

Les effets aérodynamiques des brise vent

par G. GUYOT

Aerodynamic Effects
of Wind-Breakers

Aerodynamische Auswirkungen
von Windbrechern

RESUME

Outre leurs multiples applications, les brise vent permettent de protéger les installations pour économiser l'énergie : protéger les capteurs solaires pour conserver leur rendement, protéger les piscines de plein air pour réduire leur consommation d'énergie, protéger les bâtiments des influences thermiques du vent en créant une zone microclimatique.

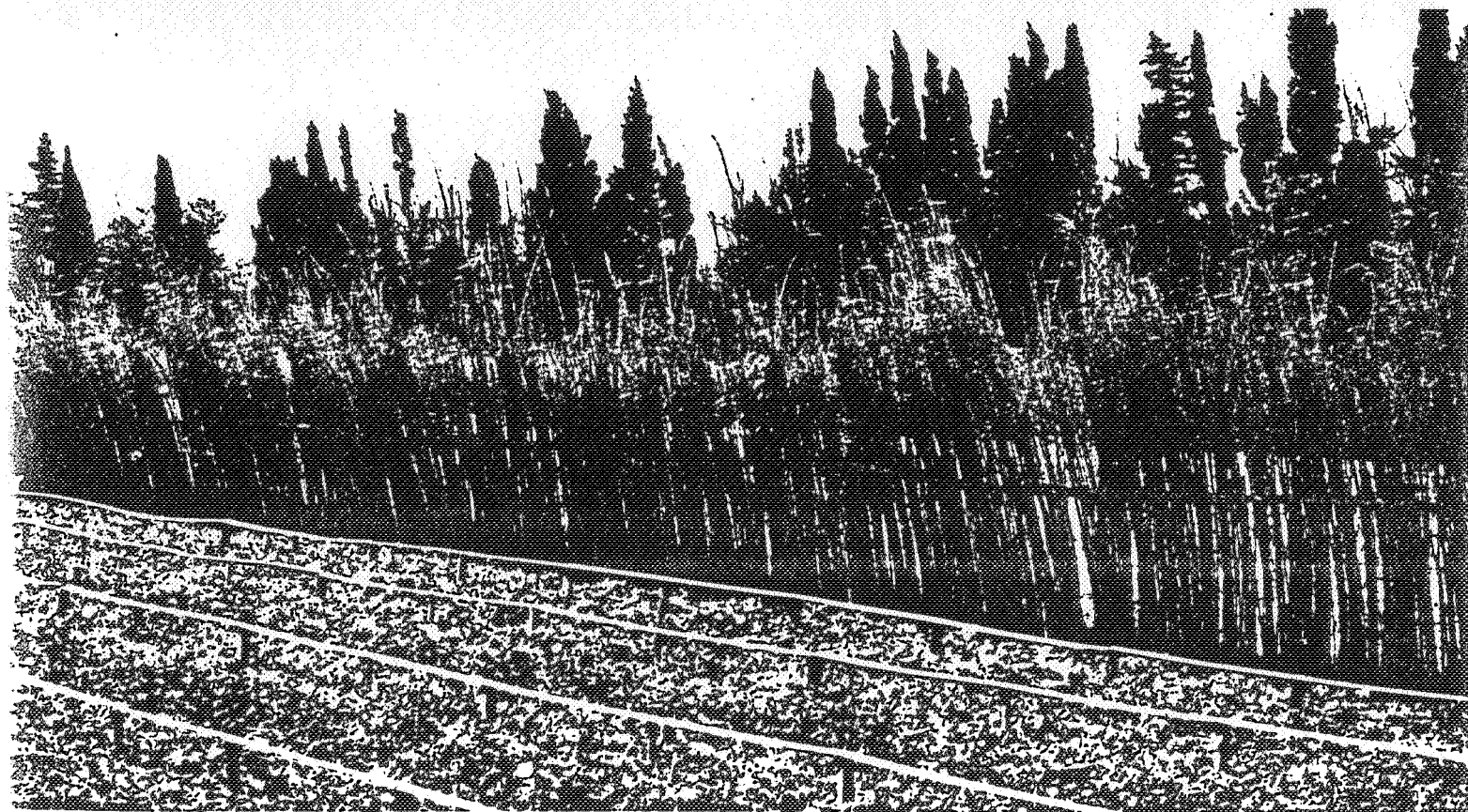
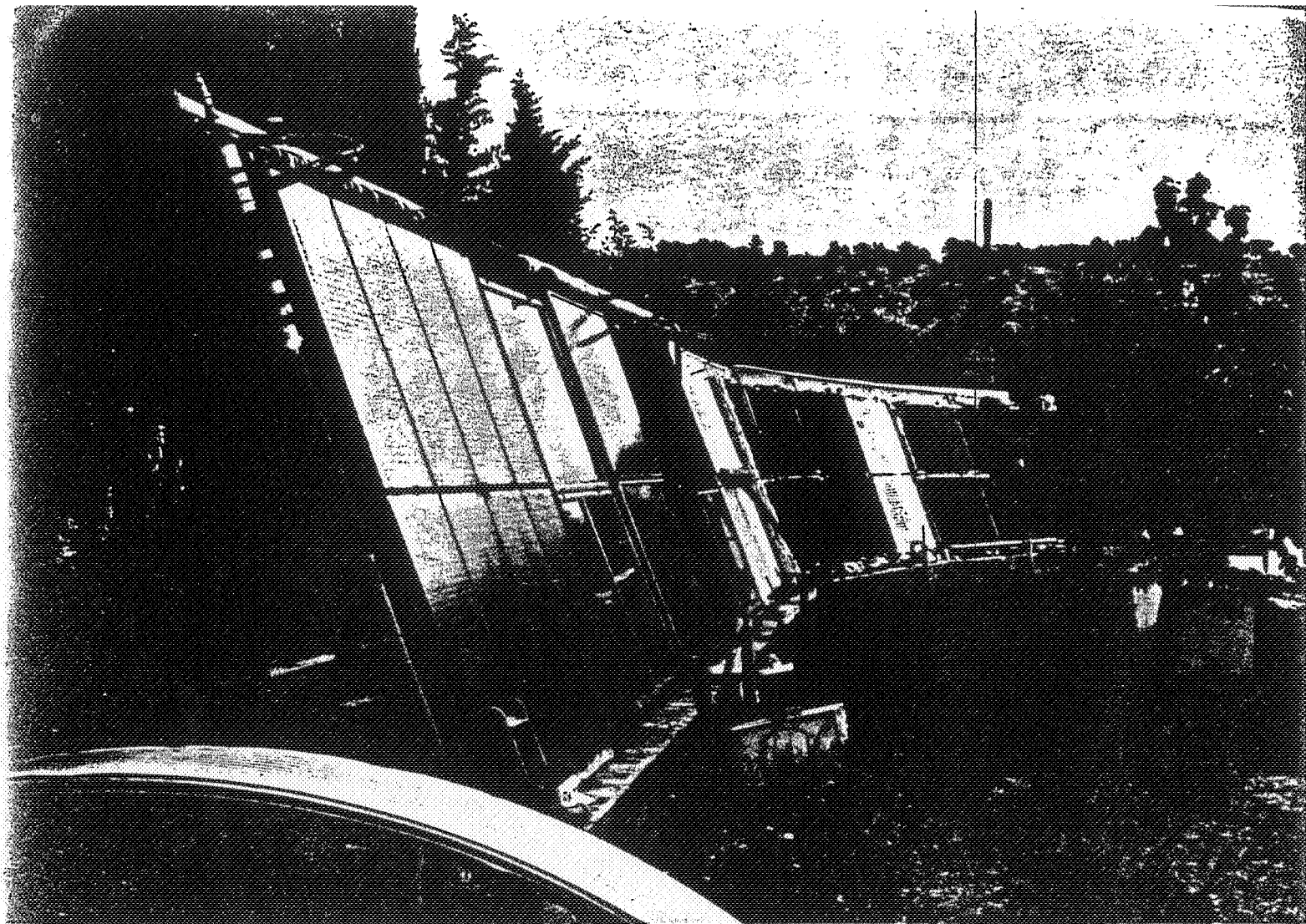
Monsieur G. GUYOT (laboratoire de bioclimatique de l'I.N.R.A. à MONTFAVET) présente ici une synthèse des connaissances actuelles sur les effets des brise vent. Cette étude fait suite à une publication du même auteur : "Les profils de vitesse du vent au voisinage du sol", dans le numéro de Mars 1976 de cette revue.

SUMMARY

In addition to their manifold applications, wind-breakers permit to protect installations for saving energy : to protect solar collectors for conserving their efficiency, to protect open-air swimming-pools for reducing their energy consumption, to protect buildings from the thermal influence of wind by creating a microclimatic zone.

G. GUYOT (Bioclimatic Laboratory of I.N.R.A. in MONTFAVET) presents here a synthesis of the present knowledge on the effects of wind-breakers. This study is the continuation of a paper from the same author : "The Profiles of Wind Velocity near the Ground Surface", published in the issue of March of this review.

Définitions - Influence des caractéristiques géométriques des brise vent - Influence des caractéristiques de l'écoulement - Conclusion - Bibliographie
--



Brise-vent traditionnels du Sud de la France : cyprès et cannisses.

SYMBOLES UTILISES

- a : coefficient
- g : accélération de la pesanteur
- H : hauteur d'un brise vent
- Ix : taux de turbulence
- Km : coefficient d'échange de quantité de mouvement
- κ : constante de VON KARMAN
- l : longueur d'action d'un brise vent mesurée parallèlement au vecteur vent
- o, x, y, z : triède de référence
- p : pression
- R : rayon de courbure des lignes de courant
- Re : nombre de REYNOLDS
- Ri : nombre de RICHARDSON
- S : critère d'efficacité d'un brise vent
- U_* : vecteur vitesse en coordonnées cartésiennes
- U : vitesse de frottement
- \hat{U} : vitesse réduite
- Zo : paramètre de rugosité
- α : constante ou angle
- ϵ : efficacité d'un brise vent
- ζ : coefficient de perte de charge
- $\eta = \frac{Z}{H}$: altitude réduite
- $\xi = \frac{X}{H}$: abscisse réduite
- ρ : masse spécifique de l'air
- τ_p : contrainte pariétale
- ϕ : porosité géométrique d'un brise vent,

Les brise vent sont des obstacles matériels, disposés à la surface du sol et destinés à réduire la vitesse du vent au voisinage de celle-ci. Ils peuvent être constitués par des claies, des murs, des haies vives, des rideaux d'arbres, etc...

La réduction du vent s'accompagne d'une modification des échanges de chaleur et de masse (vapeur d'eau, gaz carbonique) entre la surface du sol (prise dans le sens large) et l'atmosphère, ce qui se traduit par un microclimat différent. L'intérêt des brise vent est donc multiple.

Grâce à leurs effets aérodynamiques, ils permettent de réduire les dégâts mécaniques, causés par le vent aux cultures, les transports éoliens (érosion éolienne ou transport de neige en hiver). D'autre part, ils agissent indirectement sur la production agricole en créant généralement des conditions microclimatiques favorables à la croissance et au développement des végétaux (élévation de la température diurne, réduction de l'évaporation...). Cependant, si l'emploi des brise vent dans l'agriculture remonte à la nuit des temps (la "Goutha" de Damas, le bocage de l'Ouest en France...), leur étude scientifique n'a commencé qu'au début du siècle. En effet, à cette époque s'est posé le problème de la mise en valeur de vastes espaces soumis à des conditions climatiques sévères (landes du Jutland, steppes russes, grandes plaines des Etats Unis d'Amérique et du Canada) (GUYOT 1964-1970, VAN EIMERN et al 1964). C'est pourquoi les agronomes, puis à partir de 1930 les physiciens, s'intéressèrent à cette question.

En dehors des applications purement agronomiques, les brise-vent peuvent être utilisés dans un certain nombre d'autres domaines concernant l'urbanisme ou l'industrie. Ainsi, ils peuvent être utilisés avec succès pour protéger des bâtiments des effets mécaniques du vent ou pour créer un microclimat plus confortable pour les habitants. Dans les installations de chauffage solaire, ils apportent une protection des panneaux limitant les pertes de chaleur par convection et assurant donc un meilleur rendement des capteurs (notamment des capteurs plans). Il faut noter qu'accessoirement ils permettent de dissimuler les capteurs. Enfin, ils peuvent être utilisés pour réduire de façon sensible les pertes de chaleur des piscines par évaporation.

Actuellement, nous disposons d'une masse importante d'informations parfois contradictoires sur les différents effets des brise vent. Cet exposé tente de faire le point des connaissances actuelles sur les effets aérodynamiques des brise vent dont dépendent toutes les modifications des autres facteurs microclimatiques.

1 - DEFINITIONS

Afin de simplifier l'exposé, il est indispensable de définir un certain nombre de termes qui seront très fréquemment utilisés.

1.1 - BRISE VENT

Le brise vent sera considéré comme un obstacle plan, mince, plus ou moins poreux, de longueur infinie, fixé sur un plan rugueux au-dessus duquel se développe une couche limite turbulente. Il est destiné à modifier la loi de répartition de vitesse du vent au voisinage de ce plan.

Nous distinguerons la zone "au vent" située du côté d'où vient le vent et la zone "sous le vent" située du côté où va le vent.

La zone dans laquelle l'effet du brise vent ne se fera pas sentir sera appelée la "zone ouverte".

1.2 - SYSTÈME D'AXES EMPLOYÉ

Nous supposerons que l'écoulement moyen de l'air au voisinage du sol est bidimensionnel. Nous supposerons également que le vecteur vent est horizontal et normal au brise vent. Dans ces conditions, il suffira d'étudier l'écoulement de l'air dans un plan vertical parallèle au vecteur vent.

L'origine des axes rectangulaires choisis (O_x et O_z) sera située au pied du brise vent. L'axe des x sera orienté dans le sens du vent et l'axe des z vers le haut.

