météorologique étant supposée représentative ($\bar{U}_{ref} = \bar{U}_{météo}$) :

$$\bar{U}_{os} = \frac{1}{\psi_j} \cdot \frac{6}{(C_r + K)}$$

Site d'implantation en rase campagne (type II)	Site d'implantation en zone urbaine (type IV)
$C_r = 0,62$ $K = 0,20$ $\bar{U}_{os} = \frac{1}{\psi_j} \cdot \frac{6}{0,82}$ $\bar{U}_{os} \approx \frac{7,3}{\psi_j}$	$C_r = 0,11$ $K = 0,23$ $\bar{U}_{os} = \frac{1}{\psi_j} \cdot \frac{6}{0,34}$ $\bar{U}_{os} \approx \frac{17,6}{\psi_j}$

A titre d'exemple, on donne pour les stations de Lille (secteur 240° et 260°) et de Perpignan (secteur 300° et 320°) la fréquence de nuisance vent en fonction de Ψ pour deux rugosités d'implantation.



Fréquence de nuisance vent en zone dégagée ($\Psi_j = 1$)

On constate, par exemple, que :

- pour une même durée annuelle de nuisance en région lilloise (exemple 150 heures/an) la valeur de Ψ sera inférieure pour une rugosité de rase campagne ($\Psi = 0,7$) à celle d'une rugosité ville ($\Psi = 1,1$);
- pour une même valeur du paramètre Ψ (exemple rugosité de campagne avec $\Psi = 0,7$), la durée de gêne à Lille sera beaucoup plus faible (150 heures par an) qu'à Perpignan (1 000 heures par an).

2^e cas

Fréquence de nuisance en terrain «dégagé» ($\Psi_j = 1$) derrière un brise-vent, la station météorologique étant supposée représentée ($\bar{U}_{ref} = \bar{U}_{météo}$)

$$\bar{U}_{os} = P_j \cdot \frac{6}{(C_r + K)}$$

Site d'implantation en rase campagne :

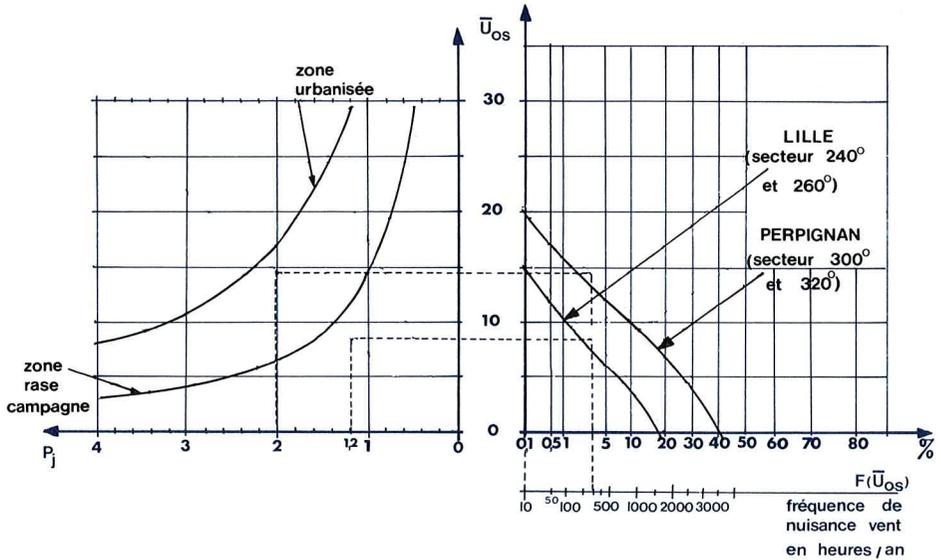
alors $C_r = 0,62$ et $K = 0,20$

d'où $\bar{U}_{os} \approx 7,3 P_j$

Site d'implantation en zone urbaine :

alors $C_r = 0,11$ et $K = 0,23$

d'où $\bar{U}_{os} \approx 17,6 P_j$



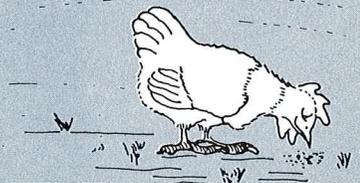
Fréquence de nuisance vent, sans présence du système brise-vent ($P_j = 1$)