1.3 - COORDONNÉES RÉDUITES

Afin de pouvoir comparer facilement les différents résultats expérimentaux, nous avons pris comme unité de mesure sur les axes de coordonnées la hauteur H du brise vent et nous avons posé :

$$\xi = \frac{x}{H} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{z}{H} \quad (2)$$

1.4 - VITESSES RÉDUITES

Pour les mêmes raisons, les vitesses moyennes ont été exprimées en valeurs relatives.

- soit en fonction de la vitesse moyenne mesurée en témoin au même niveau :

$$\hat{U}(\xi, \eta) = \frac{\bar{U}(x, z)}{\bar{U}_0(z)} = \frac{\bar{U}(\xi, \eta)}{\bar{U}_0(\eta)} \quad (3)$$

- soit en fonction de la vitesse moyenne mesurée en témoin à un niveau Z_1 de référence :

$$\hat{U}_1(\xi, \eta) = \frac{\bar{U}(x, z)}{\bar{U}_0(z_1)} = \frac{\bar{U}(\xi, \eta)}{\bar{U}_0(\eta_1)} \quad (4)$$

1.5 - EFFICIENCE D'UN BRISE VENT

L'efficacité ϵ d'un brise vent à la distance ξ et à l'altitude η sera définie par :

$$\epsilon = 1 - \frac{\bar{U}(\xi, \eta)}{\bar{U}_0(\eta)} = 1 - \hat{U}(\xi, \eta) \quad (5)$$

KONSTANTINOV (1966) considère pour caractériser les brise vent leur efficacité moyenne $\bar{\epsilon}$:

$$\bar{\epsilon}(\eta) = \frac{1}{\xi} \int_0^{\xi} \epsilon(\xi, \eta) d\xi \quad (6)$$

dans la pratique, il a pris comme limite pour ses déterminations $\xi = 30$.

2 - INFLUENCE DES CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DES BRISE VENT

Les effets aérodynamiques d'un brise vent vont tout d'abord dépendre de ses caractéristiques géométriques (porosité, hauteur, longueur, forme de la section transversale). Nous allons donc examiner le rôle joué par ces différents facteurs.

2.1 - DESCRIPTION DE L'ÉCOULEMENT DE L'AIR AU VOISINAGE D'UN BRISE VENT

Le schéma de la figure 1 dû à PLATE (1971) illustre la complexité de l'écoulement de l'air au voisinage d'un brise vent. Celui-ci est placé sur un sol plan rugueux dans une couche limite turbulente. Dans la zone (1) l'écoulement n'est pas perturbé et le profil de vitesse indiqué est semi-logarithmique (GUYOT 1976). Dans la zone (2) l'écoulement est déplacé et déformé à cause de la présence du brise vent. La zone 3 est le siège de mouvements tourbillonnaires d'autant plus importants que le brise vent est moins perméable. Enfin, la zone 4 correspond au rétablissement d'une couche limite turbulente interne. Les parties hachurées représentent les zones de transition.

D'après NÄGELI (1953), l'écoulement peut être perturbé jusqu'à une altitude $\eta = 3$ à 4 et l'extension dans le plan horizontal peut aller de $\xi = -3$ à -6 à $\xi = +15$ à $+50$ selon les conditions expérimentales.

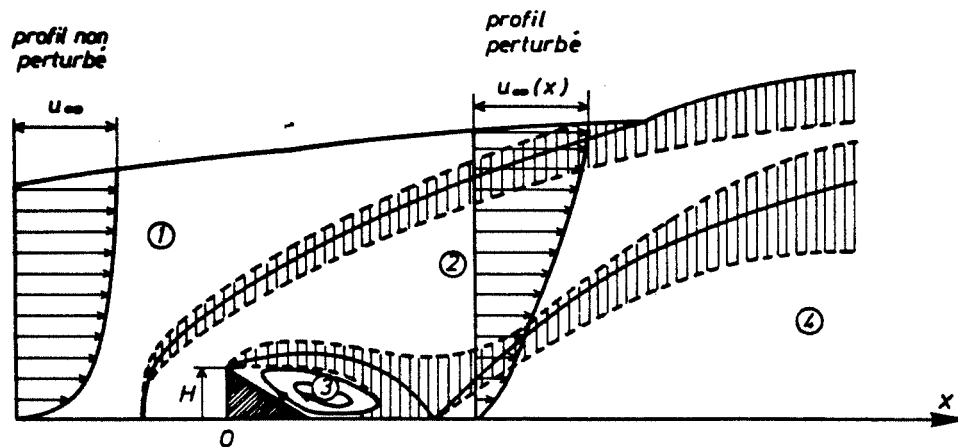


Fig. 1 - Les différentes zones d'écoulement dans une couche limite turbulente perturbée par un brise vent :

- 1 - Couche limite non perturbée
- 2 - Zone d'influence du brise vent
- 3 - Zone de tourbillons stationnaires
- 4 - Rétablissement d'une couche limite turbulente interne
(d'après PLATE 1971)

2.2 - INFLUENCE DE LA POROSITÉ D'UN BRISE VENT SUR LA RÉDUCTION DU VENT

Le facteur le plus important dont dépend la protection exercée par un brise vent est sa porosité ϕ .

De très nombreux travaux ont été consacrés à ce problème et plusieurs synthèses bibliographiques tentent de faire le point sur cette question (VAN EIMERN 1964, CABORN 1957, GUYOT 1964 et 1972). De plus, un certain nombre de travaux récents apportent quelques informations nouvelles permettant de mieux comprendre le mécanisme d'action des brise vent (PLATE 1971, RADKE, HAGSTROM 1974).

2.2.1 - L'ÉCOULEMENT DE L'AIR AU VOISINAGE DE BRISE VENT DE DIFFÉRENTES POROSITÉS

Les figures 2 et 3 représentent les réseaux de courbes iso-vitesse $\hat{U}_1(\xi, \eta) = \text{cte}$ tracées au voisinage d'un brise vent imperméable et d'un brise vent perméable. Les courbes ainsi tracées ne sont pas des lignes de courant. Toutefois, les mesures ayant été effectuées avec des anémomètres à moulinet qui donnent sensiblement le module du vecteur vent pour des inclinaisons de celui-ci de $\pm 50^\circ$ sur le plan horizontal (GUYOT 1970-1972), les courbes qui ont été tracées sont certainement très proches des lignes de courant, sauf dans les zones où elles sont très inclinées sur le plan horizontal, c'est-à-dire au voisinage immédiat du brise vent.

La figure 2 met en évidence l'existence d'un vaste mouvement tourbillonnaire à l'aval du brise vent imperméable, alors qu'à l'aval du brise vent perméable un tel mouvement n'existe pas. Un brise vent imperméable a pour effet de dévier vers le haut l'ensemble de la veine incidente, la section de passage étant réduite la veine défléchie est en état de survitesse. Cet accroissement de vitesse U s'accompagne d'une diminution de la pression statique P comme l'indique la loi de BERNOULLI :

$$P + \rho \frac{U^2}{2} = \text{cte} \quad (7)$$

Par ailleurs, la courbure des lignes de courant provoque également un appel d'air par effet COANDA qui peut se traduire par l'équation (PLATE 1971) :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{\rho U^2} \frac{\partial P}{\partial Z} \quad (8)$$

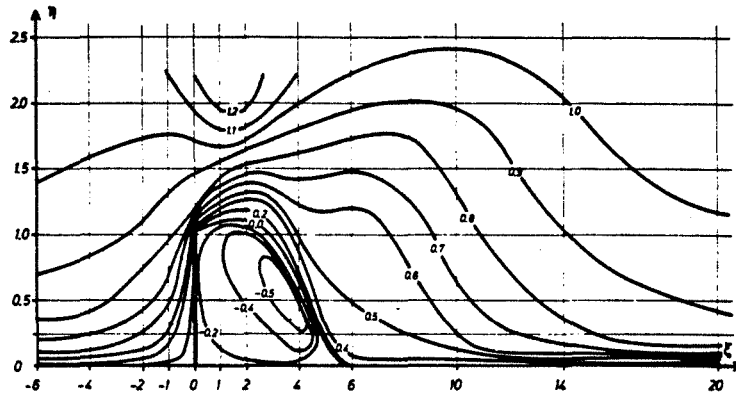


Fig. 2 - Réseau de courbes isovitesse $\hat{U}_1(\xi, \eta) = Cte$ au voisinage d'un brise vent imperméable de 2 m de haut. La vitesse de référence en témoin est mesurée au niveau de l'arrête supérieure du brise vent (2m) (MONTFAVET 23/9/69).

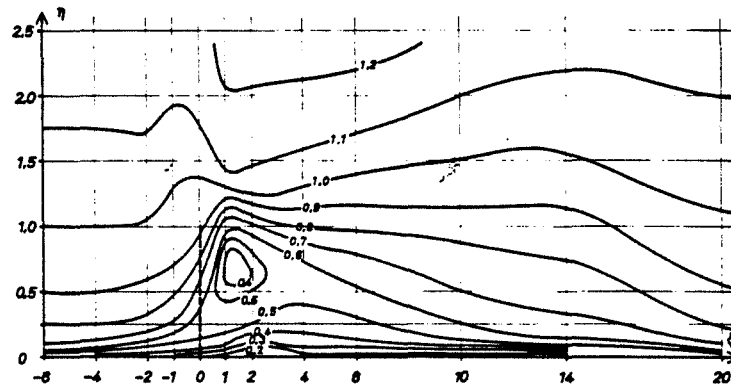


Fig. 3 - Réseau de courbes isovitesse $\hat{U}_1(\xi, \eta) = Cte$ au voisinage d'un brise vent perméable de 2 m de haut ($\phi = 0,50$). La vitesse de référence est mesurée en témoin au niveau de l'arrête supérieure du brise vent (2 m) (MONTFAVET Octobre, Décembre 1969)

dans laquelle R est le rayon de courbure de la ligne de courant. La figure 4 montre de façon schématique les forces agissant sur une particule d'air élémentaire d'épaisseur Δz suivant une ligne de courant.

L'effet COANDA traduit l'action de la force centrifuge sur cette particule qui est d'autant plus importante que le rayon de courbure est plus faible.

Ainsi, il existe dans la zone "sous le vent", grâce à la combinaison des deux effets qui viennent d'être décrits, un appel d'air vers le haut qui doit être compensé par un mouvement horizontal et de sens opposé à l'écoulement général. Il se produit donc derrière un brise vent imperméable un vaste tourbillon dont l'axe est horizontal et parallèle à ce brise vent. La veine défléchie, en état de dépression aura donc tendance à se rabattre très rapidement sur le sol, si bien que l'action d'un brise vent imperméable se manifestera sur une distance relativement courte.

Lorsque le brise vent est perméable (figure 3), une partie seulement de la veine incidente est déviée, l'accroissement de la vitesse du vent au-dessus du brise vent est donc moins important. La courbure des lignes de courant est également plus faible.

Par ailleurs, le débit d'air à travers le brise vent s'oppose à la formation du tourbillon. Ainsi, la veine défléchie n'a pas tendance à se plaquer aussi rapidement au sol et la zone dans laquelle un brise vent perméable fera sentir son action sera plus étendue que pour un brise vent imperméable.

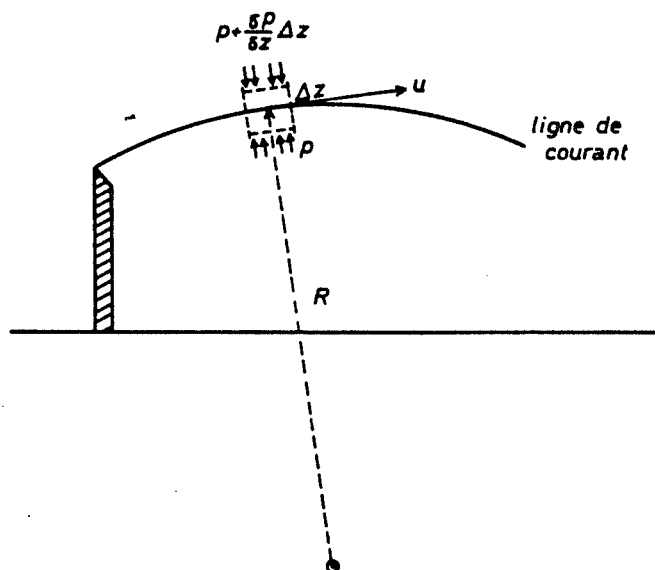


Fig. 4 - Illustration schématique de l'effet COANDA.

Ce phénomène a été constaté par de très nombreux expérimentateurs (VAN EIMERN et al. 1964). Ainsi, le tableau I dû à NÄGELI (1946) donne la variation de la vitesse réduite $\hat{U}(\xi, \eta)$ au niveau $\eta = 0,5$ pour des brise vent de différentes porosités.

Nous pouvons constater qu'au voisinage du brise vent $\hat{U}(\xi, \eta)$ est d'autant plus faible que celui-ci est moins perméable. Mais nous remarquons également qu'après être passé par un minimum, $\hat{U}(\xi, \eta)$ croît beaucoup plus rapidement pour le brise vent peu perméable que pour le brise vent perméable. Ainsi, le tableau I qui donne dans ses trois dernières colonnes la valeur moyenne de $\hat{U}(\xi, \eta)$ calculée pour ξ compris entre 0 et 10, 0 et 20 et 0 et 30, montre qu'un classement s'opère pour les différents brise vent. La valeur de $\hat{U}(\xi, \eta)$ la plus faible est obtenue avec le brise vent B (moyennement dense) alors que la plus forte tout d'abord obtenue avec le brise vent lâche A ($0 < \xi < 10$), l'est ensuite pour le brise vent très dense D. L'efficience du brise vent moyennement dense est donc la plus grande.

Les figures 5 et 6 représentent également un résultat classique. Elles montrent l'évolution de $\hat{U}(\xi, \eta)$ en fonction de ξ et à différents niveaux η pour deux brise vent de porosité $0,45 < \phi < 0,55$ et $0,15 < \phi < 0,25$. Ces figures mettent bien en évidence l'existence d'une survitesse, pour $\eta > 1$ et ξ voisin de zéro, qui est beaucoup plus marquée pour le brise vent peu perméable que pour le brise vent perméable.