On constate par exemple que, pour obtenir une durée de nuisance égale (exemple 300 heures/an) à Lille et à Perpignan, il faudra, pour le premier site, en rugosité de campagne, un dispositif de protection très moyen ($P = 1,2$), alors qu'en région perpignanaise (rugosité de rase campagne) le dispositif devra être très performant ($P = 2$).

contrôle du vent à l'échelle locale aérodynamique des brise-vent

II

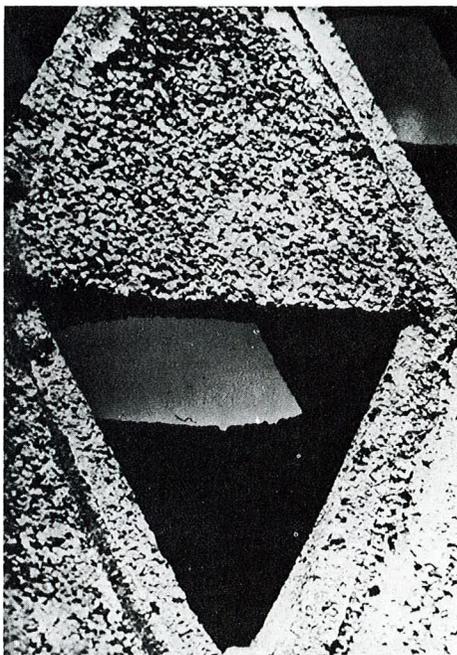
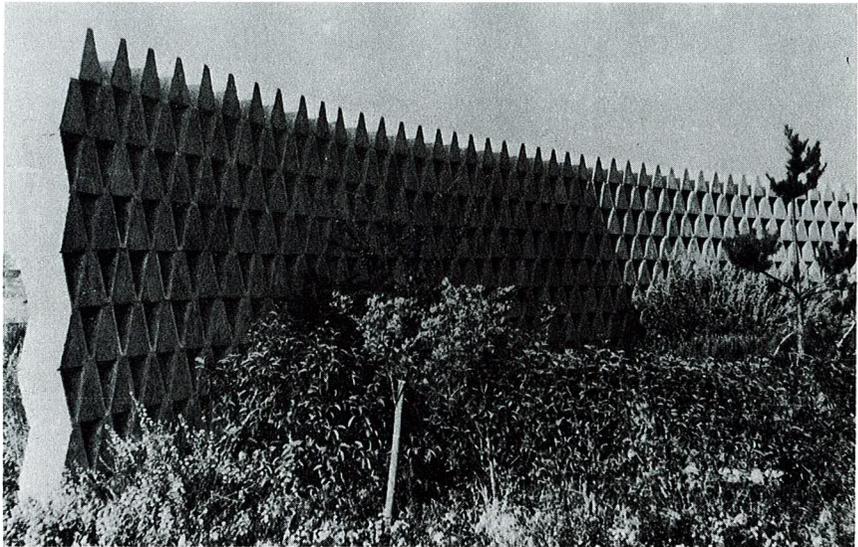
qu'est-ce qu'un brise-vent ?	1	40
facteur de protection d'un brise-vent : application à la gêne de l'utilisateur	2	48
quantification de l'effet de protection	3	50
bilan : expression empirique des aires protégées	4	66
application au contexte urbain : influence de l'environnement immédiat	5	69
exemple pratique : vérification en vraie grandeur de l'efficacité de divers écrans brise-vent	6	73