Claies \ ξ	- 10	- 5	0	0	2,5	5	10	15	20	0	0	0
	à - 5	à 0	0	à 2,5	à 5	à 10	à 15	à 20	à 30	à 10	à 20	à 30
A	0,98	0,98	0,67	0,49	0,41	0,63	0,82	0,92	0,98	0,54	0,70	0,80
B	0,99	0,87	0,57	0,45	0,35	0,48	0,72	0,85	0,94	0,44	0,61	0,72
C	0,99	0,85	0,48	0,29	0,33	0,58	0,80	0,90	0,97	0,44	0,65	0,76
D	0,99	0,85	0,35	0,22	0,46	0,72	0,87	0,93	0,98	0,52	0,71	0,80

TABLEAU I - Vitesse réduite moyenne $\hat{U}(\xi, \eta)$ du vent au niveau $\eta = 0,5$ et à différentes distances de brise vent constitués par des claies de roseaux de différentes densités (A. Lâche - B. Moyenne - C. Dense - D. Très dense) (d'après NÄGELI 1946).

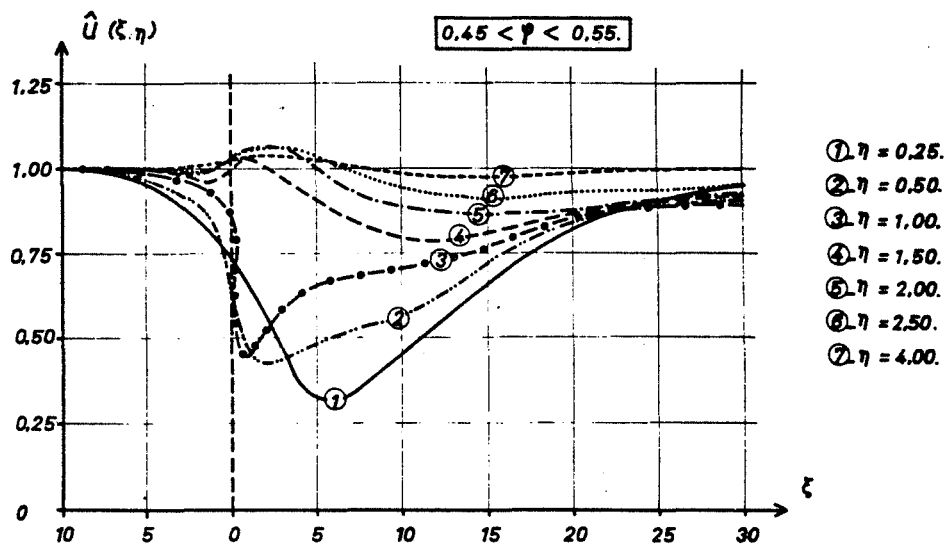


Fig. 5 - Influence d'un brise vent perméable de 2,2 m de haut, constitué par une claie de roseaux, sur la vitesse réduite du vent à différents niveaux (d'après NÄGELI 1953).

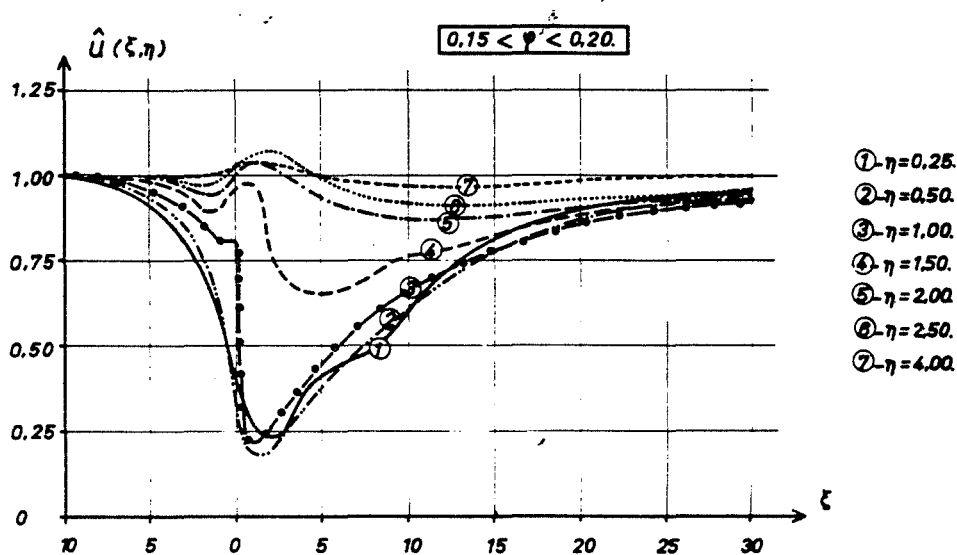


Fig. 6 - Influence d'un brise vent peu perméable de 2,2 m de haut, constitué par une claie de roseaux, sur la vitesse réduite du vent à différents niveaux (d'après NÄGELI 1953).

Pour $\eta < 1$, les courbes représentatives de $\hat{U}(\xi, \eta)$ ont toutes la même allure. Elles passent toutes par un minimum dont la position semble varier en fonction de la porosité et de l'altitude. Après ce minimum $\hat{U}(\xi, \eta)$ croît et tend vers 1, avec une pente d'autant plus forte que ϕ est plus faible.

Les figures 5 et 6 montrent également que l'écoulement est perturbé dans le plan vertical jusqu'à $\eta = 4$.

Ces résultats ont été obtenus à l'aide d'anémomètres à moulinet qui ne permettent pas de suivre les fluctuations turbulentes de l'écoulement. L'image de l'écoulement ainsi déterminée ne peut rendre compte des phénomènes réels qui se produisent dans le sillage d'un brise vent. Des travaux beaucoup plus récents ont permis de combler cette lacune.

2.2.2. - INFLUENCE DES BRISE VENT SUR LA TURBULENCE DE L'ÉCOULEMENT

La figure 7 représente le résultat des études effectuées par BALTAXE (1967) en soufflerie. Il a exploré l'écoulement dans la zone sous le vent d'un brise vent à l'aide d'une petite girouette à axe horizontal dont il notait l'orientation. Cette figure montre bien l'existence, à l'aval d'un brise vent imperméable, d'un vaste mouvement tourbillonnaire, qui s'éloigne et disparaît lorsque la porosité augmente. Elle met en évidence également l'existence d'une intense turbulence dans le sillage des brise vent imperméables ou peu perméables, qui disparaît lorsque la porosité augmente.

Ces résultats expérimentaux montrent l'existence de deux régimes d'écoulement : le premier lorsque $\phi < 0,25$, le second lorsque $\phi > 0,25$. Le passage d'un type d'écoulement à l'autre s'effectue de façon assez brutale comme le montrent les travaux de CASTRO (1971) qui a étudié le sillage de différentes plaques perforées en soufflerie. Il a en effet constaté que si $\phi < 0,22$, l'écoulement est très instable et il s'établit une rue de tourbillons dans le sillage de la plaque, alors que si $\phi > 0,22$ l'écoulement se stabilise et les tourbillons disparaissent.

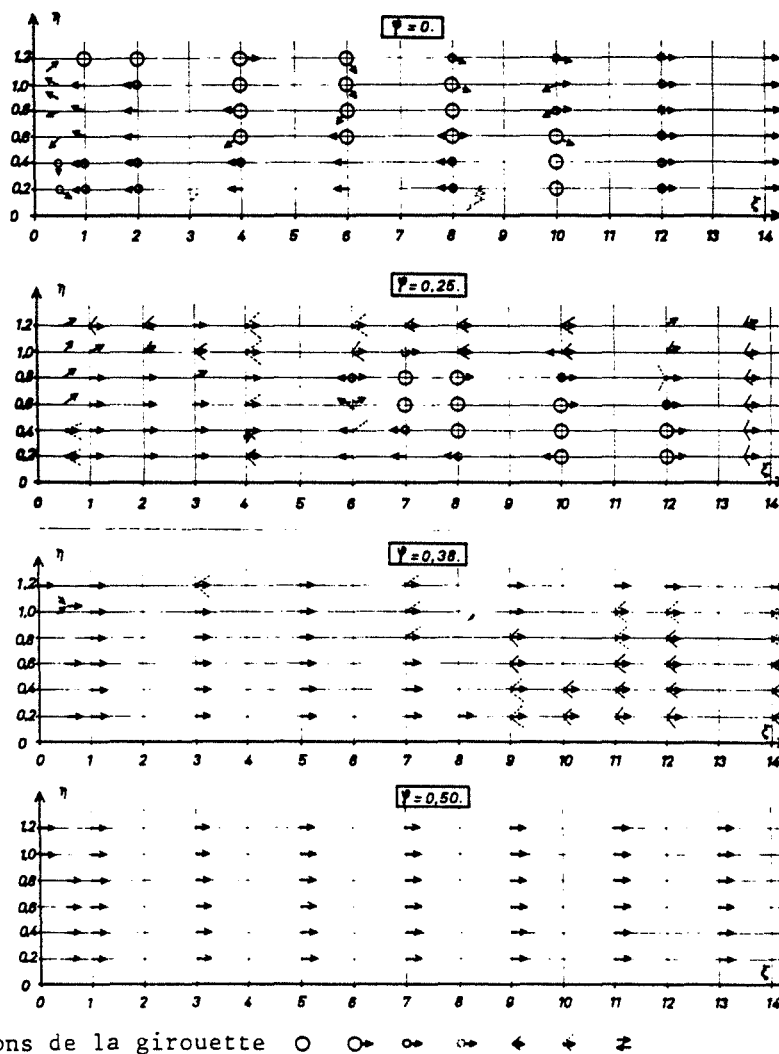


Fig. 7 - Représentation schématique des différentes positions prises par une girouette dont l'axe est horizontal et qui est utilisée pour explorer la zone "sous le vent" de brise vent de porosité ϕ différentes en soufflerie.

Les symboles utilisés pour représenter les positions de la girouette sont regroupés au bas de la figure et correspondent de gauche à droite au passage d'un tourbillon sans orientation privilégiée à un courant stable en direction (d'après BALTAXE 1967).

Ainsi les brise vent peu perméables ont pour effet d'accroître la turbulence de l'écoulement alors que les brise vent perméables ne la modifient pas sensiblement, comme le confirment les mesures de taux de turbulence effectuées par HAGEN et SKIDMORE (1971) et RADKE et HAGSTROM (1974). Par ailleurs, le minimum de vitesse observé sur les figures 5 et 6 correspond d'après ces mesures à la valeur maximum du taux de turbulence, ce que ne permettent pas de mettre en évidence les anémomètres à moulinet généralement utilisés. Enfin, les mesures effectuées semblent montrer que les brise vent ont pour effet de créer, dans leur sillage, des tourbillons dont l'échelle est d'un ordre de grandeur voisin de leur hauteur.

2.2.3. - RECHERCHE DE LA POROSITE OPTIMALE

Ce qui vient d'être dit dans les paragraphes précédents laisse supposer qu'il doit exister une valeur optimale de la porosité pour laquelle le produit de la longueur de la zone d'action d'un brise vent par son efficacité sera maximum. Le critère d'efficacité S du brise vent proposé par JENSEN (1954) peut s'écrire :

$$S = \int_0^{\infty} \epsilon(\xi, \eta) d\xi = \int_0^{\infty} (1 - \hat{U}(\xi, \eta)) d\xi \quad (9)$$

S est un nombre sans dimension.

Comme les courbes représentatives de $\hat{U}(\xi, \eta)$ tracées en fonction de η varient également avec ξ (figures 5 et 6), il est nécessaire de choisir un niveau de référence. Celui qui a généralement été retenu est $\eta = 0,5$ car, à ce niveau, les courbes représentent sensiblement l'écoulement moyen dans la zone de hauteur égale à celle du brise vent.

Les faibles valeurs de $\epsilon(\xi, \eta)$ ne présentant pas d'intérêt, il est préférable de donner une limite arbitraire à la longueur de la zone protégée. Nous appellerons *longueur protégée* ξ_1 au niveau η , la distance du brise vent à laquelle l'efficacité $\epsilon(\xi, \eta)$ devient inférieure à une valeur ϵ_1 fixée arbitrairement. Cette valeur est en générale prise égale à 0,10 ou 0,20.

Le critère d'efficacité aura donc une nouvelle définition pratique :

$$S = \int_0^{\xi_1} \epsilon(\xi, \eta) d\xi \quad (10)$$

JENSEN (1954) a pris pour ses calculs $\eta = 0,4$ et $\epsilon_1 = 0,10$. Les résultats qu'il a obtenus sont représentés sur la figure 8 qui montre que les courbes $S(\phi)$ passent pour un maximum pour $\phi = 0,40$ dans le cas du plancher lisse et $\phi = 0,35$ dans le cas du plancher rugueux. La porosité optimale d'un brise vent est donc, d'après JENSEN, comprise entre 0,35 et 0,40. De nombreux autres expérimentateurs ont essayé de déterminer également cette valeur, soit par des mesures sur modèle en soufflerie, soit par des mesures sur le terrain. Les résultats qu'ils ont obtenus sont assez dispersés, comme le montre le tableau II.

Ceci laisse penser que la porosité n'est pas le seul facteur dont dépend l'efficacité d'un brise vent. Par ailleurs, le critère d'efficacité qui a été choisi n'a de sens que si $\hat{U}(\xi, \eta)$ est positif. Lorsque $\phi < 0,25$, il existe un courant de retour dans la zone sous le vent d'un brise vent et la méthode proposée n'est plus valable. Pour lever cette difficulté, les différents expérimentateurs ont pris alors $|\hat{U}(\xi, \eta)|$, ce qui est également très discutable. Toutefois, il faut remarquer que toutes les valeurs optimales de ϕ déterminées sont généralement supérieures à 0,25 et dans ce cas la méthode peut être appliquée.