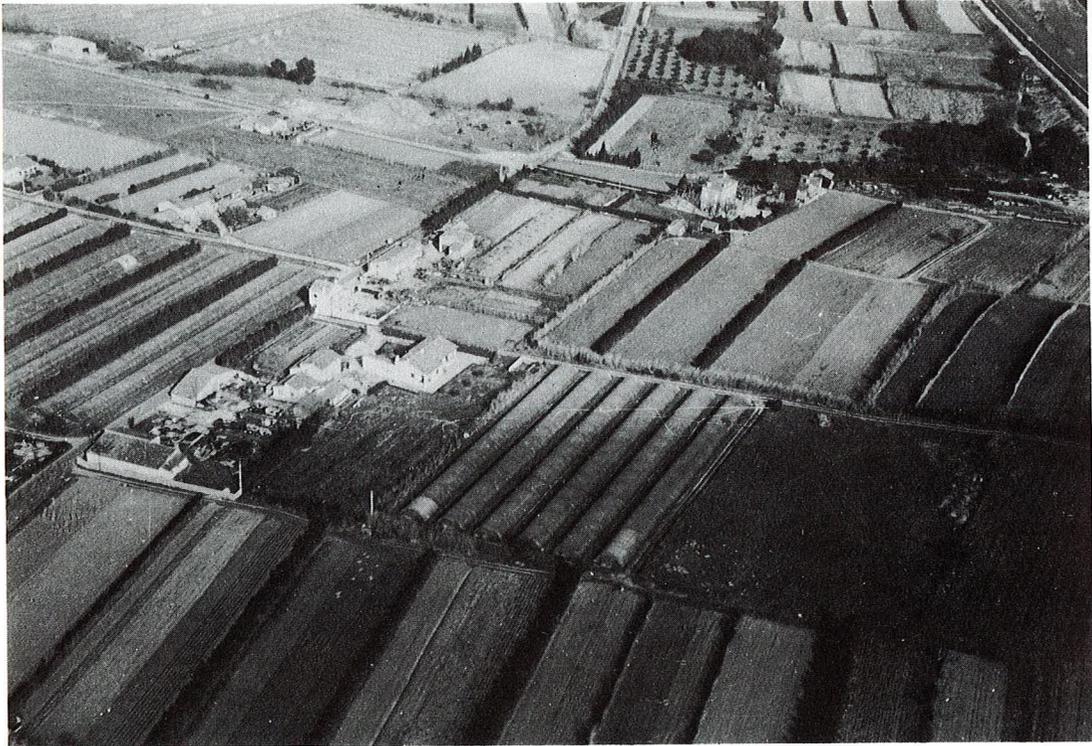
II-1 Qu'est-ce qu'un brise-vent ?

II-1,1 Définition

Un brise-vent peut être un élément unique (écran par exemple) ou un système de dispositifs qui, par sa présence dans l'écoulement vent, réduit l'effet de ce dernier (niveau de vitesse, de turbulence, etc.) tant au sein du système lui-même (cas de plusieurs éléments) que sur une certaine distance aval.



*Écran perméable isolé :
mur (béton)
dans la plaine du Crau*



Association de haies pour la protection des cultures dans la vallée du Rhône

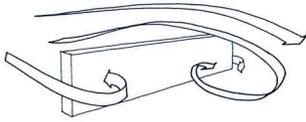
Dans cet ouvrage, l'aérodynamique des éléments brise-vent « isolés » et celle de l'association de plusieurs seront traitées successivement.

Pour plus de clarté, la terminologie brise-vent (ou brise-vent isolé) sera utilisée pour un seul dispositif (exemple : haie d'arbres) et nous mentionnerons « association de brise-vent » ou « système brise-vent » lorsque plusieurs dispositifs seront évoqués (exemple : la rugosité de ville constituée pour la protection de ces espaces extérieurs un « système brise-vent »).