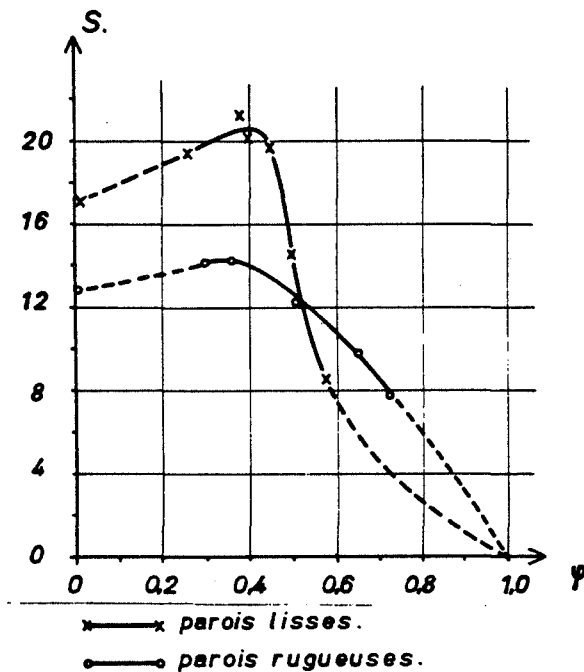


Fig. 8 - Evolution du critère d'efficacité S d'un brise vent en fonction de sa porosité ϕ . Les mesures ont été effectuées en soufflerie avec deux types de rugosité du plancher (d'après JENSEN 1954).

Auteurs	Année	Conditions expérimentales	ϕ optimale
NOKKENTVED	1938	Conditions naturelles	0,40 - 0,50
NÄGELI	1946	Conditions naturelles	0,40 - 0,50
KONSTANTINOV	1950	Conditions naturelles	0,20 - 0,40
JENSEN	1954	Soufflerie	0,35 - 0,40
BLENK ET TRIENES	1956	Soufflerie	0,40 - 0,50
SCHULTZ ET KELLY	1960	Conditions naturelles	0,25 - 0,60
TANI	1960	Soufflerie	0,30

TABLEAU II - Valeurs optimales de ϕ obtenues par différents expérimentateurs.

2.2.4. - INSUFFISANCE DE LA NOTION DE POROSITE

BLENK et TRIENES (1956) ont comparé en soufflerie les effets aérodynamiques de trois grilles métalliques de 30 [mm] de haut de même porosité : $\phi = 0,50$ mais perforées de trous circulaires, régulièrement répartis, de diamètres différents : 2,5 et 8 [mm]. Les grilles dont les trous ont 2 et 5 [mm] de diamètre réduisaient la vitesse du vent de façon assez semblable. Par contre, la grille dont les trous ont 8 [mm] de diamètre réduisait la vitesse du vent sur une distance beaucoup plus courte que les deux autres.

Ce même phénomène a également été mis en évidence par TANI (1958) sur modèle en soufflerie où il a utilisé des barrières de même porosité, constituées par des lamelles de bois de 5, 10 et 15 [mm] de large.

L'utilisation de la porosité seule pour caractériser un brise vent est donc insuffisante. Il faut tenir compte à la fois de la forme et de la dimension des ouvertures. Aussi il serait intéressant de prendre le coefficient de perte de charge ζ qui dépend à la fois de la porosité et de la forme et des dimensions des ouvertures.

Lorsqu'une grille est fixée à l'intérieur d'une conduite lisse A C (figure 9), normalement à l'écoulement son coefficient de perte de charge se définit par (BRUN et MARTINOT - LAGARDE 1960) :

$$\Delta P = \zeta \rho \frac{U_q^2}{2} \quad (11)$$

P : pression totale $P = P_s + \rho \frac{U_q^2}{2}$

P_s : pression statique

U_q : vitesse de débit

Si la conduite est parfaitement lisse, on peut admettre que :

$$U_q \sim U \quad (12)$$

et l'on obtient alors :

$$\zeta = \frac{P_{s1} - P_{s2}}{\rho \frac{U^2}{2}} \quad (13)$$

Avec un dispositif semblable à celui qui est schématisé sur la figure 9, il est alors possible de déterminer les coefficients de perte de charge de différentes grilles destinées à la confection de brise vent.

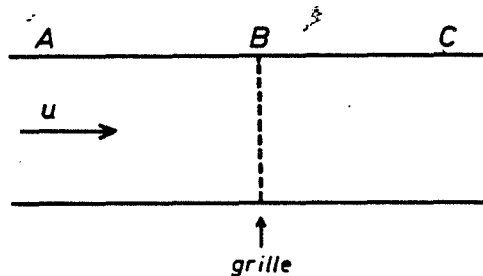


Fig. 9 - Schéma illustrant la manière dont est mesuré le coefficient de perte de charge d'une grille.

2.2.5 - INFLUENCE DU COEFFICIENT DE PERTE DE CHARGE DES BRISE VENT

Cinq grilles en matière plastique tissées ou extrudées ont été étudiées dans les conditions naturelles dans la région parisienne sur un plateau bien dégagé (LA MINIERE, près de VERSAILLES) et dans la basse vallée du Rhône, près d'AVIGNON (MONTFAVET). Ces grilles se caractérisaient par des porosités et des coefficients de perte de charge différents (GUYOT 1972). La figure 10 représente les différentes grilles utilisées.

Les mesures de coefficients de perte de charge ont été effectuées pour des vitesses de vent comprises entre 5 et 25 [m. s⁻¹] et elles ont montré que ζ dans cette gamme était pratiquement indépendant de U. Le tableau III regroupe les valeurs moyennes des caractéristiques aérodynamiques des grilles étudiées. Les grilles 1, 2 et 3 sont extrudées et les brins présentent une face légèrement plus plane que l'autre.

Les séries de mesures effectuées ont permis de montrer que :

- des grilles de même porosité mais dont les coefficients de perte de charge étaient différents avaient des effets aérodynamiques différents. La vitesse du vent est d'autant plus réduite que le coefficient de perte de charge est plus grand.
- des grilles de porosité différente mais possédant le même coefficient de perte de charge ont les mêmes effets aérodynamiques.

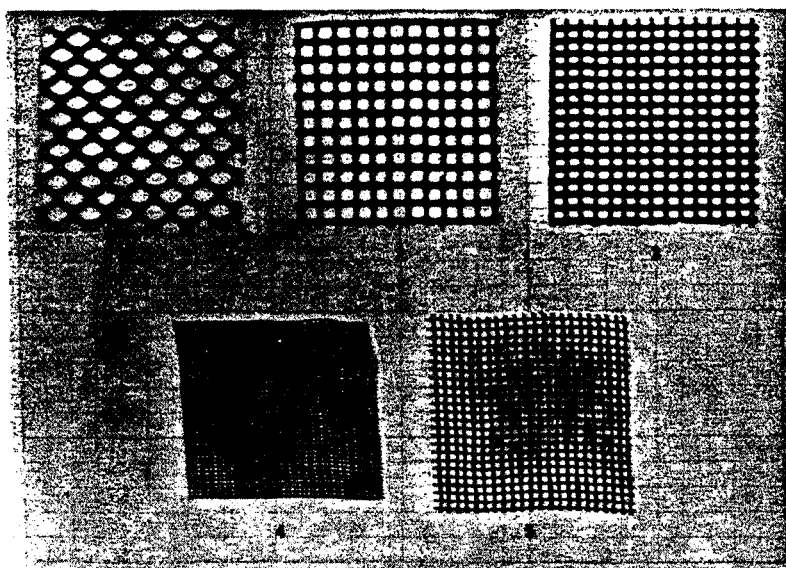


Fig. 10 - Les différentes grilles en matière plastique étudiées.

Grille	Position	ζ	ϕ	a
1	Plat aval	1,39	0,52	0,92
	Plat amont	1,42	0,52	0,91
2	Plat aval	2,65	0,49	0,76
	Plat amont	2,82	0,49	0,74
3	Plat aval	5,17	0,40	0,76
	Plat amont	5,49	0,40	0,75
4	-	2,53	0,50	0,77
5	-	1,33	0,65	0,71

TABLEAU III - Caractéristiques aérodynamiques moyennes des grilles étudiées.

Ces deux propositions sont illustrées par la figure 11, qui correspond à des mesures effectuées à LA MINIERE et à MONTFAVET. Les écarts qui peuvent être constatés entre les courbes correspondant aux mêmes brise vent, placés dans des lieux différents seront expliqués dans le chapitre suivant.

En opérant de la même manière que dans le paragraphe 2.2.3., il doit être possible de déterminer une valeur optimale du coefficient de perte de charge d'un brise vent. La figure 12 représente la variation du critère d'efficacité S précédemment défini en fonction de $1/\zeta$ dans les deux sites expérimentaux. Elle montre qu'il existe effectivement, dans la région parisienne, une valeur optimale de $1/\zeta$ (0,36) soit $\zeta \approx 2,8$.

Pour un brise vent constitué par une grille, il peut être intéressant de connaître la relation liant le coefficient de perte de charge à la porosité. Dans le dispositif de mesure qui a été utilisé pour déterminer ζ , la perte de charge est presque uniquement due à l'élargissement des veines élémentaires à la sortie des trous de la grille. L'effet d'orifice ne s'accompagne que d'une très faible perte de charge (BRUN, MARTINOT, LAGARDE 1960). Il suffit donc, pour calculer la perte de charge, de tenir compte de l'élargissement de la section de aA à A (a coefficient de contraction - A aire de la veine).

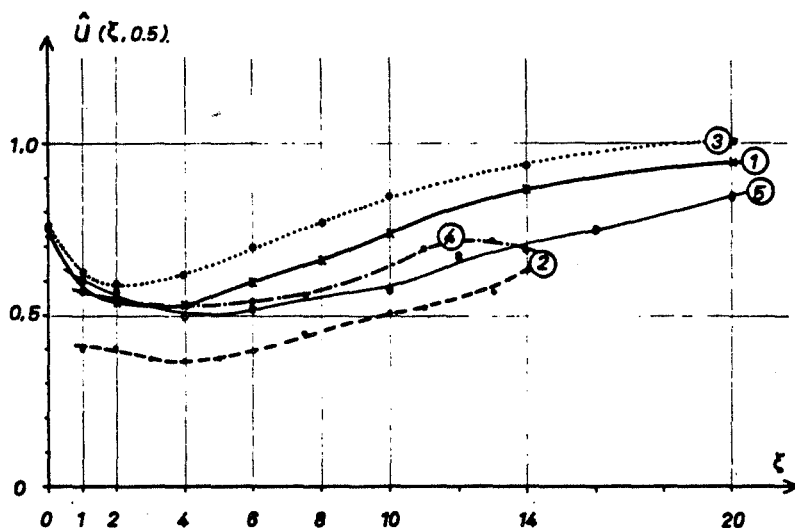


Fig. 11 - Variation de $\hat{U}(\xi, \eta)$ au niveau $\eta = 0,50$ en fonction du type de grille et de son lieu d'implantation :

- 1 - Grille n° 2 MONTFAVET
- 2 - Grille n° 2 LA MINIERE
- 3 - Grille n° 1 MONTFAVET
- 4 - Grille n° 1 LA MINIERE
- 5 - Grille n° 5 LA MINIERE

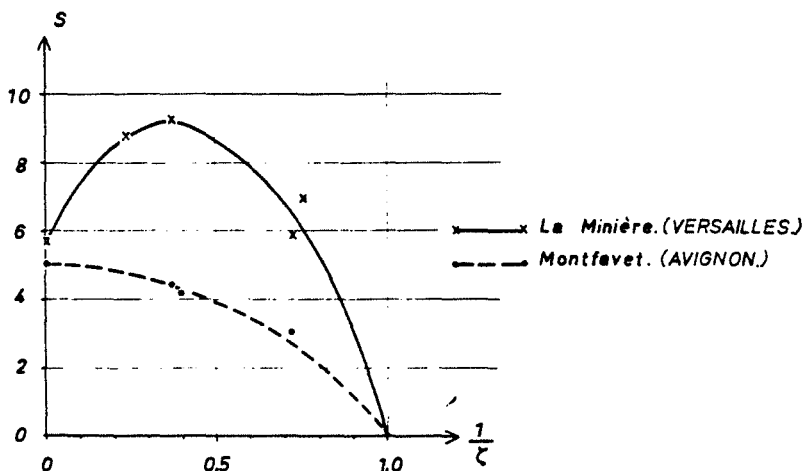


Fig. 12 - Variation présumée de S en fonction de τ . Le nombre de points expérimentaux est insuffisant et les courbes sont tracées par analogie avec les résultats de JENSEN (1954).

La relation de CARNOT, relative aux pertes de charge singulières, peut s'écrire, si U_e est la vitesse de l'air dans la veine contractée et U la vitesse dans la veine droite :

$$\Delta H = \frac{1}{2g} (U_e - U)^2 = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad (14)$$

ΔH : perte de charge

Or,

$$\frac{U_e}{U} = \frac{1}{a\phi} \quad (15)$$

d'où, d'après (10) :

$$\tau = \left(\frac{1}{a\phi} - 1 \right)^2 \quad (16)$$

et :

$$a = \frac{1}{\phi (1 + \sqrt{\xi})} \quad (17)$$

Les valeurs de coefficient de contraction a sont données dans la dernière colonne du tableau III. Les valeurs obtenues se classent très bien en fonction du type de grille étudié. La plus faible valeur de a est obtenue avec la grille n° 5 qui comporte à la fois des bandelettes de plastique et des crins cylindriques. Ensuite les grilles 2 et 3 qui proviennent du même fabricant ont sensiblement la même valeur de a . La grille 4 qui est une grille tissée à petites mailles provoque également une contraction importante. Par contre, la grille 1 qui a des brins de section ovoïde, donc assez aérodynamiques, ne produit qu'une très faible contraction.

2.2.6. - CAS DES BRISE VENT DONT LA POROSITE VARIE AVEC LA HAUTEUR

Dans les conditions naturelles, les brise vent constitués par des rideaux d'arbres ont rarement une porosité homogène sur toute leur hauteur; aussi un essai a été entrepris pour simuler de façon schématique certaines configurations de brise vent et pour mettre également en évidence le rôle joué par les différentes parties d'un brise vent.

Les mesures ont été effectuées avec un brise vent de 2 [m] de haut et de 50 [m] de long installé à LA MINIERE près de VERSAILLES. Il était constitué par trois bandes horizontales de porosité et de coefficients de perte de charge différents. Deux cas ont été étudiés :

a) *Bande imperméable en bas* : le brise vent comprenait de bas en haut : un film plastique imperméable de 0,50 [m] de haut, puis sur 0,50 [m] deux grilles superposées, la grille n° 3 et la grille n° 5 (Cf Tableau III); enfin, sur le mètre restant, la grille n° 5 seule.

b) *Bande imperméable en haut* : le brise vent comprenait trois bandes d'égales largeurs : 0,67 [m]. La bande très perméable constituée par la grille n° 5 était placée en bas; au centre se trouvaient les grilles 3 et 5 superposées et, au sommet, le film plastique.

Les figures 13 et 14 représentent les réseaux de courbes isovitesse qui ont pu être tracées au voisinage de ces deux brise vent. Lorsque la bande imperméable est en bas, le rabattement de l'écoulement à l'aval du brise vent est très rapide. Il existe au voisinage du sol un courant de retour derrière la bande imperméable. La forme générale de l'écoulement se rapproche beaucoup de celle qui a été observée à l'aval d'un brise vent imperméable (figure 2). Lorsque la bande imperméable est placée en haut, la forme de l'écoulement change complètement. La longueur protégée au niveau $\eta = 0,5$ passe de $\xi_1 = 11,5$ à $\xi_1 = 18$. La perturbation créée par le brise vent est beaucoup plus étirée et la figure 14 met bien en évidence le flux d'air qui s'engouffre à la base du brise vent. Mais, très rapidement, les perturbations supplémentaires introduites par la variation de la porosité avec l'altitude s'estompent, et au-delà de $\xi = 3$, l'écoulement est tout à fait semblable à ce que l'on peut observer du côté sous le vent d'un brise vent perméable dont la porosité est régulièrement répartie (figure 3). Le même résultat a été obtenu par NAGELI (1946) et par KUHLEWIND et al. (1955) à l'aval de rideaux d'arbres dont les troncs étaient ébranchés à la partie inférieure. KONSTANTINOV (1966) de son côté recommande l'utilisation de brise vent dont la base est très perméable et dont la porosité diminue avec l'altitude.

Cette expérience met donc en évidence le rôle fondamental joué par le soufflage à la base du brise vent. La forme de l'écoulement semble être conditionnée par la porosité du tiers inférieur du brise vent. Ce soufflage empêche la formation de courants de retour et retarde le rabattement vers le sol de la veine défléchie.

Ainsi, pour qu'un brise vent fasse sentir son action sur une distance importante, il sera indispensable que sa base soit perméable. Par ailleurs, il sera possible d'améliorer l'efficacité d'un brise vent imperméable en pratiquant des ouvertures dans sa partie inférieure, comme le proposait également BALTAJE (1967).

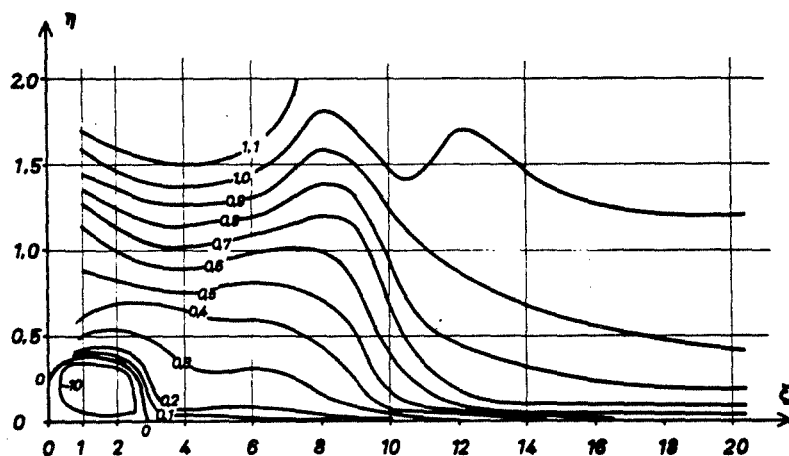


Fig. 13 - Courbes isovitesse au voisinage d'un brise vent constitué par trois bandes de porosités différentes (bande imperméable en bas).

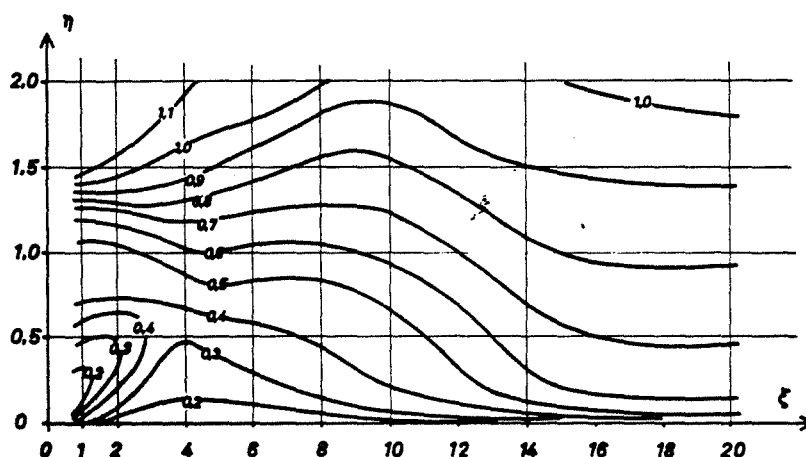


Fig. 14 - Courbes isovitesse au voisinage d'un brise vent constitué par trois bandes de porosités différentes (bande imperméable en bas)

2.3 - INFLUENCE DE LA HAUTEUR DU BRISE VENT

Les distances et les altitudes ont été exprimées en valeurs réduites en prenant la hauteur H du brise vent comme référence. Ce type de représentation est adoptée par la majorité des expérimentateurs car ils ont constaté que l'extension de la zone d'action d'un brise vent, toutes autres conditions restant égales par ailleurs, est sensiblement proportionnelle à sa hauteur (VAN EIMERN et al. 1964).

Cependant, lorsque l'on passe d'un petit brise vent (moins de 1 [m] de haut) à un très grand brise vent (plus de 10 [m] de haut), les profils d'attaque du vent se modifient de façon assez sensible car la vitesse suit une loi semi-logarithmique en fonction de l'altitude (GUYOT 1976 a). La répartition des lignes isovitesse sera donc également modifiée et, de ce fait, la longueur ξ_1 de la zone protégée, l'efficacité $\epsilon(\xi, \eta)$... Ainsi TANI (1958) propose comme loi de variation de ξ_1 en fonction de H :

$$\xi_1 = a (H)^{8/7} \quad (18)$$

a : constante.

Plus récemment, TABLER et VEAL (1971) ont étudié la variation de la réduction moyenne du vent à l'aval de barrières à neige ($\phi = 0,50$) de différentes hauteurs (1,83 [m] à 4,88 [m]). Toutes les barrières testées possédaient une ouverture à la base de 0,61 [m] de haut. Les auteurs constatent que la réduction moyenne de la

vitesse du vent, à une distance donnée et calculée entre le sol et le sommet du brise vent peut s'écrire :

$$R(x) = 1 - \frac{\int_0^H U(x, z) dz}{\int_0^H U_0(z) dz} \quad (19)$$

$$R(x) = \alpha H(H - h)^{1/2} \quad (20)$$

h : hauteur de l'ouverture
 α : constante

Cette loi traduit essentiellement l'accroissement de la réduction du vent lorsque l'importance relative de l'ouverture de la base diminue et non pas l'effet de l'accroissement de la hauteur seule. Ce résultat doit donc être utilisé avec beaucoup de prudence.

2.4 - INFLUENCE DE LA LONGUEUR DU BRISE VENT

Si l'on représente sur un plan horizontal les courbes isovitesse au voisinage d'un brise vent, on constate qu'elles s'infléchissent au voisinage de la paroi et tendent à lui devenir parallèles. L'efficacité du brise vent sera maximale lorsque le parallélisme sera réalisé. NÄGELI (1953) a trouvé que, pour arriver à ce résultat, il fallait que la longueur soit au moins égale à 11,5 H. A partir de cette valeur, toute augmentation de la longueur du brise vent se traduit par un accroissement égal de la largeur de la bande dans laquelle l'effet protecteur est maximal.

2.5 - INFLUENCE DE LA FORME ET DE LA LARGEUR DU PROFIL TRANSVERSAL

NÄGELI (1953), ainsi qu'un certain nombre d'autres expérimentateurs (VAN EIMERN et al. 1964), a montré que l'épaisseur d'un brise vent avait relativement peu d'importance, le facteur essentiel étant la porosité. Ses études l'ont amené à considérer qu'une barrière sans épaisseur a pratiquement le même effet qu'un rideau d'arbres de même porosité.

Mais il faut remarquer qu'en général, lorsque l'épaisseur d'un rideau d'arbres augmente, sa porosité diminue; il en résulte que la protection exercée par une bande forestière est plus faible que celle d'un brise vent mince, comme le montre le tableau IV.

Par ailleurs, les études effectuées en soufflerie par BLENK et TRIENES (1956) ont montré que les brise vent les plus efficaces étaient ceux qui présentaient des angles vifs à leur partie supérieure.

Obstacles	Largeur m.	Intervalles x H						
		0-5	5-10	10-15	15-20	0-5	0-10	0-20
Claie de roseaux	0	0,52	0,37	0,56	0,74	0,52	0,44	0,55
Brise vent	20	0,40	0,48	0,72	0,85	0,40	0,44	0,61
Bande forestière	600	0,55	0,75	0,83	0,89	0,55	0,65	0,86

TABLEAU IV - Valeurs moyennes de la vitesse réduite du vent $\hat{U}(\xi, \eta)$ déterminées sur différents intervalles, à l'aval de divers obstacles (d'après NÄGELI 1953).

Enfin, de nombreuses études ont été consacrées à la recherche de la meilleure forme à donner au profil transversal d'un brise vent épais, car ceux-ci permettent d'obtenir une production forestière appréciable. Beaucoup d'études insistent sur la nécessité de disposer les arbres de telle sorte que l'ensemble du rideau reste relativement perméable. Des formes inclinées du côté au vent destinées à soulever l'écoulement a montré que tout se passait comme si la porosité du brise vent avait diminué (CABORN 1956-1957). Ainsi, un profil de ce genre est généralement à déconseiller, une section rectangulaire est préférable. Toutefois dans les zones arides et en bordure de mer, lorsque les arbres ont des difficultés à s'installer, une forme inclinée avec des essences de tailles croissantes peut être conseillée.

2.6 - INFLUENCE DE L'ANGLE D'INCIDENCE DU VENT

Soit α l'angle que fait le vecteur vent avec le brise vent. Il est évident que la longueur de la zone protégée ξ_1 mesurée perpendiculairement au brise vent, sera maximale lorsque α sera égal à $\pi/2$. De nombreux travaux cités par VAN EIMERN et al. (1964) montrent que, lorsque α diminue, ξ_1 diminue également. Si l'on suppose que la porosité du brise vent reste constante quel que soit α , l'extension de la zone protégée mesurée parallèlement au vecteur vent : l sera constante et l'on aura la relation simple :

$$\xi_1 = l \sin \alpha \quad (21)$$

La figure 15 due à SEGNER (1971) montre que la réalité est beaucoup plus complexe. Lorsque l'angle d'incidence diminue, la porosité d'un brise vent constitué par un rideau d'arbres diminue car l'épaisseur de la zone traversée augmente. La forme de l'écoulement se modifie donc, et de ce fait l n'est plus constante. Par ailleurs, lorsque le vent souffle parallèlement au brise vent il subsiste encore un certain effet protecteur dû au frottement du vent à la surface du brise vent. KONSTANTINOV (1966) a mis au point une formule empirique qui permet de connaître l'influence de l'angle d'incidence du vent sur l'efficacité moyenne d'un brise vent. Si l'on appelle Z_0 le paramètre de rugosité de la face latérale d'un brise vent de longueur infinie et de hauteur infinie (ou très grande par rapport à la hauteur des cultures protégées) il est alors possible, si U_0 est la vitesse du vent à une distance x_0 prise comme référence, d'écrire dans le plan horizontal (GUYOT 1976 a) :

$$U_x = U_0 \frac{\log_e \frac{X}{Z_0}}{\log_e \frac{X_0}{Z_0}} \quad (22)$$

L'efficacité moyenne du brise vent à la distance x pourra s'écrire d'après l'expression (6) :

$$\bar{\epsilon} = \int_{Z_0}^x \frac{U_0 - U_x}{U_0} dx = 1 - \frac{1}{\log_e \frac{X_0}{Z_0}} \left(\log_e \frac{X}{Z_0} - 1 + \frac{Z_0}{X} \right) \quad (23)$$

KONSTANTINOV, à partir de nombreux résultats expérimentaux a pu établir une formule empirique donnant la variation de l'efficacité de brise vent pour des vents perpendiculaires à leur surface, en fonction de leur porosité ϕ :

$$\bar{\epsilon}_{\frac{\pi}{2}, \phi} = \bar{\epsilon}_{\frac{\pi}{2}, 0} (1 + 0,35 \sin 3\phi) \quad (24)$$

où $\bar{\epsilon}_{\frac{\pi}{2}, 0}$ est l'efficacité d'un brise vent imperméable.