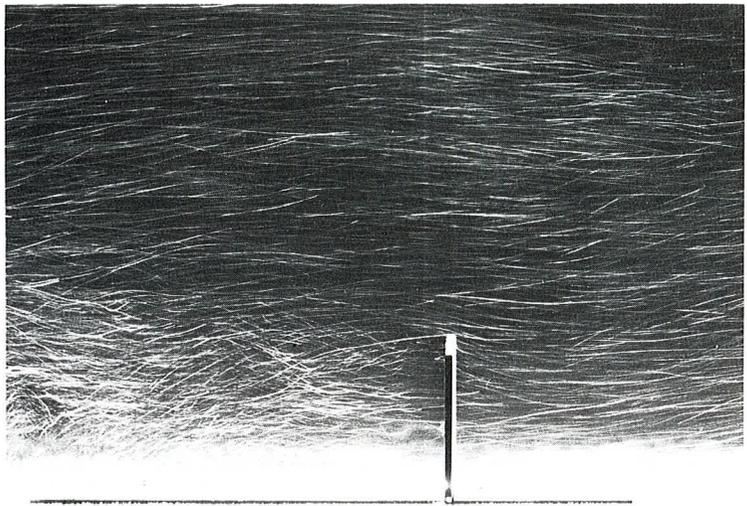
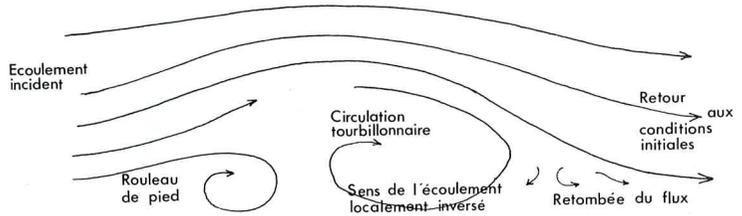
Description des écoulements au voisinage d'un écran brise-vent **II-1,2**

Le brise-vent le plus élémentaire va être constitué d'un obstacle opaque (mur) ou poreux (haie, palissade, etc.). La hauteur des écrans reste de façon générale faible par rapport à leur longueur, et les filets d'air sont essentiellement déviés par le dessus (à l'exception des extrémités immédiates de l'écran).

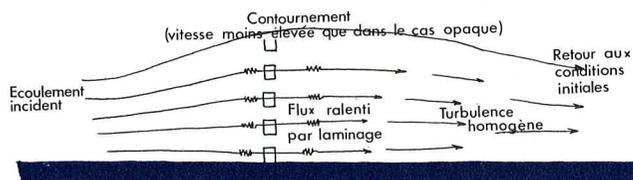
Si l'écran présente une porosité importante, une partie du flux incident traverse l'obstacle et s'oppose à la formation des circulations tourbillonnaires à son aval.



Contournement d'un mur opaque



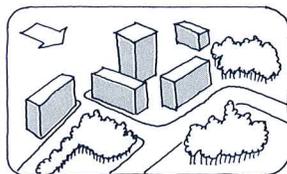
Contournement d'un mur perméable



Les visualisations ci-contre illustrent les contournements différents du fluide autour d'un mur opaque et d'un mur poreux.

L'obstacle commence à agir sur l'écoulement à environ une fois sa hauteur (rouleau tourbillonnaire de pied et déflexion vers le haut), mais surtout modifie fortement l'écoulement à son aval en formant un sillage. Il faut attendre environ vingt fois la hauteur de la structure pour retrouver les caractéristiques de l'écoulement amont non perturbé.

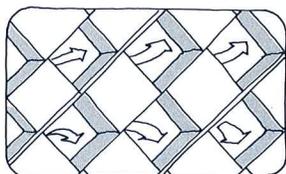
L'action des éléments brise-vent, c'est-à-dire la façon dont la vitesse (niveau et distribution) et la turbulence vont être modifiées par leur présence, dépend d'une combinaison complexe entre l'échelle de l'obstacle, l'aérodynamique propre du brise-vent (notamment la perméabilité), les caractéristiques du vent incident et la présence d'un environnement immédiat.