La relation entre la porosité d'une bande boisée et l'angle d'incidence peut être mise sous la forme élémentaire :

$$\phi(\alpha) = \phi \sin \alpha \quad (25)$$

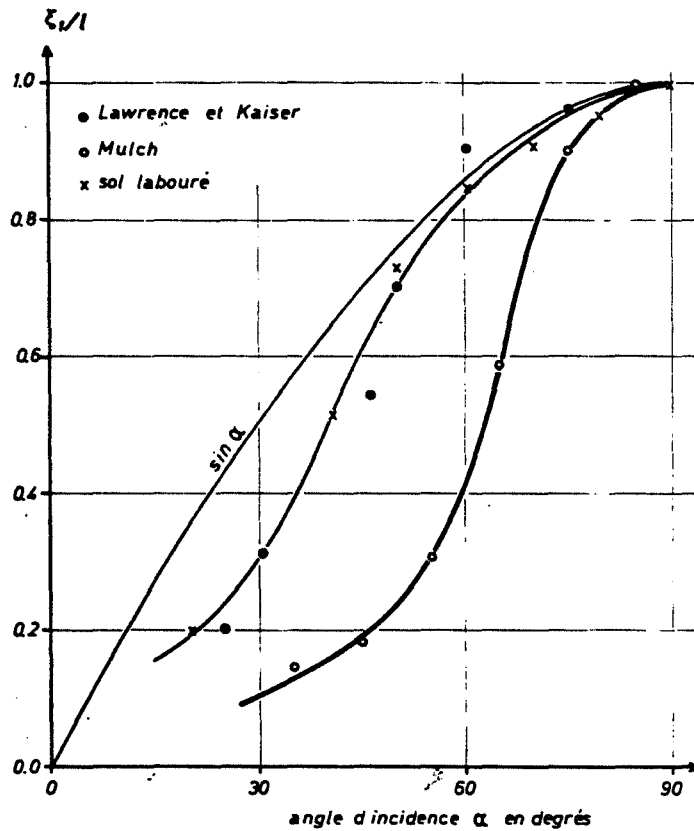


Fig. 15 - Effet de l'angle d'incidence du vent sur l'extension relative de la zone protégée ξ_1/l . l est la longueur de la zone protégée mesurée parallèlement au vent. ξ_1 est limitée à une efficacité égale à 0,2 (d'après SEGNER).

Si l'on combine l'action exercée par le rideau brise vent sur la composante du vent qui lui est parallèle et celle qui lui est perpendiculaire, il est possible d'obtenir une expression donnant son efficacité pour un vent de direction quelconque.

Ainsi, pour un brise vent imperméable :

$$\bar{\varepsilon}_{\alpha,0} = \bar{\varepsilon}_{0,0} (1 - \sin \alpha) + \frac{\bar{\varepsilon}_{\pi,0}}{2} \sin \alpha \quad (26)$$

Finalement, si l'on remarque que $\phi(\alpha) = 0$ pour le vent parallèle au brise vent, il est possible d'obtenir une expression donnant l'efficacité d'un brise vent quelconque pour un vent d'incidence α :

$$\bar{\varepsilon}_{\alpha,\phi} = \bar{\varepsilon}_{0,0} (1 - \sin \alpha) + \frac{\bar{\varepsilon}_{\pi,0}}{2} \left[1 + 0,35 \sin 3(\phi \sin \alpha) \right] \sin \alpha \quad (27)$$

$\bar{\varepsilon}_{0,0}$ est déterminé à partir de l'expression (23)

$$\frac{\bar{\varepsilon}_{\pi,0}}{2} = \frac{1}{1 + 0,068 \frac{L}{H}} \quad (28)$$

L : largeur de la bande forestière.

La figure 16 représente les variations de $\bar{\varepsilon}$ en fonction de α pour différentes valeurs de ϕ déterminées à partir des expressions précédentes. Les valeurs ainsi trouvées sont en bon accord avec les résultats expérimentaux obtenus par divers expérimentateurs soviétiques.

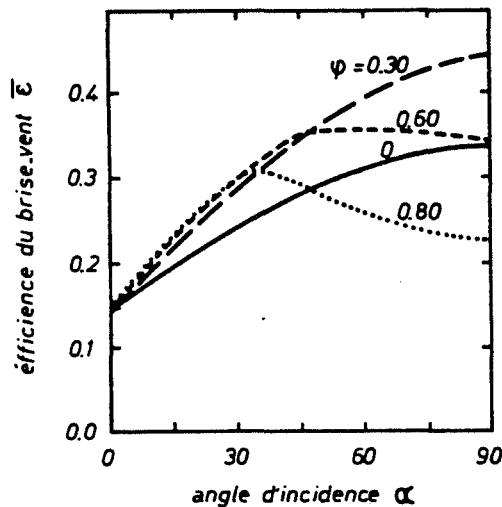


Fig. 16 - Effet de l'angle d'incidence α et de la porosité ϕ sur l'efficacité $\bar{\epsilon}$ d'un brise vent (d'après KONSTANTINOV 1966).

Il faut remarquer cependant que les formules données ne sont valables que pour des bandes forestières larges. Elles devraient certainement être modifiées pour s'appliquer au cas des brise vent minces.

2.7 - CARACTÉRISATION DES BRISE VENT³ NATURELS

S'il est facile de déterminer la porosité ou le coefficient de perte de charge d'un brise vent artificiel, il n'en est pas de même lorsqu'il s'agit de caractériser un brise vent naturel constitué par un rideau d'arbres. Aucune méthode vraiment satisfaisante n'a été mise au point jusqu'à maintenant. L'utilisation de photographies (JENSEN 1954, NOKKENTVED 1938) qui ne rend compte que de la porosité optique du brise vent ne permet de caractériser que des brise vent minces. GRUNDMAN et NIEMANN (1954) et récemment BEAN, ALPERI et FEDERER (1975) proposent de prendre comme critère caractéristique de la porosité d'un brise vent la valeur du minimum de vitesse mesurée à l'aval de celui-ci. Cette vitesse minimale est effectivement fonction de la porosité mais dépend également d'autres facteurs tels que la rugosité du plan, la stabilité de l'atmosphère, le taux de turbulence de l'écoulement, comme nous le verrons dans le paragraphe suivant.

Les travaux de WOODRUFF, FRYREAR et LYLES (1963) suivis par ceux de SEGNER et SAGI (1972), SEGNER (1972-1975), MILLER, ROSENBERG et BAGLEY (1975) montrent que les brise vent peuvent être caractérisés de façon beaucoup plus valable par leurs coefficients de traînée C_x , déterminés à partir des mesures de vitesse de vent effectuées à l'aval de ceux-ci. Cela permet, à partir d'un paramètre synthétique, d'effectuer un classement des différents brise vent.

3 - INFLUENCE DES CARACTERISTIQUES DE L'ÉCOULEMENT

3.1 - INFLUENCE DE LA VITESSE DU VENT

De nombreux expérimentateurs ont constaté que la vitesse réduite $\hat{U}(\xi, \eta)$ était pratiquement indépendante de la vitesse de référence $U_0(\eta)$. C'est ainsi que BLENK et TRIENES (1956) ont obtenu en soufflerie des profils verticaux de vitesses réduites, de forme constante pour des vitesses de vent variant de 20 à 50 [m.s⁻¹], à différentes distances d'un brise vent. Le même phénomène a été observé par WOODRUFF (1954) en soufflerie. KAISER (1959) a de son côté montré par une étude théorique que l'écoulement à l'aval d'un brise vent est indépendant du nombre de REYNOLDS. Cependant, les différents expérimentateurs qui ont effectué leurs mesures dans les conditions naturelles ont des avis beaucoup plus partagés. Si les essais ont été effectués avec des

brise vent artificiels de géométrie bien définie, ils confirment les résultats obtenus en soufflerie (LOERCH 1959, NAGELI 1946, GUYOT 1972), ou bien ils montrent que la réduction de la vitesse du vent augmente faiblement avec celle-ci (DENUYL 1936). Ce dernier effet est peut être dû à l'accroissement de la stabilité atmosphérique lorsque la vitesse augmente.

Lorsque les essais ont été effectués avec des brise vent naturels, la variation de la porosité avec la vitesse du vent joue un grand rôle (KONSTANTINOV 1966). Pour les brise vent de feuillus, les feuilles ont tendance à se placer parallèlement à l'écoulement. La porosité augmente avec la vitesse du vent, ainsi que la vitesse réduite, comme le montre le tableau V. Par contre, pour les brise vent constitués par des conifères, les branches ont tendance à se plaquer les unes contre les autres lorsque la vitesse du vent augmente, la porosité diminue alors et la vitesse réduite est plus faible (BAUMGARTNER 1961).

Ainsi, il est possible de considérer que la vitesse réduite du vent $\hat{U}(\xi, \eta)$ au voisinage d'un brise vent est pratiquement indépendante de la vitesse du vent.

ξ	$U_o(\eta) [ms^{-1}]$				
	3-3,9	4-4,9	5-5,9	6-6,9	7-7,9
1,3	0,62	0,60	0,63	0,72	0,76
4	0,36	0,38	0,46	0,52	0,53
8	0,47	0,48	0,48	0,46	0,50

TABLEAU V - Efficacité moyenne $\varepsilon(\xi, \eta)$ au niveau $\eta = 0,25$ d'un brise vent constitué par deux rangs d'érables de 12 m de haut pour différentes vitesses du vent (VAN EIMERN 1956-1957).

3.2 - INFLUENCE DE LA RUGOSITÉ DU PLAN

Si l'on se reporte à la figure 8, on constate que les mesures effectuées par JENSEN en soufflerie avec un plancher lisse et un plancher rugueux montrent que l'efficacité d'un brise vent diminue de façon sensible lorsque la rugosité du sol augmente.

Afin de voir comment intervient ce facteur, il est nécessaire tout d'abord d'analyser les conditions de similitude de l'écoulement au voisinage d'un brise vent.

3.2.1 - LES CONDITIONS DE SIMILITUDES DE L'ÉCOULEMENT

Parmi les différents critères de similitude, le nombre de REYNOLDS est, dans le cas de l'aérodynamique des brise vent, celui qui a la plus grande importance. L'écoulement étant turbulent, ce sera le nombre de REYNOLDS turbulents $Re_{turb.}$ qui sera considéré :

$$Re_{turb.} = \frac{\bar{U} H}{K_M} \quad (29)$$

H : hauteur du brise vent

K_M : viscosité turbulente ou coefficient d'échange d'énergie mécanique.

On sait (GUYOT 1976) que le flux turbulent vertical de quantité de mouvement est égal à la contrainte pariétale τ_0 , et donné par :

$$\tau_0 = -\rho K_M \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} \quad (30)$$

En l'absence de gradient thermique, le profil vertical de vitesse peut se représenter par la loi semi-logarithmique :

$$\bar{U}(Z) = \frac{U^*}{k} \log_e \frac{Z}{Z_0} \quad (31)$$

U^* est la vitesse de frottement donnée par :

$$U^* = \sqrt{\frac{\tau_P}{\rho}} \quad (32)$$

En combinant les expressions (30), (31) et (32), on obtient :

$$K_M = k Z U^* \quad (33)$$

D'où l'expression du nombre de REYNOLDS turbulent obtenue en remplaçant U^* et K_M par leur valeur :

$$Re_{turb} = \frac{1}{k^2} \log_e \frac{H}{Z_0} \quad (34)$$

Ainsi, le régime de l'écoulement au voisinage du brise vent semble ne dépendre que du rapport $\frac{H}{Z_0}$, ce qui a deux conséquences :

- a) L'écoulement de l'air est indépendant de la vitesse du vent. Les vitesses du vent mesurées en des points homologues doivent rester dans un rapport constant pour un même type d'obstacle. Ceci confirme ce qui a été dit dans le paragraphe précédent.
- b) L'écoulement de l'air doit dépendre essentiellement de la rugosité du sol. Il doit donc être possible de classer les efficacités des brise vent en fonction du paramètre de rugosité réduit :

$$\eta_o = \frac{Z_0}{H} \quad (35)$$

L'approche théorique de l'écoulement effectuée par KAISER (1959) confirme également l'importance de ce paramètre.

En fait, le raisonnement qui vient d'être présenté est quelque peu schématique. Il ne tient pas compte de la variation de la vitesse avec l'altitude et également du taux de turbulence de l'écoulement. Il est donc probable que d'autres facteurs interviendront également.

3.3.2 - LES RESULTATS EXPERIMENTAUX

Les mesures effectuées par JENSEN (1954) en soufflerie et dans les conditions naturelles montrent effectivement que le critère de similitude à respecter dans les études sur modèle est le paramètre η_o . C'est ce que montre la figure 17 qui donne les courbes d'évolution de l'efficacité du brise vent de même porosité, et au même niveau, en fonction de la rugosité du sol en soufflerie et dans les conditions naturelles.

Les mesures que nous avons effectuées sur modèle en soufflerie (GUYOT 1972) sont en bon accord avec celles de JENSEN comme le montre le tableau VI.

Dans les conditions naturelles, le rôle joué par la rugosité du sol est bien mis en évidence dans le tableau VII où sont regroupées des mesures effectuées au voisinage d'un même brise vent, en période hivernale (sol nu et peu rugueux) et à la fin du printemps (culture de blé) (GUYOT 1972).

L'accroissement de la rugosité du sol s'est effectivement traduit par une réduction de la longueur de la zone protégée et une diminution sensible du critère d'efficacité. Cependant, si l'on compare les données des tableaux VI et VII, on constate que

les valeurs de ξ_1 et de S mesurées en soufflerie sont beaucoup plus grandes que celles mesurées dans les conditions naturelles avec des brise vent de caractéristiques aérodynamiques voisines. Le paramètre de rugosité réduit η_0 n'est donc pas la seule condition de similitude qui doit être respectée; d'autres facteurs doivent également intervenir. Ce point avait déjà été mis en évidence par KAISER (1959), WOODRUFF (1955) et également BLENK et TRIENES (1956) qui avaient constaté que, malgré le respect du paramètre de rugosité réduit, il était nécessaire, pour transposer les valeurs de ξ_1 obtenues en soufflerie, aux conditions naturelles, de les multiplier par un coefficient 0,4 ou 0,5.