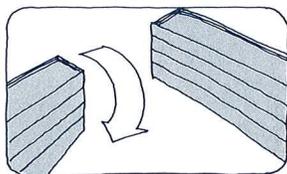
La nature statistique du vent (jeu de la rugosité)



Les dimensions du brise-vent



L'aérodynamique du brise-vent



L'implantation de l'environnement immédiat



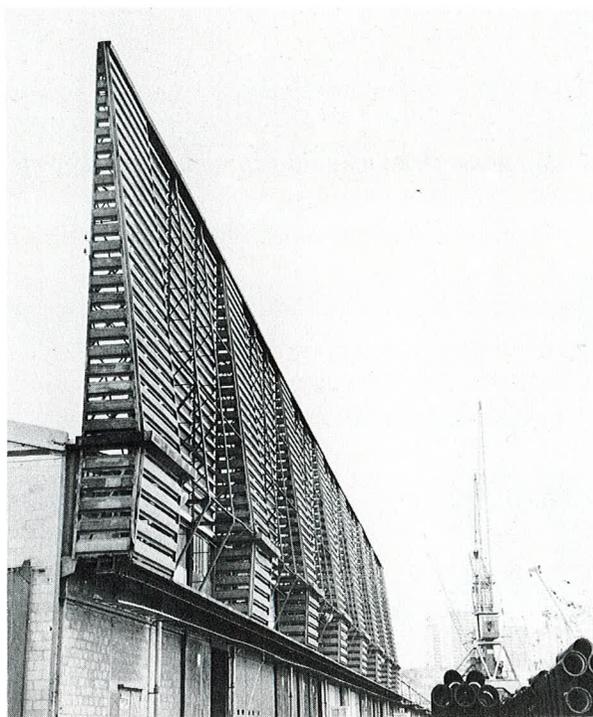
LA PROTECTION EFFECTIVE

II-1,3 Les fonctions d'un brise-vent

Quel que soit le domaine d'application (gêne et sécurité de l'utilisateur ou génie civil), tout effet de protection sera obtenu à partir du contrôle du niveau de vitesse et de sa variation spatiale (horizontalement et verticalement), du taux de turbulence et de son homogénéité, de l'axe et du sens des flux.

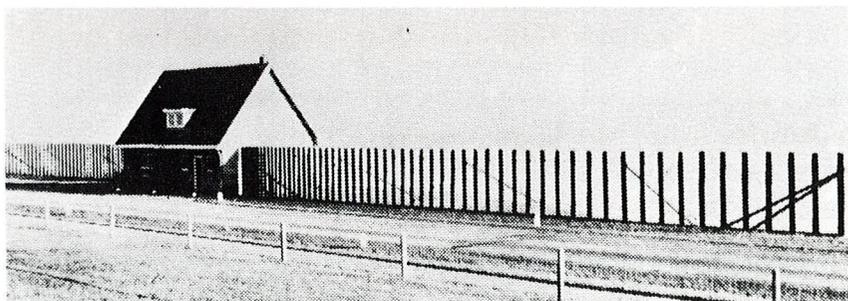
Par conséquent, le dispositif peut avoir les fonctions suivantes :

- Freiner les flux d'air en introduisant sur leur chemin une dissipation d'énergie cinétique en laminant, par exemple, les écoulements à travers des orifices ou encore en augmentant le frottement du sol par le jeu de la rugosité.



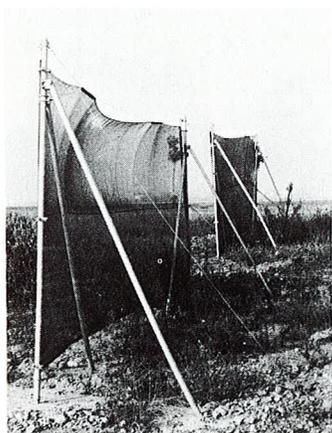
*Écran brise-vent
(structure métallique)
au Port Autonome
de Marseille*

Étalement de la variation brutale (coin) du niveau de vent latéral par implantation d'un écran à porosité variable.