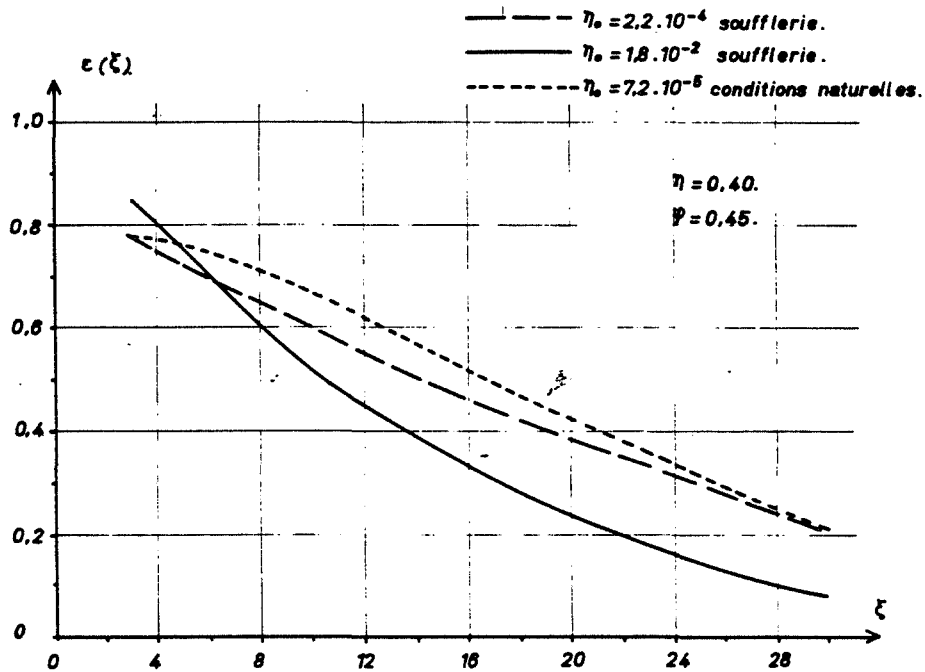


Fig. 17 - Influence de la rugosité du sol sur l'efficacité de brise vent de même porosité en soufflerie et, dans les conditions naturelles (d'après JENSEN 1954).

Brise vent	Hauteur	ϕ	Z_0 mm	η_0	ξ_1	S
Grille 2	5	0,49	0,52	$1,04 \cdot 10^{-2}$	27,0	10,4
Grille 2	5	0,49	0,046	$0,92 \cdot 10^{-3}$	36,0	13,9
Grille 5	5	0,65	0,52	$1,04 \cdot 10^{-2}$	19,5	6,6
Grille 5	5	0,65	0,046	$0,92 \cdot 10^{-3}$	24,0	9,0
JENSEN	4,5	0,50	0,01	$2,2 \cdot 10^{-4}$	37	14,5
JENSEN	4,5	0,51	0,81	$1,8 \cdot 10^{-2}$	28	12,3

TABLEAU VI - Variation de la longueur protégée ξ_1 et du critère d'efficacité S de modèles réduits de brise vent en soufflerie en fonction de la rugosité du plan.

Dates	ϕ	ζ	Zo mm	η_0	ξ_1	S
23-25/01/68	0,50	2,53	0,40	10^{-4}	17	7,0
15-16/05/68	0,50	2,53	160	$4 \cdot 10^{-2}$	10,5	3,9

TABLEAU VII - Variation de la longueur protégée ξ_1 et des critères d'efficacité S d'un même brise vent constitué par la grille n° 4 pour deux valeurs du paramètre de rugosité.

3.3 - INFLUENCE DE LA STABILITÉ THERMIQUE DE L'ATMOSPHÈRE

Parmi les facteurs dont dépendent les effets aérodynamiques des brise vent, la stabilité de l'atmosphère est un des premiers auquel on peut penser. En effet, lorsque l'air sera instable, une partie plus importante de l'écoulement aura tendance à passer au-dessus du brise vent alors que lorsque l'air sera stable l'écoulement aura tendance à passer à travers l'obstacle.

De nombreux auteurs ont constaté qu'effectivement, lorsque l'air est stable, l'extension de la zone protégée par un brise vent est plus grande que lorsque l'air est instable : SMALKO (1955), ALISOV, DROSDOV et RUBINSTEIN (1956) VAN EIMERN (1957), ROSENBERG (1966). Mais pour étudier cet effet il est nécessaire d'opérer dans des conditions climatiques telles que l'amplitude de variation d'un critère de stabilité comme le nombre de RICHARDSON, Ri (Cf GUYOT 1976), soit aussi grande que possible. Lorsque les mesures ont été effectuées dans des régions où Ri variait relativement peu, elles n'ont pas permis de tirer des conclusions valables (WOODRUFF, READ, CHEPIL 1959 HOGG 1965 - GUYOT 1972).

La première étude détaillée de l'influence du nombre de RICHARDSON sur l'écoulement de l'air au voisinage d'un brise vent a été effectuée récemment par SEGNER (1975), en ISRAËL, dans une région où le nombre de RICHARDSON pouvait atteindre des valeurs très importantes. A la suite de ses mesures, il propose une loi empirique donnant la variation de la vitesse \hat{U} en fonction du nombre de RICHARDSON déterminé à la hauteur H du brise vent Ri_H :

$$\hat{U} = 1 - \epsilon e^{\alpha Ri_H} \quad (36)$$

dans laquelle ϵ est l'efficacité du brise vent dont on retrouve la définition (5) lorsque $Ri_H = 0$, et α un paramètre fonction de la distance au brise vent.

La figure 18a qui représente la variation de \hat{U} en fonction de l'abscisse ξ pour différentes valeurs de Ri_H , montre bien l'importance du rôle joué par la stabilité atmosphérique : plus l'air est instable (valeurs de Ri_H plus négatives), plus la réduction de la vitesse du vent est faible.

La figure 18b donne la variation de α en fonction de ξ . Ce paramètre exprime le taux relatif avec lequel \hat{U} tend vers l'unité lorsque l'instabilité s'accroît. Cette figure montre que l'effet est minimum au voisinage du brise vent car la turbulence induite par l'obstacle est dominante.

L'effet absolu de la stabilité est représenté par le produit $\alpha \epsilon$ qui est la dérivée de l'équation (36) à $Ri_H = 0$. Cette dérivée est le facteur qui intéresse l'ingénieur, car elle permet de connaître les modifications de la vitesse du vent qui seront apportées. La figure 18c qui représente la variation de $\alpha \epsilon$ en fonction de ξ , montre que l'effet maximum de la stabilité atmosphérique sur l'écoulement de l'air se manifeste aux alentours de $\xi = 10$, comme cela peut être vérifié sur la figure 18a.

Ainsi, d'après ce que nous venons de voir, il sera nécessaire pour représenter aussi fidèlement que possible l'écoulement de l'air au voisinage d'un obstacle, de respecter un second critère de similitude : le nombre de RICHARDSON.

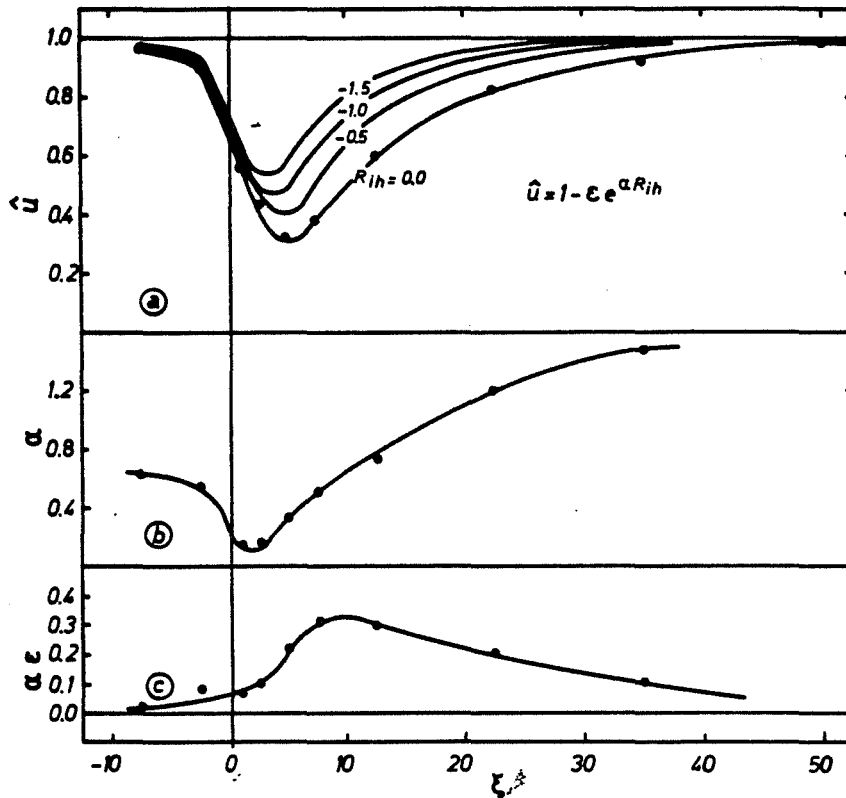


Fig. 18 - a) Variation de la vitesse réduite \hat{U} en fonction de la distance au brise vent et du nombre de RICHARDSON
 b) Variation du coefficient de décroissance α en fonction de ξ
 c) Variation du produit $\alpha \epsilon$ en fonction de ξ (d'après SEGNER 1975).

3.4 - INFLUENCE DU TAUX DE TURBULENCE DE L'ÉCOULEMENT

3.4.1 - INFLUENCE DU TAUX DE TURBULENCE SUR L'ÉCOULEMENT DE L'AIR AU VOISINAGE D'UN BRISE VENT ISOLE

La figure 11 montre que des brise vent identiques placés dans des lieux différents, ont des effets nettement différents. Les mesures ont pourtant été effectuées avec des valeurs du paramètre de rugosité du sol assez voisines. De plus, pour éliminer l'influence de la stratification thermique, elles ont été réalisées en hiver alors que le gradient thermique vertical était voisin de la neutralité (GUYOT 1972). La vitesse moyenne du vent au cours des différentes mesures avait également des valeurs voisines. Comme le montre le tableau VIII qui regroupe les différents paramètres caractéristiques des brise vent étudiés et de l'écoulement.

Grille	Lieu	ϕ	ζ	ξ_1	S	$\overline{U_0}$ m.s ⁻¹	η_0
1	Minière	0,52	1,39 - 1,42	<u>16</u>	<u>5,9</u>	3,24	$1,6 - 10^{-3}$
1	Montfavet	0,52	1,39 - 1,42	9	3,0	8,03	$5 - 10^{-4}$
2	Minière	0,49	2,65 - 2,82	<u>20</u>	<u>9,3</u>	4,65	$2 - 10^{-3}$
2	Montfavet	0,49	2,65 - 2,82	11,5	4,3	5,15	10^{-3}
5	Minière	0,65	1,33	18	6,9	4,62	10^{-3}

TABLEAU VIII - Paramètres caractéristiques des brise vent étudiés et de l'écoulement (les valeurs soulignées sont des valeurs estimées par extrapolation des courbes expérimentales).

Ces résultats montrent que, même si l'on reproduit lors d'essais de brise vent de dimensions différentes, les mêmes valeurs du paramètre de rugosité et du nombre de RICHARDSON, la similitude ne sera pas forcément assurée. Une dernière condition doit être remplie : le respect du taux de turbulence qui peut s'exprimer par :

$$I_x = \frac{\sqrt{U'^2}}{\bar{U}} \quad (37)$$

U' : fluctuation turbulente de la vitesse.

En effet, les mesures ont été effectuées dans la région parisienne où le vent est régulier et à un taux de turbulence relativement faible, alors que, dans la vallée du Rhône, le vent a un taux de turbulence élevé à cause du relief et de la présence de très nombreux brise vent. Malheureusement, au cours de ces essais, le taux de turbulence n'a pas pu être mesuré, faute d'instruments appropriés. Cependant, un indice du taux de turbulence a été fourni par la comparaison des données fournies par deux types d'anémomètres simultanément : des anémomètres sensibles à faible inertie (longueur de réponse 1 [m]) et des anémomètres classiques (longueur de réponse ≈ 10 [m]). Plus l'inertie d'un anémomètre est grande et plus il surestime la vitesse réelle du vent dans un écoulement turbulent (GUYOT 1970). Dans la région parisienne, la pente de la droite de corrélation entre les données des anémomètres classiques et celles des anémomètres sensibles était voisine de 1,10 alors que, dans la basse vallée du Rhône, elle atteignait 1,30 et était égale à 1,00 en écoulement régulier (GUYOT 1972), ce qui indique bien une nette différence dans le taux de turbulence.

Par ailleurs, TANI (1958) avait constaté également en soufflerie que l'introduction d'une grille dans la veine de la soufflerie en amont de son modèle de brise vent se traduisait par une diminution de l'efficacité de celui-ci. Ces constatations sont également confirmées par celles de MURUGO (1975) qui a opéré en canal hydraulique, comme le montre la figure 19.

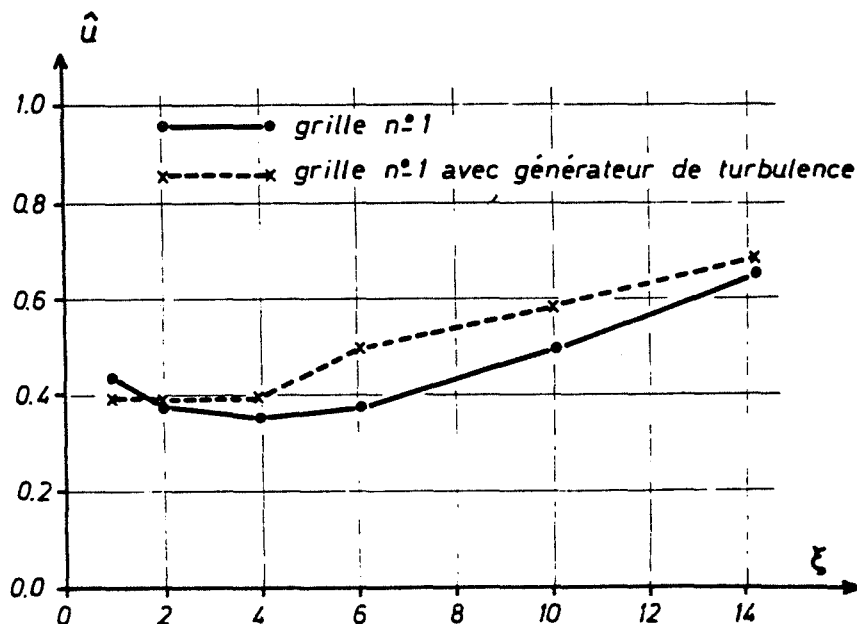


Fig. 19 - Influence de la turbulence sur la vitesse du vent mesurée à l'aval d'un brise vent ($\phi = 0,53$; $\zeta = 2$).
 1 - sans générateur de turbulence,
 2 - avec générateur de turbulence (barreaux cylindriques horizontaux (d'après MURUGO 1975).