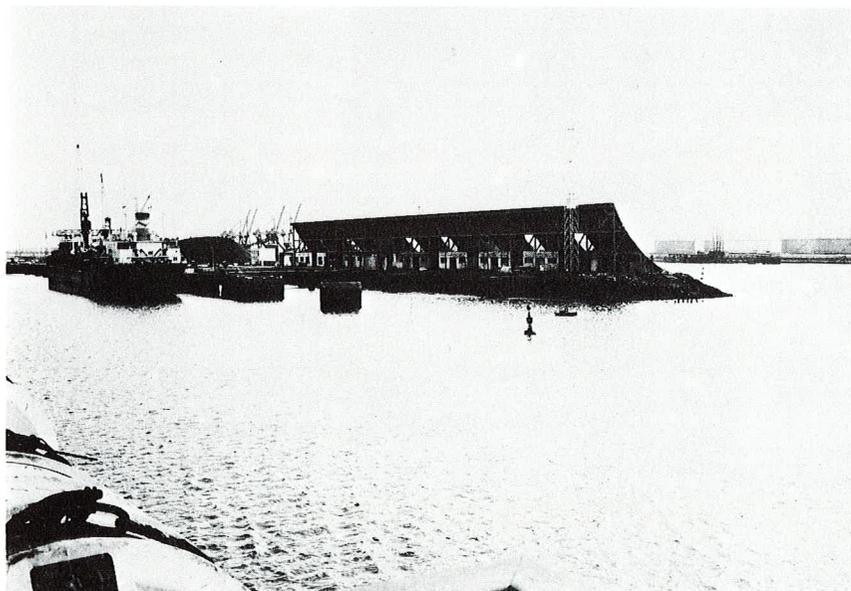
Brise-vent perméable d'une digue de Hollande

- Casser la turbulence par réduction des dimensions des tourbillons. La viscosité de l'air induit un amortissement d'autant plus rapide sur la turbulence que les tourbillons sont petits. Les toiles métalliques ou les filets remplissent remarquablement bien ce rôle.



Protection de la végétation par filets brise-vent

- Guider les écoulements au profit de secteur « déventé » par le jeu de profilage des bâtiments ou de mouvement de terre (tremplin).

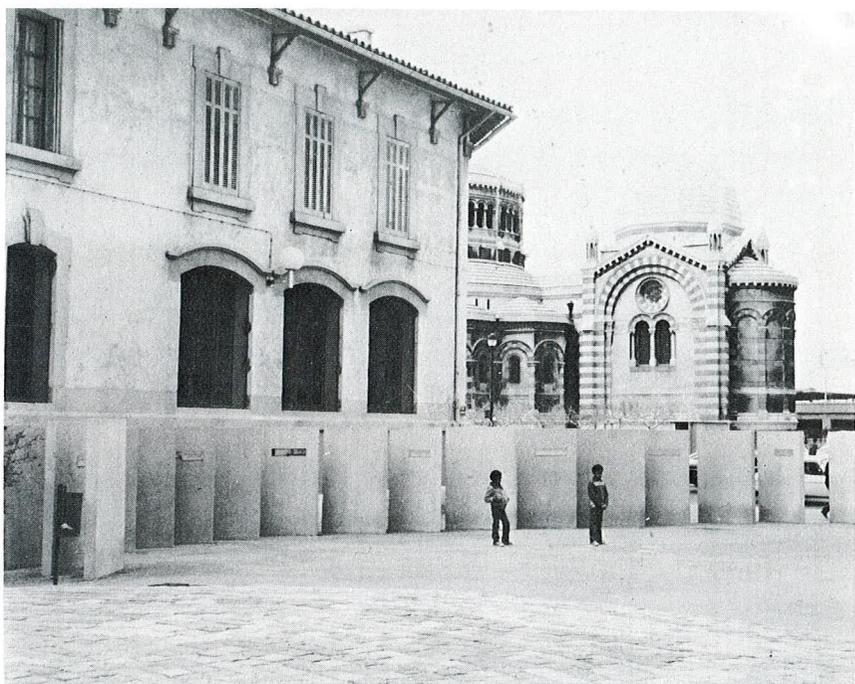


Protection du quai d'embarquement au Havre : tremplin béton ($h = 20$ m et $L = 240$ m)

- Détruire par éclatement tridimensionnel (divergence du flux dans toutes les directions) toutes organisations et concentrations des écoulements. L'association de sculptures ou stables peuvent parfaitement remplir cette fonction.

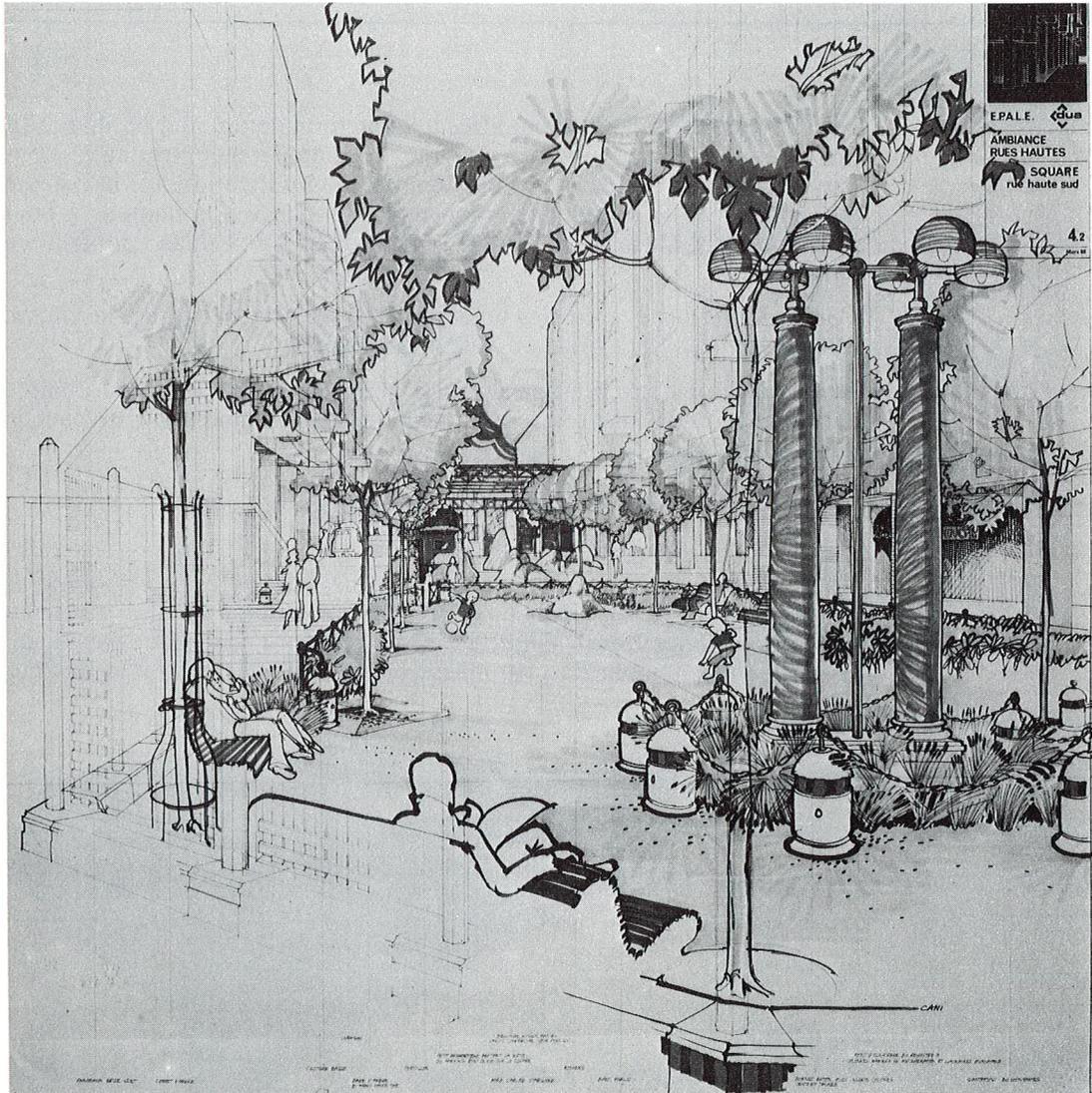


Sculptures en granite (Gruissan : les bassins)



Panneaux béton (Marseille). Éléments minéraux «découpant» les vents dominants

Il faut mentionner que les interventions ou dispositifs conjuguent en général plusieurs de ces fonctions.