Le phénomène ainsi mis en évidence présente une grande importance lorsque des brise vent se succèdent. Les premiers jouent le rôle de générateurs de turbulence et les suivants ont de ce fait une efficacité réduite. C'est ce que montre la figure 20 qui correspond à des mesures effectuées en soufflerie avec deux brise vent parallèles espacés de 15 fois leur hauteur. Ainsi, l'effet de brise vent successifs n'est pas cumulatif et, par ailleurs, l'effet d'un brise vent situé à l'intérieur d'un réseau sera très différent de celui qu'il peut avoir lorsqu'il est isolé comme le confirment des mesures effectuées récemment dans l'Ouest de la France (GUYOT et al. 1976).

La figure 12 qui représente la variation du critère d'efficacité S d'un brise vent en fonction de $1/\zeta$ montre que les points expérimentaux obtenus à LA MINIERE et à MONTFAVET sont situés sur deux courbes différentes. Alors qu'à LA MINIERE la courbe représentative de S passe par un maximum pour $1/\zeta \sim 0,36$ ($\zeta \sim 2,8$), à MONTFAVET elle se situe au-dessous et ne présente pas de maximum. Elle décroît dans tout l'intervalle. En fait, la figure 12 montre que, dans les conditions de MONTFAVET, l'efficacité d'un brise vent est pratiquement constante lorsque $1/\zeta < 0,3$ soit $\zeta > 3$. Les conditions de turbulence à MONTFAVET sont donc telles que l'optimum de porosité n'existe pratiquement plus et, à partir d'un coefficient de perte de charge voisin de 3, tous les brise vent ont sensiblement la même efficacité. Cependant ceci doit être corrigé, car pour les très faibles porosités ou les très forts coefficients de perte de charge, il existe un courant de retour à l'aval des brise vent et le critère S n'a plus de signification notamment lorsqu'il s'agit de protéger des végétaux.

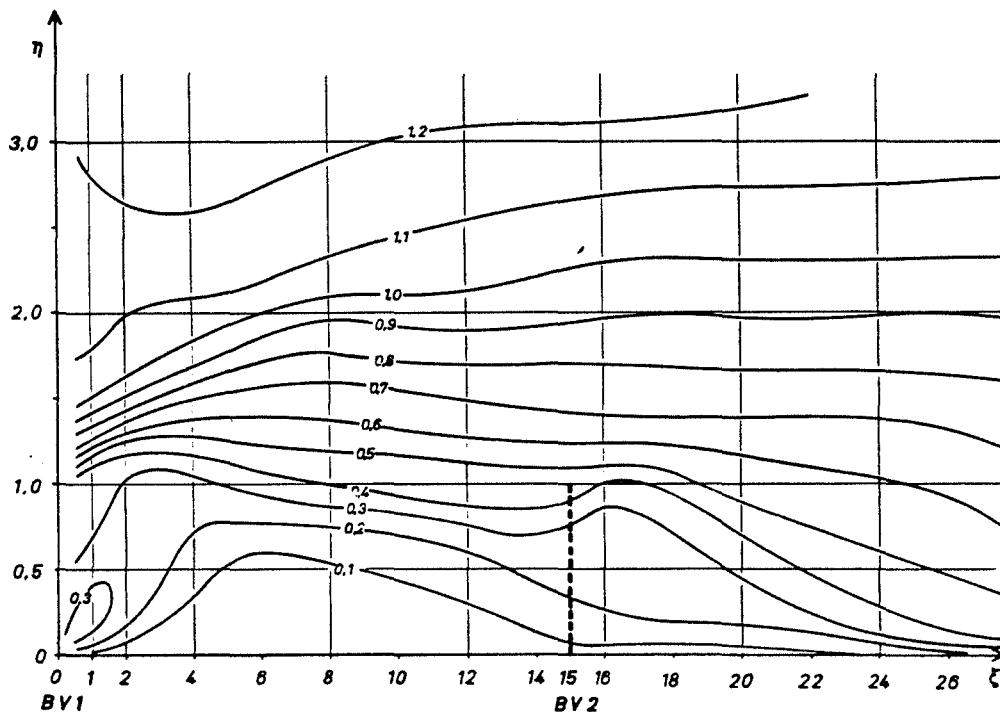


Fig. 20 - Réseau de courbes isovitesse, tracé au voisinage de deux modèles réduits de brise vent espacés de 15 fois leur hauteur en soufflerie.

4 - CONCLUSION

Cette mise au point sur les effets aérodynamiques des brise vent permet de mieux comprendre leur mode d'action sur le vent et de connaître les facteurs dont le rôle est prépondérant.

Tout d'abord, il est montré que la simple porosité géométrique est insuffisante pour caractériser un brise vent du point de vue aérodynamique. Il est préférable de prendre son coefficient de perte de charge ou éventuellement son coefficient de traînée. D'autre part, les études expérimentales montrent que les différentes parties d'un brise vent ne jouent pas le même rôle du point de vue aérodynamique. La porosité de la base de celui-ci a un rôle prépondérant car l'extension de la zone protégée est fonction du soufflage qui se produit au voisinage du sol.

Les caractéristiques de l'écoulement dans lequel un brise vent est plongé jouent également un rôle fondamental. L'extension de sa zone d'action dépend dans une très large mesure de l'intensité de la turbulence. En effet, plus le taux de turbulence est élevé, plus le sillage à l'aval d'un tel obstacle se dilue rapidement car le mélange entre l'air à vitesse réduite au voisinage du sol et l'air qui a contourné le brise vent est facilité. Le taux de turbulence de l'écoulement est fonction de la rugosité du sol, de la stratification thermique et surtout de l'environnement du brise vent.

5 - BIBLIOGRAPHIE

- ALISOV B.P., DROSDOV O.A., RUBINSTEIN E.S. -
Lehrbuch der Klimatologie Berlin - 1956
- BALTAXE R. -
Air flow patterns in the lee of model windbreaks. Archiv für Meteorologie
Geophysik mod Bioklimatologie, Série B 15 (3) 287-312 - 1967
- BAUMGARTNER A -
Baun und Wald in Windfeld. Allgemeine Forstzeitschrift, München, N° 13-14 - 1961
- BEAN A, ALPERI R.W., FEDERER C.A. -
A method for categorizing shelterbelt porosity. Agric. Meteorol. (14) 417-429 - 1975
- BLENK H., TRIENES H -
Strömungs technische Beiträge zum Windschutz. Zeitschrift Grundlagen der Land
Technik, N° 8 I et II - DUSSELDORF - 1956
- BRUN E.A., MARTINOT LAGARDE A., MATHIEU J -
Mécanique des Fluides T. 1 DUNOD PARIS 582 p. - 1959
- CABORN J.M. -
Width and cross-sectional profile in shelterbelts
Compte rendu 12ème Congrès Int. des Inst. Rech. Forest. Oxford 5-11 - 1956
- CABORN J.M. -
Shelterbelts and microclimate. H.M. Stat. Office For. Comm. Bull. 29. 135p. - 1957

- CASTRO I.P. -
Wake characteristics of two dimensional perforated plates normal to an air-stream.
J. Fluid Mech 46 (3) 599-609 - 1971
- DEN'UYL D. -
The zone of effective windbreak influence J. For. 34, 689-695 - 1936
- GRUNDMAN W., NIEMAN A. -
Erster Bericht über Untersuchungen über den einfluss der Windschutz Pflanzungen auf die Vegetation und das Klima des Bodens und der bodeunahen Luftschicht in Abhängigkeit von Anordnung Dichte, Höhe der Bepflanzung, Manuskript Meteorolo. Inst. Techn. Hochschule Hannover, Report n° 2201, 26 p. - 1954
- GUYOT G. -
Les brise vent - Modification des Microclimats et amélioration de la production agricole. L'eau et la production végétale. INRA Paris 243-302 - 1964
- GUYOT G. -
Méthodes et Techniques d'étude du vent. Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère, INRA Paris 373-396 - 1970
- GUYOT G. -
Etude de l'écoulement de l'air au voisinage d'un obstacle poreux en couche limite turbulente (Aérodynamique des brise vent). Thèse de Docteur Ingénieur Université de Paris VI. 163 p + figures. - 1972
- GUYOT G. -
Les profils de vitesse du vent au voisinage du sol. PROMOCLIM E (Etudes Thermiques et Aérauliques) Tome 7E n° 1 - 27-56 - 1976a
- GUYOT G., BOUCHET R.J., CHIAPALE J.P., MALET Ph., SEGUIN B., VERBRUGGHE M. -
Climat et aménagement en pays de bocage. INRA Station de Bioclimatologie - MONTFAVET Rapport de fin de contrat d'étude Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural 767 p. - 1976
- HAGEN L.J., SKIDMORE E.L. -
Turbulent velocity fluctuations and vertical flow as affected by windbreak porosity. Trans. Amer. Soc. Agr. Engin. 14. 634-637 - 1971
- HOGG W.H. -
A shelterbelt study relative shelter effective winds and maximum efficiency. Agric. Meteorol. 2 (5) 307-315 - 1965
- JENSEN M. -
Shelter effect. The Danish Technical Press. Copenhagen 264 p. - 1954
- JENSEN M. -
The model law for phenomena in natural wind Ingenioren Internation Edition, Dansk Ingenior forening 2 (4) 121-128 - 1958
- KAISER H. -
Die Strömung an Windschutzstreifen. Berichte Deutscher Wetterdienst, 7 (53), 36 p. - 1959
- KAISER H. -
Beiträge zum Problem der Luftbewegung in Windschutz Systemen. Meteor. Rundschau 12, 80-87 - 1959
- KONSTANTINOV A.R. -
Evaporation in nature. Israël Program for scientific Translation. 523 p. - 1966
- KÜHLEWIND C., BRINGMANN K., KAISER H. -
Richtlinien für Windschutz, I. Teil Agrarmeteor, und Landw. Grundlagen - 1955

- LOERCH K.A. -
Singhe-row windbreaks have definite value. Crop. an Soil, April 11 (7) - 1959
- MILLER D.R., ROSENBERG N.J., BAGLEY W.T. -
Wind reduction by a highly permeable tree shelterbelt. Agric. Meteorol. 14 (3)
321-333 - 1975
- 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. Conservatoire National des Arts et Métiers 134 p. - 1975
- NÄGELI W. -
Weitere Untersuchungen über die Windverhältnisse in Bereich von Windschutzstreifen.
Annales de l'Institut Fédéral de Recherches Forestières Suisse. XXIV - (2) 659-737.
1946
- NÄGELI W. -
Untersuchungen über die Windverhältnisse in Bereich von Schilfrohwänden. Annales de
l'Institut Fédéral de Recherches Forestières Suisse 29 (2) 213-266 - 1953
- NOKKENTVED C., FLENSBORG C.E. -
Leavirkningsundersogelser af type bestemmelser al laehegn (Inverstigations of
shelterbelts and estimation of type of shelterbelts) Hedesels kabets Tidsskrift 4
(59) 75-142 - 1938
- PLATE E.J. -
The aerodynamics of shelterbelts. Agric. Meteorol. 8 (3) 203-222 - 1971
- RADKE J.K., HAGSTROM R.T. -
Wind turbulence in a Soybean field sheltered by four types of wind barriers Agronomy
Journal 66 (2) 273-278 - 1974
- ROSENBERG N.J. -
Influence of snow fence and corn windbreaks on microclimate and growth of irrigated
sugar beets. Agronomy J. 58. 469-475 - 1966
- SEGINER I., SAGI R. -
Drag on a wind break in two dimensional flow Agric. Meteorol. 9. 323-333 - 1971
- SEGINER I., ROZNWEIG D. -
Flow around oriented porous obstructions. I et II, Technion Israël Institute of
Technology Agricultural Engineering Faculty Publication n° 138 (108 p) et n° 160
(114 p) - 1971-1972
- SEGINER I. -
Atmospheric stability effect on windbreak shelter and drag. Boundary layer Meteorology
8, 383-400 - 1975
- TABLER R.D., VEAL D.L. -
Effect of snow fence height on wind speed. Bull Internat. Assoc. Scient. Hydrol.
XVI (4) 49-56 - 1971
- TANI N. -
On the wind tunnel test of the model shelter hedge. Bull. National Inst. Agric. Sci.
Série A (6) 1-80 - 1958
- VAN EIMERN J. -
Bemerkungen über die Veränderlichkeit des Schutzeffektes von Windschutzstreifen.
Die Holzzucht n° 3 - 1956
- VAN EIMERN J. -
Über die Veränderlichkeit der Windschutz. Wirkung einer Doppelbaumreihe bei
verschiedenen meteorologischen Bedingungen. Berichte Deutsch Wetterdienst 5 n° 2,
193-210 - 1957

VAN EIMERN J., KARSCHON R., RAZUMOVA L.A., ROBERTSON G.W. -
Windbreak and shelterbelts. Organisation Météorologique Mondiale. Techn. Note n° 59
(WMO. n° 147 TP 70) 188 p. - 1964

WOODRUFF N.P. -
Shelterbelt and surface barrier. Effect on wind velocities evaporation, house heating,
snowdrifting. Agric. Experiment Station; Kansas State College of Agriculture and
Applied Science, Manhattan. Tec. Bull. 77 - 1954

WOODRUFF N.P., ZING A.W. -
A comparative analysis of wind tunnel and atmospheric air flow patterns about single
and successive barriers. Transact Amer Geophys. Union 36 (2) 203-208 - 1955

WOODRUFF N.P., READ R.A., CHEPIL W.S. -
Influence of a field windbreak on summer wind movement and air temperature. Technical
Bull. n° 100 Agric. Experiment Station, Kansas State University of Agricultural and
Applied Science, Manhattan - 1959

WOODRUFF N.P., FRYREAR D.W., LYLES L. -
Engineering similitude and momentum transfer principles applied to shelterbelts
studies. Trans. Am. Soc. Agric. Eng. 6 (1) 41-47 - 1963