Projet d'aménagement d'une rue commerçante à Lille-Est (intégration de plusieurs interventions brise-vent)

Architecte : Canivet

De plus, suivant la nature de la protection à introduire, la solution aérodynamique à apporter et le dispositif qui en découle pourront être très différents.

II-2 Facteur de protection d'un brise-vent : application à la gêne de l'utilisateur

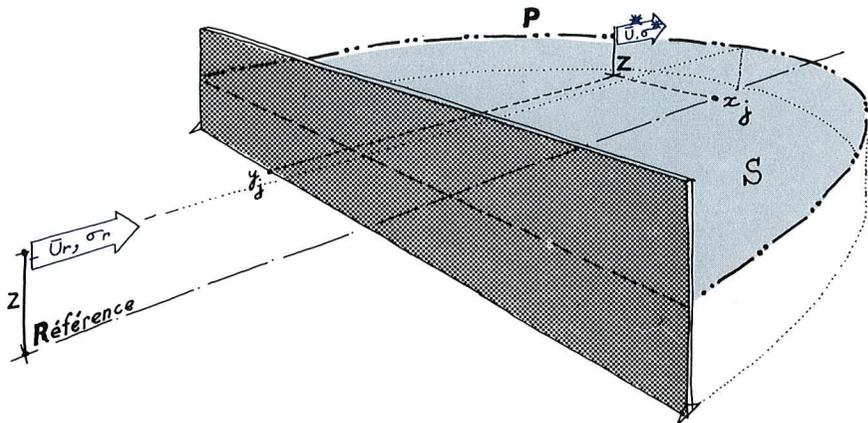
Afin de quantifier la zone modifiée à l'aval d'un écran ou d'un dispositif brise-vent, et par suite de pouvoir les comparer entre eux, nous caractériserons l'effet de protection ou d'amplification de la vitesse moyenne et de la turbulence en un point du sillage à la hauteur z pour le groupement nuisance $v_j^* = |\bar{U}_z^*| + \gamma\sigma^*$ avec $\gamma = 1$ dans l'application considérée.

Compte tenu des éventuelles inversions du sens de la vitesse, la vitesse moyenne locale sera prise en valeur absolue.

Nous rappelons la définition du facteur de protection qui rend compte de l'efficacité du dispositif brise-vent indépendamment du niveau de vitesse considéré :

$$P_j = \frac{v_j}{v_j^*} = \frac{\bar{U}_z + \sigma_z}{|\bar{U}_z^*| + \sigma_z^*}$$

Le groupement nuisance v_j est pris comme référence *en l'absence de dispositif brise-vent* : dans un plan masse, il correspondra au groupement nuisance local initial et sans présence de plan masse au groupement v_r (amont du plan masse ou en zone dégagée) à la hauteur z .



Dans un plan horizontal ($z = \text{cte}$), on peut mesurer un grand nombre de points (maillage du plan), calculer systématiquement le facteur de protection P et tracer un réseau de lignes d'isoprotection ($P = \text{cte}$). De même, l'aire S comprise entre l'arrière de l'obstacle et la ligne d'isoprotection P pourra être quantifiée.

Lors de notre étude de comparaison entre les différents types de dispositif brise-vent, toutes les isovaleurs de protection ne seront pas considérées. Nous retiendrons uniquement le réseau d'isovaleur $P = 3$; 2 et 1,2 ainsi que les aires associées S_3, S_2 et $S_{1,2}$.